

Etude hygrothermique de parois
dans les bâtiments à haute performance énergétique



En préambule de ce mémoire, je souhaite adresser mes remerciements aux personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce travail en m'apportant aide et encadrement : mes tuteurs au sein de la société exNdo studio MM. Thomas Jusselme et Jérémie Vareilles et mon promoteur M. Philippe André.

Mes remerciements s'adressent aussi à Shahizal Shakir (eXndo) pour son aide sur les calculs ; M. Daniel Quenard (CSTB), M. Arnaud Evrard (UCL), M. Claude-Alain Roulet (EPFL) et MM. Samuel Courgey et Jean-pierre Moya (Etude ANAH), pour les informations et réponses fournies ; les personnes de mon jury, MM. Sigrid Reiter, Jean-Marie Hauglustaine et Dimitri Schmitz pour leur lecture.

J'aimerais aussi remercier MM. Pierre Leclercq, Jacques Teller et Jean-Claude Souche (EMA) d'avoir rendu ce partenariat possible.

Résumé

Ce travail a été effectué dans le cadre d'un partenariat avec le bureau d'études exNdo Studio (Lyon, France). Il s'oriente sur le comportement hygrothermique de parois de bâtiments à hautes performances énergétiques. Le but est d'intégrer ces concepts de dimensionnement vis-à-vis de l'humidité au processus de conception des ingénieurs et architectes : risques de condensation interne et formation de moisissures en surface.

Le sujet n'est pas encore totalement maîtrisé et commence à peine à être intégré dans les bureaux d'études. Pourtant les pathologies qui y sont liées sont une réalité. L'étude se base sur une première partie théorique, un tour d'horizon des méthodes de calcul et des critères permettant de définir les risques. Pour avoir un regard critique, des études de cas sont analysées avec les méthodes statiques et des simulations dynamiques faites sur le logiciel Delphin. Ces études multicritères permettent de mieux comprendre le comportement des différents matériaux et des systèmes constructifs mais aussi comment réagissent les méthodes et indicateurs. Finalement, pour conclure et lier ces éléments, la dernière partie propose une méthode d'intégration de la prévention des risques liés à l'humidité dans la conception. Une telle optimisation permet alors d'améliorer le confort, la durabilité et la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment.

Synthétiquement, de ce travail résulte que les méthodes statiques sont fiables mais sécuritaires. La pratique de l'isolation par l'intérieur est problématique et il faudra lui préférer une isolation par l'extérieur ou mixte. Les ponts thermiques sont une réelle problématique pour les risques hygrothermiques. Pour finir, la chute de résistance thermique liée aux transferts hygrothermiques devrait être intégrée aux calculs réglementaires.

Abstract

This work was done in partnership with the engineering company exNdo Studio (Lyon, France). It focuses on the hydrothermal behavior of walls in high energy performance buildings. The goal of the study is to integrate principles of calculating humidity (internal condensation and surface mould) into the design process of engineers and architects.

The subject is not yet fully mastered and just beginning to be integrated into engineering companies, however the associated pathologies are real. The first part of the study is theoretical – an overview of calculation methods and criteria for defining risk.

For a critical view, case studies are analyzed using static methods and dynamic simulations on the Delphin software. These multi-criteria studies help us to better understand the behavior of different materials and indicators. Finally, to conclude and bind these elements, the last section proposes a method for integrating the prevention of risks related to moisture in the design. Such optimization improves then comfort, durability and energy performance of the buildings envelope.

The work concludes that static methods whilst reliable are too conservative. The practice of interior insulation is problematic and exterior or mixed insulation is preferred. Thermal bridges are a real problem for hydrothermal risks. Finally, the fall of thermal resistance due to hydrothermal transfers should be integrated to regulatory calculations.

SOMMAIRE

Introduction	7
Chapitre 1 : Problématique	9
1. Contexte	9
1.1. Environnemental : la course à la performance	9
1.2. Désordres en chiffres	9
1.3. Désordres et leurs conséquences	11
1.4. Désordres : Contexte réglementaire et juridique	12
2. Réglementations thermiques	13
2.1. RT2012	13
2.2. P.E.B.	14
2.3. Transferts hygrothermiques et réglementations thermiques	14
3. Formulation de la problématique	15
Chapitre 2 : Etat de l'art	17
1. Notions de base	17
1.1. L'air humide	17
1.1.1. Pression partielle de la vapeur d'eau	17
1.1.2. Pression de vapeur saturante	17
1.1.3. Humidité absolue	18
1.1.4. Humidité relative	18
1.1.5. Condensation – Définition	18
1.1.6. Diagramme psychrométrique	19
1.2. Porosités des matériaux	19
1.2.1. Porosité	19
1.2.2. Teneur en eau	20
1.2.3. Courbes isothermes de sorption et désorption	20
1.2.4. Succion	22
1.2.5. Perméabilité	22
1.2.6. Perméance et résistance à la diffusion de vapeur d'eau	23
1.2.7. Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau	23
1.2.8. Epaisseur d'air équivalente	24
1.2.9. Perméabilité liquide et coefficient de transport capillaire	24
1.3. Transferts et fixation de l'eau	25
1.3.1. Mécanismes de fixation	25
a. Adsorption	25
b. Condensation capillaire	25
1.3.2. Transferts d'humidité	26
c. Vapeur d'eau	26
d. Eau liquide – Loi de Darcy	28
1.4. Equations de transport	29
1.4.1. Etablissement des équations	30
a. Chaleur	30
b. Vapeur d'eau et eau liquide	31
c. Couplages	31

1.4.2. Résolution des équations : Conditions aux limites	32
2. Cadre réglementaire	33
2.1. Différentes réglementations	33
2.2. Normes de dimensionnement vis-à-vis du risque hygrothermique	35
2.2.1. NF EN ISO 13788	36
2.2.2. NF EN15026	36
3. Indicateurs – Synthèse	37
4. Méthodes de calcul et Outils	40
4.1. Les différentes méthodes de calculs	40
4.1.1. Conditions hygrothermiques	40
4.1.2. Calcul du FR _{Si}	42
a. Risque de formation de moisissures	42
b. Structures à faible inertie thermique	46
4.1.3. Risque de condensation interne – Méthode type Glaser	47
4.1.4. Simulation dynamique selon (NF EN 15026 s.d.)	51
4.2. Présentation des outils	54
4.3. Démarche	56
Chapitre 3 : Analyses de cas	58
1. Hypothèses générales	58
1.1. Conditions hygrothermiques	58
1.2. Propriétés des matériaux	59
1.3. Données en sortie	60
1.4. Maillage	60
1.4.1. Validation du maillage	61
1.4.2. Hypothèses de modélisation du maillage	64
1.4.3. Interfaces	64
1.5. Temps	65
1.5.1. Influence de l'heure de début de calcul	65
1.5.2. Influence du pas de temps	66
1.5.3. Hypothèses de modélisation	68
2. Etudes de cas	68
2.1. Etude 1D : parois composées	68
2.1.1. Cas 1 : Isolation par l'extérieur (15cm)	68
2.1.2. Cas 2 : Isolation par l'intérieur (15cm)	69
2.1.3. Cas 3 : isolation par l'intérieur (25cm)	70
2.1.4. Cas 4 : isolation par l'intérieur (15cm) et pare vapeur	73
2.1.5. Isolation mixte	74
a. Méthode de Glaser	74
b. Cas 5 : Isolation mixte - 10cm intérieur / 5cm extérieur	76
c. Cas 6 : Isolation mixte – 7,5cm intérieur / 7,5cm extérieur	76
d. Cas 7 : Isolation mixte - 5cm intérieur / 10cm extérieur	77
2.1.6. Conclusions	77
2.2. Etude 2D : Ponts thermiques	79
2.2.1. Plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur	79
a. Généralités	79

b.	Cas initial	80
c.	Effet du pont thermique sur les propriétés de la paroi	81
d.	Au niveau du pont thermique	82
2.2.2.	Etude paramétrique	84
a.	Variation de l'épaisseur d'isolant	84
b.	Variation du type d'isolant	85
c.	Synthèse	89
2.2.3.	Généralisation : Moisissures et ponts thermiques	90
a.	Hypothèses de modélisation	91
b.	Cas étudiés	91
c.	Résultats	93
3.	Conclusions et règles de bonnes pratiques	96
Chapitre 4 : Intégration à la démarche de conception		99
1.	Processus de conception	99
1.1.	Les étapes du projet	99
1.2.	Le dimensionnement	100
2.	Dimensionnement hygrique et processus de conception	101
2.1.	Evaluation des méthodes	101
2.1.1.	Les échelles	101
2.1.2.	Application	102
2.1.3.	Synthèse	103
2.2.	Intégration de la dégradation thermique	107
Conclusion		109
Nomenclature		110
Listes : Figures, Tableaux, Graphiques et Equations		112
Bibliographie		116
Annexes		119
1.	Hypothèses générales	120
1.1.	Calcul de $fRS_{i,min}$	120
1.2.	Propriétés des matériaux	121
1.3.	Validation du maillage	125
1.4.	Temps	126
2.	Etudes de cas	129
2.1.	Etude 1D : parois composées	129
2.2.	Etude 2D : Ponts thermiques	143

INTRODUCTION

Actuellement, il n'est pas envisageable de concevoir des bâtiments sans viser une performance énergétique minimum. La maîtrise des phénomènes thermiques est à la pointe. Les systèmes constructifs installés sont très performants et les enveloppes de bâtiment de plus en plus hermétiques. Les transferts hydriques sont souvent peu étudiés et mal connus des concepteurs. Concernant ces bâtiments à haute performance, une problématique émane de savoir si les problèmes de condensation seront évités. Il n'est pas encore possible d'avoir un retour d'expérience significatif sur ces nouvelles constructions puisqu'il s'agit de phénomènes très lents.

Ce sont des questions encore peu abordées qui commencent à animer les bureaux d'études d'éco-conception. C'est pourquoi, ce mémoire a été rédigé dans le cadre d'un stage au sein de la société exNdo studio, permettant de saisir la problématique réelle des concepteurs actuels. Ainsi cette étude s'inscrit dans une réalité de terrain tout en gardant une approche scientifique. L'approche se fera en deux grandes étapes : une analyse de la problématique et des phénomènes physique suivie d'une étude des méthodes de détection de risque hydrique.

N'ayant pas de retours d'expériences, il est légitime de penser à l'expérimentation. Mais celle-ci n'a pas été possible à cause de la lenteur des phénomènes (se compte en nombre d'années). Donc l'étude se fera par des méthodes de simulation dynamique qu'il faudra analyser et critiquer.

Pour commencer, il est nécessaire d'expliquer le contexte dans lequel s'inscrit ce travail, permettant une formulation plus précise de la problématique. Dans un second temps, sera fait un tour d'horizon des différentes notions de physiques mais aussi des différents indicateurs de risque et leurs méthodes de calcul. Afin de tester la réaction de ces indicateurs et calculs, la troisième étape de ce mémoire se concentrera sur l'analyse d'études de cas. La quatrième et dernière partie abordera l'intégration de ce type de dimensionnement dans le processus de conception de bâtiments.

problématique

état de l'art

analyses de cas

intégration

CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE

1. Contexte

1.1. Environnemental : la course à la performance

Les enjeux environnementaux et de développement durable font partie d'une problématique mondiale très actuelle. Les émissions de gaz à effet de serre sont en constante augmentation, dégradant la qualité de vie sur notre planète terre. Les Nations Unies ont mis en place une démarche visant à diminuer ces différentes émissions au travers du protocole de Kyoto signé en 1997. L'objectif était de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 5% entre 2008 et 2012 par rapport au niveau de 1990 (UNFCCC 2013).

Le secteur du bâtiment est un des plus gros pollueur en termes de gaz à effet de serre derrière le transport. Dans ce contexte, les différents pays européens ont développé des réglementations sur la performance énergétique des bâtiments. Réglementations qui deviennent de plus en plus contraignantes. En France, un programme de lutte contre le changement climatique a été mis en place et les exigences thermiques des bâtiments neufs sont renforcées tous les 5 ans. De la même manière, la Belgique réforme le système de conception des bâtiments par la mise en place d'un décret sur la performance énergétique des bâtiments (P.E.B.).

Avec cette course à la performance, arrivent de nouvelles méthodes de dimensionnement, de nouveaux systèmes constructifs et avec eux, de nouvelles pathologies.

1.2. Désordres en chiffres

Actuellement, les désordres dans le bâtiment sont connus et il y a suffisamment de recul pour pouvoir les analyser. Seul le cas de la France est traité dans ce paragraphe.

L'Agence Qualité Construction (AQC) relève les désordres expertisés depuis 1995 dont la plupart sont fournis par les assureurs. Elle publie chaque année les Sycodés (Systèmes de collecte des désordres). Dans l'ouvrage publié en 2012, (AQC 2012), elle relève que la plupart des désordres sont de l'ordre de l'exécution (Figure 1), mais ce ne sont pas ceux qui ont le plus gros impact financier. Viennent ensuite les défauts de conception qui sont eux les plus coûteux (Figure 1 et Figure 2). La maîtrise de la conception est un réel enjeu.

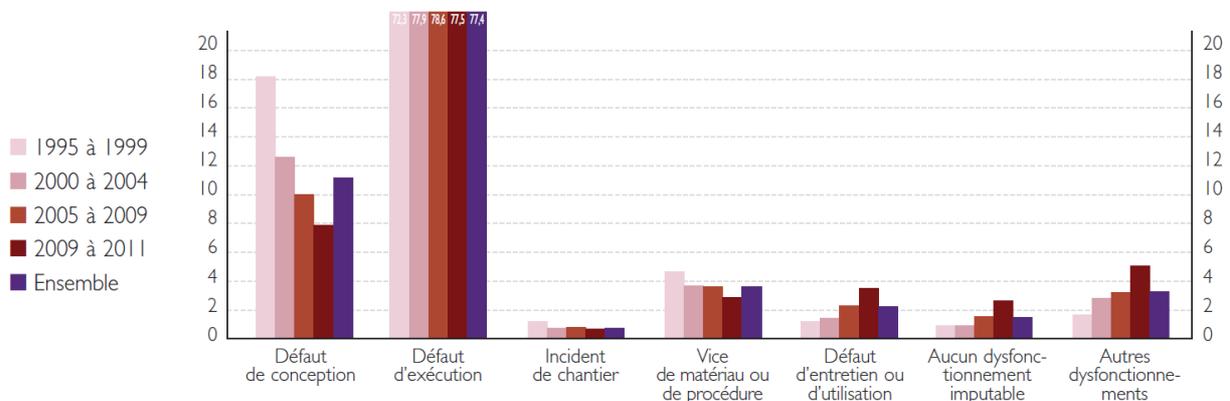


Figure 1 : Poids relatifs (en % nombre) des désordres répartis selon les dysfonctionnements et l'année d'apparition - Extrait de (AQC 2012)

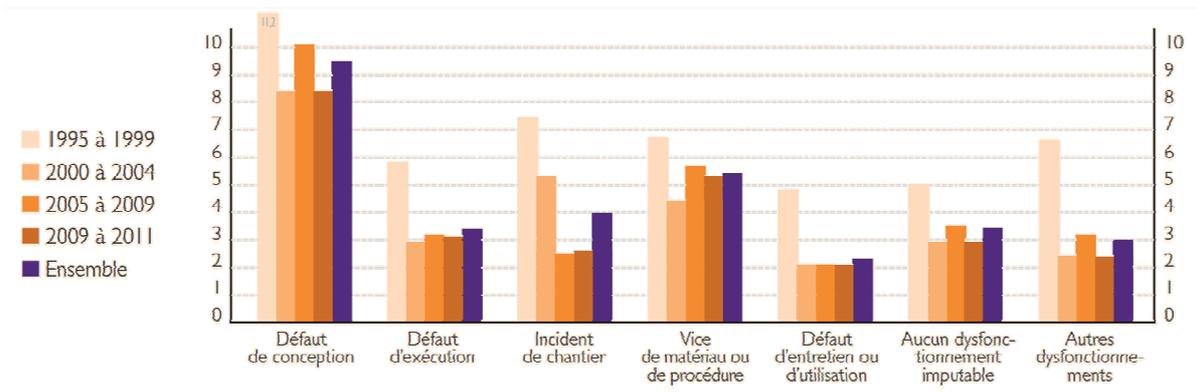


Figure 2 : Coût relatif de désordre (coût réparation en % coût construction) des désordres répartis selon les dysfonctionnements et l'année d'apparition - Extrait de (AQC 2012)

Parmi ces défauts, précisons les types de pathologie rencontrés.

L'eau est un ennemi majeur dans le bâtiment. Plus de 50% des désordres recensés se manifestent par des défauts d'étanchéité à l'eau (Figure 3). Seulement un peu moins de 2% du à des problèmes de condensation à l'intérieur du bâtiment. Il n'y a pas de précision quant aux conséquences des problèmes dus à la condensation interne dans les parois.

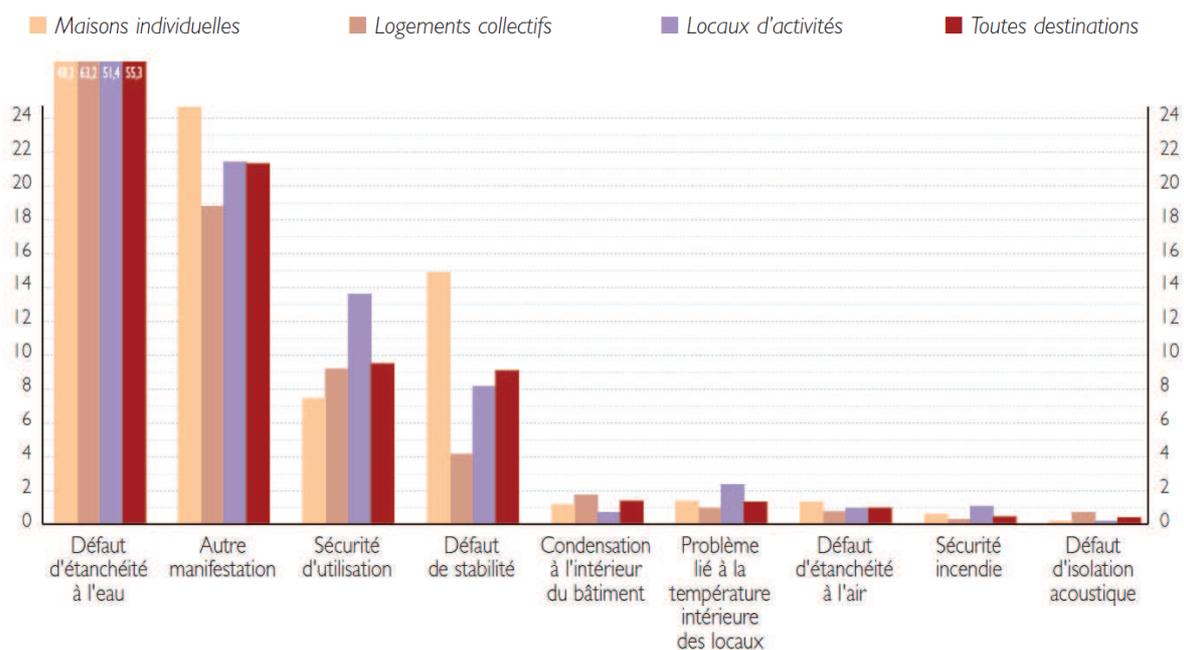


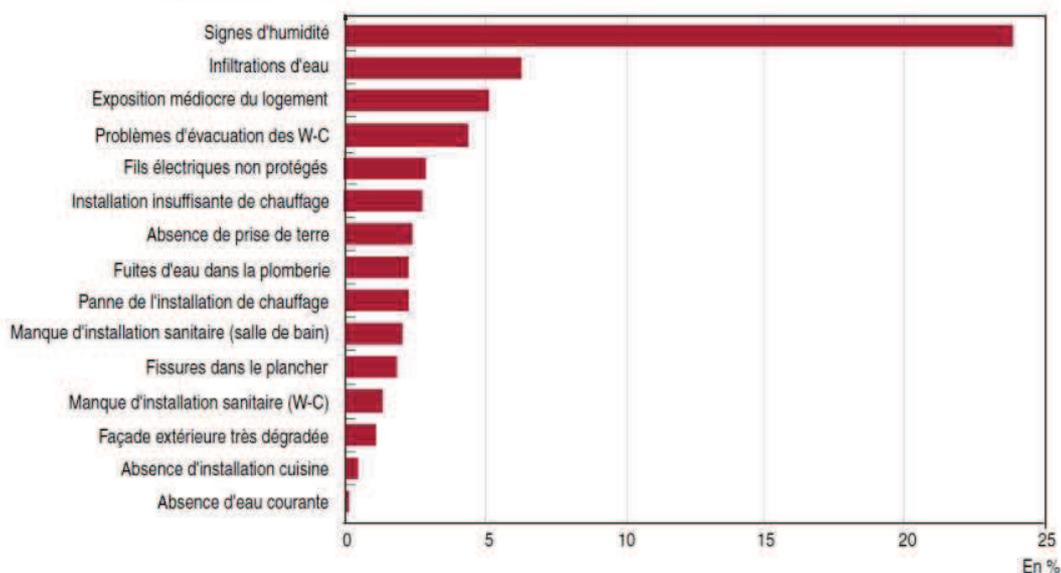
Figure 3 : Répartition par manifestation des désordres (en % de l'effectif) selon le type d'ouvrage – Extrait de (AQC 2012)

Il faut remettre ces chiffres dans leur contexte. Seuls sont recensés les désordres déclarés par les assureurs. En général, il s'agit de désordre assez grave et dont les conséquences sont remarquables rapidement (assurance décennale). Beaucoup de non-qualité ne sont pas prises en compte ici et les ménages décident souvent d'intervenir de leur côté, ou de vivre avec ces défauts.

L'INSEE a publié une enquête sur la qualité des logements (CHESNEL 2004). Dans celle-ci, il est constaté que parmi les personnes présentant des difficultés dans son logement (un peu plus de 50% des logements en France), environ 25% des ménages recensent des signes d'humidité sur certains murs dans le bâtiment qu'elle occupe (Figure 4), soit environ un logement français sur huit. Les signes d'humidité sont une conséquence commune à différentes causes. Les infiltrations d'eau sont

séparés, elles ne font pas parties des défauts d'étanchéité à l'eau. Dans cette enquête de l'INSEE (CHESNEL 2004), il est aussi expliqué que la plupart de ces signes d'humidité sont situés dans le nord. Il est connu que les problèmes de condensation sont plus importants dans les climats humides. Il est possible de supposer que parmi les problèmes d'humidité, de nombreux cas sont liés à la condensation à l'intérieur du bâtiment et ne sont pas déclarés à l'AQC. En reliant cela à l'étude précédente, seul 1% des désordres lié à l'humidité sont réellement déclarés et parmi ceux-ci, il doit s'agir des plus graves.

① **Part des logements concernés pour chaque difficulté**



Lecture : des problèmes d'infiltration d'eau sont signalés dans 6,3 % des logements.
 Source : Enquête Logement 2002, Insee

Figure 4 : Part des logements concernés pour chaque difficulté recensée - Extrait de (CHESNEL 2004)

Tout cela est à mettre en parallèle avec des enquêtes plus récentes sur les bâtiments à haute performance énergétique. Le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a publié un retour d'expérience sur les bâtiments à basse consommation ("RAGE" 2012). Cette étude se restreint à 211 opérations en France. Il y est constaté de nombreux problèmes d'étanchéité à l'air. Les conséquences de ces défauts ne sont à ce jour pas encore connus. Or ils engendrent des transferts hygrothermiques imprévus. Sur les problèmes hydriques, seule l'humidité de chantier est mentionnée. Elle devrait être prise en compte dans le dimensionnement hygrothermique.

Les problèmes liés aux transferts hygrothermiques sont une réalité de terrain dans le bâtiment. Souvent peu maîtrisés et négligés, il est intéressant pour la suite de voir les conséquences qu'ils peuvent avoir.

1.3. Désordres et leurs conséquences

L'humidité provoque des désordres de type mécanique sur les matériaux de la construction : détérioration des revêtements de surface, tassement des isolants, corrosion des éléments métalliques, pourrissement du bois, ... De plus, les propriétés des matériaux varient en fonction de l'humidité. Il y a aussi des pertes en efficacité thermique, souvent négligées dans le dimensionnement alors qu'elles peuvent être conséquentes.

Qui dit humidité, dit aussi risque de formation de moisissures. Il s'agit alors d'un risque sanitaire car ces moisissures sont nuisibles à la santé des habitants. En effet, elles contiennent des mycotoxines qui sont reconnues toxiques chez l'être humain, (CCHS 2006). Elles peuvent être à l'origine d'un affaiblissement du système immunitaire causant des allergies et problèmes respiratoires (asthme, irritations, toux, ...).

Les moisissures se développent dans certains environnements réunissant les facteurs suivants : de l'oxygène, des matières organiques et un pH, une température et une humidité relative adaptés. Le temps d'exposition à ces différents facteurs est aussi important. En général dans les bâtiments, la plupart de ces conditions sont vérifiées. Seule la variation de l'humidité est contrôlable pour éviter le développement de celles-ci. Ce sera le paramètre à surveiller.

Chaque type de moisissure possède un environnement propre favorable à son développement. Il est difficile d'établir un indicateur simple. Dans la publication de M. Künzel, (H. M. KÜNZEL 1995), l'auteur explique que l'exposition du matériau à une humidité relative supérieure à 80% est dangereuse. L'indicateur temps n'est pas donné. Un tableau simplifié a été déterminé par MM. Sedlbauer et Krus, (SEDLBAUER et KRUS 2003). Ils indiquent le risque de formation de moisissures selon la température, l'humidité relative, le temps d'exposition et le type de matériau. Le Tableau 1 ci-dessous reprend ces critères.

Pour la suite de cette étude, afin de fixer un indicateur, un dépassement de 80% d'humidité relative pendant plus de 5 jours consécutifs sera considéré comme inacceptable vis-à-vis du risque de formation de moisissures.

Humidité relative minimale (%)	Informations sur la température (°C)	Durée (h/jour)		Remarques / Matériaux
		Quotidienne (h/jour)	Nombre de jours consécutifs (jour)	
75	Pas de données	>12	3	Matériaux divers
80		12	5	
		6		
		12	Quotidien	
95	14	<24	6 Semaines	Enduits et peintures sans pollution
	18,5	6		Plâtres avec salissures légères
	14	<24		Peintures à émulsion, Plaques de plâtres et papiers peints avec pollutions
	18,5	1		

Tableau 1 : Risque de formation de moisissures - Extrait (SEDLBAUER et KRUS 2003)- Traduit par l'auteur

1.4. Désordres : Contexte réglementaire et juridique

Les jurisprudences trouvées pour ce type de problèmes jugent en général de la décence d'un logement. Les experts concluent généralement sur deux causes différentes à ces pathologies : l'humidité provient d'une mauvaise ventilation ou de la présence d'un pont thermique. L'origine de ces différentes causes est un défaut de conception, d'exécution ou une mauvaise utilisation. La responsabilité peut donc être imputée au concepteur, au constructeur ou à l'utilisateur en fonction du cas. Par exemple, si les désordres résultent d'un défaut d'isolation thermique qui rendent

l'immeuble impropre à sa destination, alors l'article 1792,al. 1^{er} in fine, du code civil français peut s'appliquer, attribuant la responsabilité du dommage au constructeur.

Citons des exemples de jugements à ce sujet. Le 7 octobre 1993, la cour administrative d'appel de Paris a statué sur un cas de malfaçons, (Décision de la cour administrative d'appel de Paris 1993). Après réception des travaux, des problèmes de condensations et moisissures sont apparus dans les appartements d'un HLM (habitation à loyer modéré). Il s'est avéré qu'il manquait une partie de l'isolation prévue initialement. Cette malfaçon relevait de la garantie décennale. L'entrepreneur a été condamné ainsi que l'architecte en charge de la surveillance de l'exécution des travaux. Plus récent, le 24 mai 2004, la cour d'appel de Douai statuait sur un cas de désordres dus à un manque d'isolation sur des acrotères, (Décision de la cour d'appel de Douai 2004) . La responsabilité du bureau de contrôle a été engagée dans ce cas, parce qu'il n'avait pas émis de réserves sur ce point. Mais les locataires par leur mauvaise utilisation des locaux (surpopulation, obstruction des ventilations, ...) ont aggravé les dommages, ils ont été aussi condamnés.

Pour replacer tout cela dans le contexte de ce travail, deux axes sont possibles : la performance de l'enveloppe ou de la ventilation.

Pour diminuer les risques, il faut augmenter la ventilation. Cela implique une augmentation de la consommation énergétique, pour la ventilation mais aussi au niveau du chauffage en hiver. En regardant les désordres qui y sont liés, en général, ce n'est pas le concepteur qui est à l'origine des problèmes. C'est plutôt l'utilisateur qui fait un mauvais entretien ou une mauvaise utilisation (obstruction des ouvertures, changement des filtres, ...).

Pour ces raisons, il vaut mieux travailler sur le traitement de l'isolation en conception. C'est sur ce point que sera concentrée toute cette étude.

2. Réglementations thermiques

Suite à la signature du protocole de Kyoto, la plupart des pays européens ont mis en place des réglementations afin de réguler le développement de l'espace bâti. Ces nouvelles exigences engagent la responsabilité de tous les constructeurs vers une démarche durable et des niveaux de performances énergétiques de plus en plus élevés. Regardons le contenu de ces différentes réglementations afin de voir si elles prennent en compte les transferts hygrothermiques.

Seront détaillées ci-dessous uniquement les cas de la France et de la Belgique.

2.1. RT2012

En France, suite au Grenelle de l'environnement, (Article 4 de la loi Grenelle 1 s.d.), la réglementation thermique 2012 (RT2012) est entrée en vigueur depuis ce 1^{er} janvier 2013 pour toutes les nouvelles habitations. Elle vise à généraliser les bâtiments à basse consommation sur l'ensemble du territoire. Elle suit la réglementation thermique 2005 (RT2005). Celle-ci spécifiait des exigences sur la consommation d'énergie en passant par la performance de l'enveloppe (coefficient de déperdition $U_{bat,max}$ en $W/(m^2.K)$) et des systèmes (coefficient de consommation d'énergie primaire $C_{ep,max}$ en $kWh/(m^2.an)$). Elle intégrait aussi une notion sur le confort d'été (température intérieure de confort T_{ic}). Maintenant, le bâtiment est regardé dans sa globalité avec la prise en compte de la compacité, la

répartition des surfaces vitrées, etc. Les nouvelles exigences intégrées dans la RT2012 par le décret (Décret du 26 octobre 2010, France s.d.) et les différents arrêtés attenants sont les suivantes :

Consommation d'énergie primaire inférieure à 50 kWh/(m².an) en moyenne : Chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage artificiel

Besoin bioclimatique maximum, soit une efficacité énergétique minimale du bâti : Besoins de refroidissement, de chauffage et d'éclairage artificiel

Confort d'été (température intérieure maximale)

Recours obligatoire aux énergies renouvelables

Traitement de l'étanchéité à l'air

Dans le détail de ces calculs, il n'existe à l'heure actuelle pas de prise en compte explicite des transferts hygrothermiques à travers les parois.

2.2. P.E.B.

Dans la même démarche que la France, en région wallonne, la réglementation sur la Performance Energétique des Bâtiments (P.E.B.) est entrée en vigueur en 2008, (Décret du 19 avril 2007, Belgique s.d.). Les exigences sont revues environ tous les deux ans. La P.E.B. donne des niveaux à ne pas dépasser :

Dépense thermique de l'enveloppe du bâtiment (U en W/(m².K))

Degré d'isolation thermique (niveau K (-)) : représente le niveau d'isolation du bâtiment en fonction de sa compacité et de son enveloppe

Consommation d'énergie primaire (niveau E_w (-)) : consommation d'énergie primaire par rapport à une référence

Consommation spécifique (E_{spec} en kWh/(m².an)) : consommation d'énergie primaire sur la surface de plancher chauffé

Ventilation : débit minimal de conception (m³/h) et niveau d'étanchéité à l'air

Surchauffe (S en Kh/an)

Les exigences ne sont pas exactement les mêmes que pour la RT2012 mais elles sont similaires dans leur contenu. Il y a un renforcement des performances de l'enveloppe et des consommations tout en favorisant un confort intérieur.

2.3. Transferts hygrothermiques et réglementations thermiques

Dans aucune de ces réglementations thermiques, ne sont prises en compte les performances hygrothermiques de l'enveloppe du bâtiment. Elles incluent un contrôle de l'environnement intérieur et une maîtrise de l'enveloppe. Les ponts thermiques sont insérés au calcul selon leur type et leur qualité d'isolation.

Les propriétés des matériaux sont considérées dans des conditions hygrothermiques favorables. Elles ne tiennent pas compte de la dégradation possible de la conductivité thermique due à une teneur en eau élevée.

Les risques qui sont liés à ces transferts hygrothermiques ne sont pas intégrés à ces notions. La question se pose alors si cette manière de dimensionner exclut ces risques.

3. Formulation de la problématique

Le contexte actuel montre que les problèmes dus à l'humidité sont une réalité. Une bonne maîtrise des détails architecturaux dans leur conception ainsi que leur exécution en toute conformité sur chantier est essentielle. Or la notion de transferts hygrothermiques est encore peu abordée et de manière assez grossière dans les bureaux d'études. Les réflexes ne sont pas encore établis. Pensons même en amont, au niveau de l'enseignement, ces notions sont encore peu intégrées aux différents cursus. La recherche a pourtant avancé sur ces différents thèmes, mais la maîtrise n'est pas encore complète et souvent complexe. Il existe quelques méthodes simplifiées mais qui sont rarement intégrées. Il est alors intéressant d'avoir une idée de l'impact de ces différents transferts hygrothermiques et de l'évolution des différentes pathologies liées à l'humidité pour les intégrer au processus de conception dans les bureaux d'études.

En parallèle, les exigences de performance de l'enveloppe ne cessent d'augmenter. Créer des bâtiments très hermétiques pour qu'ils soient peu gourmand en énergie peut provoquer des pathologies encore inconnues. La maîtrise est telle que le moindre vice de conception ou d'exécution pourra avoir des conséquences bien plus graves qu'auparavant. Prenons l'exemple d'une fuite dans un pare vapeur pour un bâtiment en légère surpression. Pour un bâtiment où l'enveloppe est peu performante, il existe pleins de défauts d'étanchéité à l'air qui répartiront l'excédent de pression. Alors que pour une enveloppe performante, cet excédent ne demandera qu'à sortir et se concentrera donc dans cette fuite. Or cet air pourra transporter de la vapeur d'eau et créer un désordre. Cet exemple est assez imagé mais le parallèle peut être vite fait avec la notion de pont thermique et leur rupture d'isolation. La maîtrise de la production de vapeur d'eau et de l'enveloppe du bâtiment est essentielle.

Les principes de dimensionnement actuels se concentrent uniquement sur l'aspect thermique de l'enveloppe et le contrôle du climat intérieur pour le confort des occupants. En négligent certains phénomènes, il est possible de manquer certaines problématiques qui peuvent apporter des désordres. Mais c'est à vérifier puisqu'il est aussi possible que ces phénomènes soient effectivement négligeables. Ou qu'en dimensionnant de cette manière, cela règle de manière sous-jacente les problèmes hygrothermiques.

Actuellement, les méthodes de dimensionnements hygrothermiques ne sont pas encore intégrées, ou très peu, par les concepteurs. La question se pose alors de savoir quelles méthodes existent. Puis au travers de leurs contenus et leurs limites, savoir comment les intégrer à une démarche de conception dite classique.

problématique

état de l'art

analyses de cas

intégration

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART

1. Notions de base

Pour cette partie, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) a publié un guide technique (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) dont la plupart des explications ci-dessous sont extraites. Ces définitions sont utilisées par la communauté scientifique et sont retrouvées dans beaucoup de publications. Ce guide en donne une synthèse.

L'étude, objet de ce rapport, concerne les transferts hygrothermiques, il faut définir les propriétés et équations nécessaires pour comprendre ces phénomènes. Les transferts étudiés sont caractérisés par ce qui est transporté : l'air ; au travers de quoi il doit passer : le matériau ; sa manière de faire : les mécanismes de fixation ; et pour finir, son moyen de transport : les équations.

Seront repris ici seuls les phénomènes de transport ayant une réelle importance pour la compréhension des différentes analyses de cas. Il existe d'autres mécanismes de transport, séchage et autres changements de phase dont les équations ne sont pas données ici.

Les notions de thermiques sont un pré requis à l'étude qui va suivre, les notions de transfert de chaleur ne seront pas expliquées ci-dessous.

1.1. L'air humide

Commençons par caractériser ce qui est transporté : l'air. Il est constitué d'un mélange gazeux (Azote, Oxygène, CO₂, ...) mais il contient aussi une part d'eau présente à l'état gazeux. Cette eau est appelée vapeur d'eau. A noter qu'il ne faut pas la confondre avec l'eau liquide en suspension dans l'air (brouillard par exemple). Ci-dessous seront explicitées les différentes grandeurs permettant de caractériser cet air et de comprendre la suite de l'étude.

1.1.1. Pression partielle de la vapeur d'eau

Le guide du CSTB, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009), donne la définition suivante : « Dans le mélange de gaz que constitue l'air humide, la pression partielle de vapeur d'eau p_v , est, par définition, la pression qu'aurait la vapeur d'eau si elle occupait à elle seule tout le volume du mélange. » Cette grandeur est essentielle pour caractériser les transferts de vapeur d'eau.

1.1.2. Pression de vapeur saturante

L'air humide peut arriver à un état de saturation. Cet état est caractérisé par une contenance maximum en vapeur d'eau au-delà de laquelle tout ajout d'eau sous forme gazeuse est impossible. Il y aura condensation ou parfois gel (CSTB, ABELÉ, et al. 2009). Cette saturation peut être définie pour une température donnée par la pression de vapeur saturante p_{sat} . Les équations de la pression de vapeur saturante en fonction de la température sont données par la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) :

$$p_{sat}(T) = 610,5e^{\left(\frac{17,269T}{237,3+T}\right)} \text{ pour } T \geq 0^\circ\text{C} \quad [1.1]$$

$$p_{sat}(T) = 610,5e^{\left(\frac{21,875T}{265,5+T}\right)} \text{ pour } T < 0^\circ\text{C} \quad [1.2]$$

Où p_{sat} : pression de vapeur saturante (Pa)

T : température (°C)

Il est donc possible d'obtenir une pression de vapeur saturante pour chaque température et inversement de trouver la température correspondant à une pression de vapeur saturante.

1.1.3. Humidité absolue

La quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air humide est définie par l'humidité absolue ou humidité volumique de l'air v (kg/m³). C'est la masse volumique de la vapeur d'eau ρ_v et elle vaut, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$v = \frac{m_v}{V} \quad [2]$$

Où m_v : masse de vapeur d'eau (kg)

V : volume de l'échantillon (m³)

1.1.4. Humidité relative

Pour caractériser une ambiance, il est beaucoup plus fréquent d'utiliser l'humidité relative φ (%). Elle permet comparer l'air humide par rapport à son état de saturation. Elle peut être calculée selon deux formules, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$\varphi = 100 \cdot \frac{v}{v_{sat}} \quad [3.1]$$

Où v : humidité absolue (kg/m³)

v_{sat} : humidité absolue de l'air saturé (kg/m³)

$$\varphi = 100 \cdot \frac{p_v}{p_{sat}} \quad [3.2]$$

Où p_v : pression partielle de la vapeur d'eau (Pa)

p_{sat} : pression de vapeur saturante

1.1.5. Condensation – Définition

La condensation caractérise un changement d'état, le passage de l'état gazeux à l'état liquide. En réalité, il s'agit d'un abus de langage. Ce changement d'état est normalement appelé liquéfaction et la condensation définit le passage de l'état gazeux à l'état solide. Ce phénomène n'est pas étudié ici.

Comme expliqué ci-dessus au paragraphe 1.1.2, l'air humide peut arriver à un état de saturation au delà duquel toute eau ajoutée ne peut exister sous la forme de vapeur, elle condense. La condensation est caractérisée par cet état de saturation. A savoir lorsque la pression partielle de la vapeur d'eau vaut la pression de vapeur saturante. C'est-à-dire, pour une humidité relative de 100%. Ou encore, la saturation est définie par la température de rosée (ou point de rosée), $T_{rosée}$ (°C). Il

s'agit de la température la plus basse à laquelle la masse d'air considérée peut descendre sans qu'il n'y ait changement de phase pour une humidité absolue donnée.

1.1.6. Diagramme psychrométrique

Un moyen synthétique de caractériser l'air humide par toutes ces grandeurs se retrouve sur le diagramme de l'air humide, communément appelé diagramme psychrométrique ou encore diagramme de Mollier. En abscisse est reportée la température, en ordonnée l'humidité absolue et sont dessinées les courbes d'humidité relative et les isenthalpiques. Il est donc facile de caractériser une ambiance à partir de ce diagramme et de regarder son évolution.

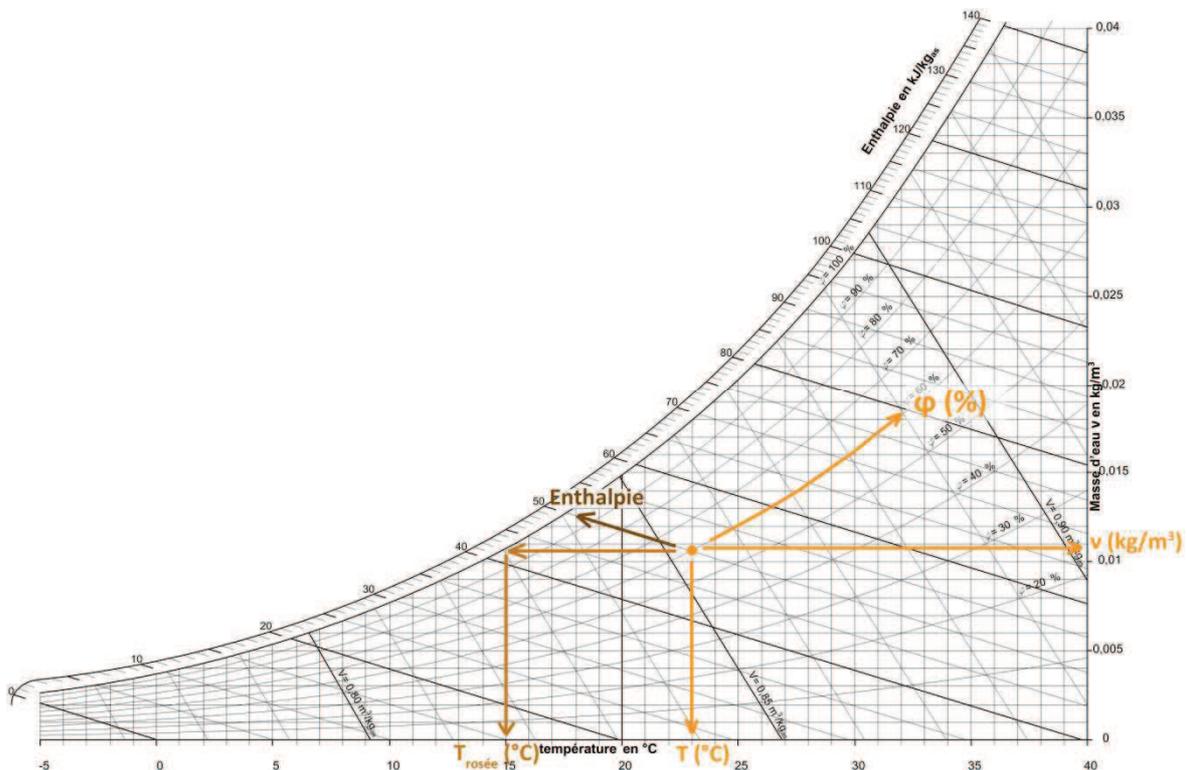


Figure 5 : Diagramme de l'air humide – Extrait (STI 2013) - Annotations en couleur ajoutées par l'auteur

1.2. Porosités des matériaux

Après avoir étudié l'air et son comportement, regardons le matériau : l'élément que l'air doit traverser.

1.2.1. Porosité

Un matériau est dit poreux s'il est composé d'une matrice solide et de vides appelés les pores. La porosité θ (-) d'un matériau est définie comme suit, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$\theta = \frac{V_{vides}}{V_{tot}} \quad [4]$$

Où V_{vides} : volume des vides (m^3)

V_{tot} : volume total (m^3)

Cette définition est assez simplificatrice. Dans (DAÏAN 2010), l'auteur explique que la caractérisation de la porosité dépend de la taille et la répartition des pores, de l'échelle et de la morphologie.

Ici, pour simplifier, il sera important de regarder si les pores sont connectés entre eux ou non, respectivement porosité ouverte et porosité fermée. Les transferts se feront dans les pores qui sont connectés. Propriété traduite par la porosité à saturation θ_{por} (-) qui correspond à la porosité lorsque le matériau est à saturation, à savoir lorsqu'un maximum de vides sont remplis. En général, θ_{por} tend vers 1. En parallèle, la teneur en eau liquide maximale est définie par θ_{eff} (-, porosité efficace) et correspond au maximum d'eau liquide que peuvent contenir les pores.

1.2.2. Teneur en eau

Un matériau peut contenir de l'eau. La quantité d'eau contenue est appelée teneur en eau et définie de plusieurs façons, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009).

Teneur en eau massique u (kg/kg) :

$$u = \frac{m_e}{m_s} \quad [5.1]$$

Où m_e : masse d'eau contenue dans le matériau (kg)

m_s : masse du matériau à l'état sec (kg)

Teneur en eau en masse par volume w (kg/m³) :

Il s'agit du rapport entre la masse d'eau et le volume apparent du matériau sec, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009). Avec la formule précédente :

$$w = \rho_s u \quad [5.2]$$

Où ρ_s : masse volumique du matériau à l'état sec (kg/m³)

u : teneur en eau massique (kg/kg)

Teneur en eau volumique Ψ (m³/m³) :

Appelée aussi fraction volumique, il s'agit du rapport du volume d'eau sur le volume apparent du matériau sec, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009), soit :

$$\Psi = \frac{\rho_s}{\rho_w} u \quad [5.3]$$

Où ρ_s : masse volumique du matériau à l'état sec (kg/m³)

ρ_w : masse volumique de l'eau (kg/m³)

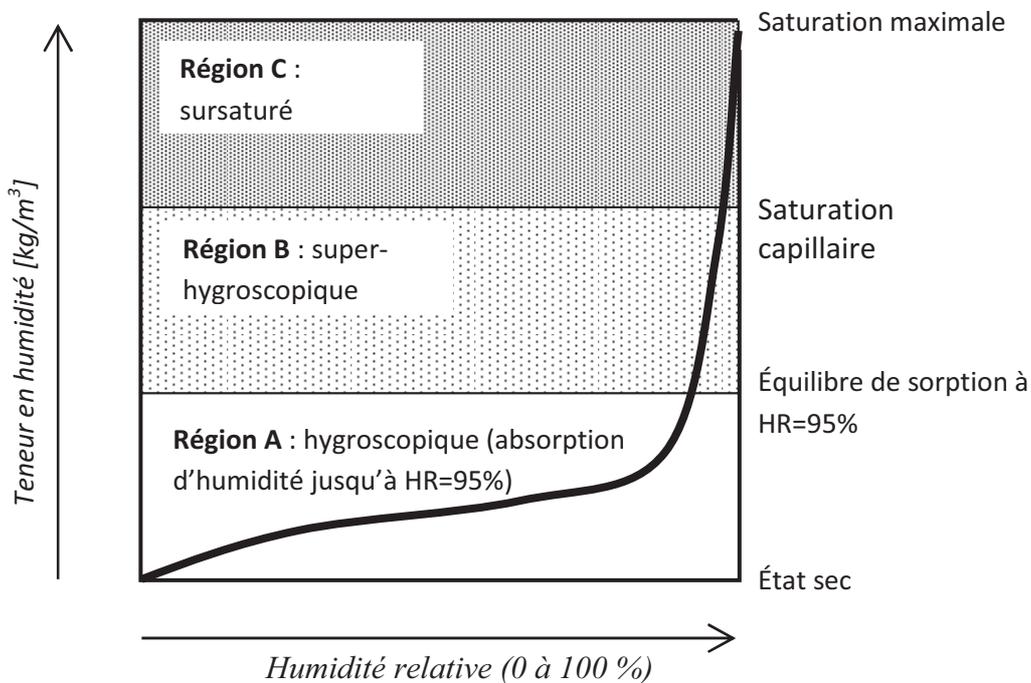
u : teneur en eau massique (kg/kg)

1.2.3. Courbes isothermes de sorption et désorption

Les isothermes de sorption ou de désorption sont les courbes de la teneur en eau w (kg/m³) en fonction de l'humidité relative ϕ (%). La sorption représente la capacité d'absorption d'un matériau.

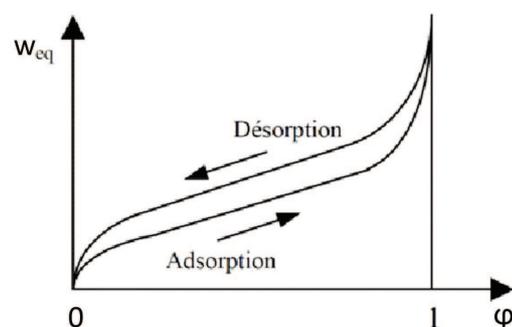
Mme Woloszyn, (M. WOLOSZYN 2010), explique qu'il s'agit de quantifier la capacité de stockage d'humidité en fonction de l'humidité relative ambiante. Ces courbes décrivent des états d'équilibres successifs représentés sur la Figure 6. Elles sont définies pour des matériaux dits hygroscopiques dont les pores ont une taille inférieure à 100nm.

La région A, dite hygroscopique, couvre l'humidité relative jusqu'à environ de 95%. Selon M. Jannot, (JANNOT 2008), « elle est caractéristique de l'action des forces de Van der Waals entre les groupements hydrophiles et les molécules d'eau ». Il s'agit d'un phénomène d'adsorption à la surface des pores. Ensuite vient la région B, dite super-hygroscopique, jusqu'à la saturation capillaire. Dans cette zone, d'après (M. WOLOSZYN 2010), il y a majoritairement de l'eau sous forme liquide dans les pores et le matériau peut alors absorber de l'eau. Pour finir, la région C de sursaturation est rencontrée lorsqu'une pression est appliquée sur le matériau évacuant ainsi la vapeur d'eau restante. Elle n'est rencontrée qu'en laboratoires.



Obtenir ces courbes n'est possible qu'expérimentalement. Pour une courbe de sorption, il faut partir d'un matériau sec et augmenter l'humidité relative jusqu'à la saturation maximale.

Si au contraire l'expérimentation part d'un état saturé en eau vers un état sec, alors il s'agit de la courbe de désorption. Il peut exister une différence entre ces deux courbes appelée hystérésis.



1.2.4. Succion

Une autre manière de caractériser l'humidité dans un matériau est de parler de succion. Il s'agit de la force d'attraction qu'exerce le matériau sur l'eau. Elle est notée s (Pa) et vaut, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$s = p_c - p_o \quad [6.1]$$

Où p_c : pression de l'eau liquide dans un pore, appelée pression capillaire (Pa)

p_o : pression totale ambiante (Pa)

Il est possible de tracer la courbe de succion. C'est, d'après (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) la teneur en humidité à l'équilibre du matériau poreux en fonction de la succion mesurée dans un pore, appelé aussi courbe de rétention d'eau.

Les courbes de sorption et de succion sont liées par la relation de Kelvin :

$$s = \rho_w \frac{RT}{M_v} \ln \varphi \quad [6.2]$$

Où s : succion (Pa)

ρ_w : masse volumique de l'eau (kg/m^3)

R : constante des gaz parfaits, $R=8,3143 \text{ J}/(\text{mol.K})$

T : température (K)

M_v : masse molaire de la vapeur d'eau (kg/mol)

φ : humidité relative (%)

La masse volumique de l'eau est liée à la teneur en eau par la relation [5.3]. Le passage de la sorption à la succion se fait alors à partir de l'équation [6.2] et permet d'obtenir la courbe de succion en fonction de l'humidité relative.

1.2.5. Perméabilité

La perméabilité d'un matériau δ_p ($\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$) caractérise son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Le guide du CSTB, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009), donne la définition qui suit : « dans le cas où le gaz est de la vapeur d'eau, il s'agit du rapport de la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau par unité d'épaisseur, de temps et par unité de différence de pression régnant de part et d'autre du matériau. »

Au plus un matériau sera perméable à la vapeur d'eau, au plus le flux qui pourra traverser sera important. La Figure 8 ci-dessous représente ce phénomène physique.

g_v : flux de vapeur

p_{v1} : pression intérieure

p_{v2} : pression extérieure

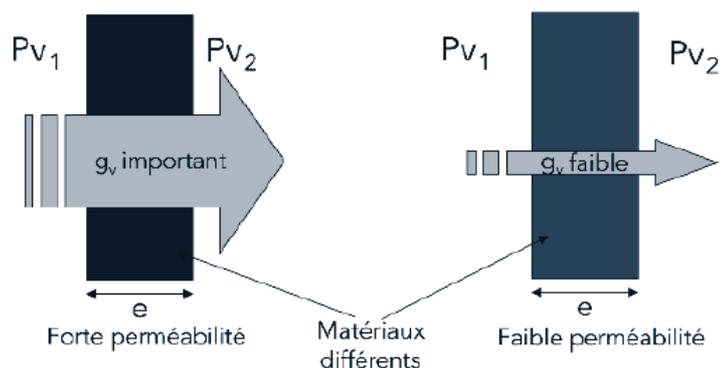


Figure 8 : Perméabilité à la vapeur d'eau - Extrait (CSTB, ABELÉ, et al. 2009)

1.2.6. Perméance et résistance à la diffusion de vapeur d'eau

La perméance W_p (kg/(m².s.Pa)) d'un matériau homogène est défini par, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$W_p = \frac{\delta_p}{e} \quad [7.1]$$

Où δ_p : perméabilité du matériau (kg/(m.s.Pa))

e : épaisseur du matériau (m)

En thermique, le parallèle avec l'électricité est souvent fait. Ici aussi, il est possible de définir la résistance à la diffusion de vapeur d'eau par l'inverse de la perméance. Cette résistance sera notée R_D (m².s.Pa/kg) :

$$R_D = \frac{1}{W_p} = \frac{e}{\delta_p} \quad [7.2]$$

Pour un matériau donné, la perméabilité δ_p (kg/(m.s.Pa)) sera constante. Si l'épaisseur augmente, lors la perméance va diminuer et inversement, la résistance à la diffusion de vapeur d'eau augmente. En conséquence le flux qui traverse l'élément va diminuer.

g_v : flux de vapeur

p_{v1} : pression intérieure

p_{v2} : pression extérieure

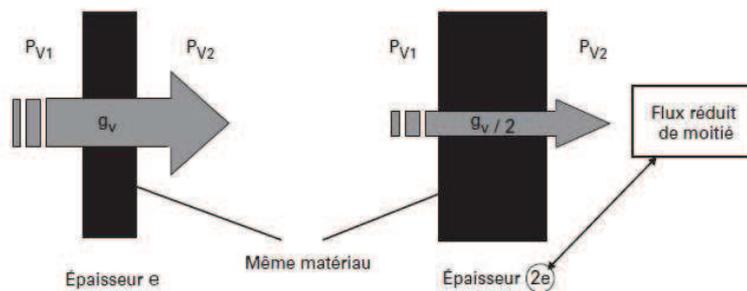


Figure 9 : Perméance à la vapeur d'eau
- Extrait (CSTB, ABELÉ, et al. 2009)

1.2.7. Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau

Le matériau peut aussi être caractérisé par le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau d'un matériau μ (-), (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$\mu = \frac{\delta_0}{\delta_p} \quad [8]$$

Où δ_0 : perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (kg/(m.s.Pa))

δ_p : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (kg/(m.s.Pa))

La perméabilité à la vapeur d'eau de l'air δ_0 (kg/(m.s.Pa)) peut être calculée selon l'équation donnée dans le guide du CSTB, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$\delta_0 = 2.10^{-7} \frac{T^{0,81}}{p_0} \quad [9]$$

Où T : température (K)

p_0 : pression de l'air ambiant (Pa)

1.2.8. Epaisseur d'air équivalente

L'épaisseur d'air équivalente S_d (m) d'une couche de matériau est définie comme la couche d'air ayant la même perméance, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009). Elle peut être calculée comme suit :

$$S_d = \mu e \quad [10.1]$$

Où μ : facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (-)

e : épaisseur du matériau (m)

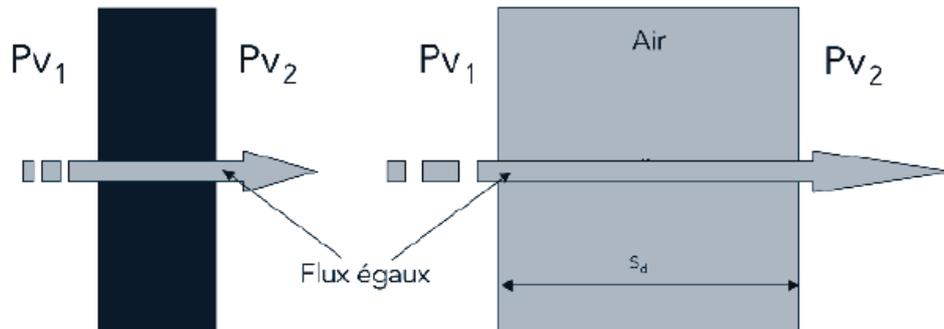


Figure 10 : Epaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur - Extrait (CSTB, ABELÉ, et al. 2009)

En considérant la formule [7.2], l'épaisseur d'air équivalente vaut aussi :

$$S_d = \delta_0 R_D \quad [10.2]$$

Où δ_0 : perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (kg/(m.s.Pa))

R_D : résistance à la diffusion de vapeur (m².s.Pa/kg)

L'épaisseur d'air équivalente est directement proportionnelle à la résistance à la diffusion de vapeur à une température donnée.

1.2.9. Perméabilité liquide et coefficient de transport capillaire

Les transferts en phase liquide et vapeur ne sont pas indépendants et s'influencent. Si la teneur en eau est élevée dans le matériau, alors, d'après (CSTB, ABELÉ, et al. 2009), une propriété du matériau permet de caractériser ce phénomène : c'est la perméabilité liquide K_l (ou conductivité liquide, en kg/(m.s.Pa)) ou le coefficient de transport capillaire D_w (ou diffusivité hydrique, en m²/s), caractéristiques du matériau. Il s'agit en fait du transport d'eau liquide par redistribution et cela fait

référence à la vitesse de propagation d'eau, (COURGEY et MOYA 2012). Ces deux coefficients sont reliés par l'équation suivante :

$$K_l = D_w \frac{\partial w}{\partial s} \quad [11]$$

Où w : teneur en eau en masse par volume (kg/m^3)

s : succion (Pa)

L'absorption d'eau est aussi liée au transport d'eau liquide. Elle est caractérisée par le coefficient A ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$) pour chaque matériau. D'après (COURGEY et MOYA 2012), « elle indique la quantité d'eau (liquide) qu'un matériau peut absorber dans un temps donné. » Pour pouvoir parler de ce coefficient, il faut qu'il y ait un contact avec de l'eau liquide. Ce coefficient de transport capillaire est relié à l'absorption d'eau, mais il n'existe pas de modèle simple.

1.3. Transferts et fixation de l'eau

Maintenant que les propriétés de l'air et des matériaux ont été définies, regardons la manière dont l'air fait pour passer au travers du matériau. L'humidité peut se fixer dans un matériau poreux et hygroscopique selon deux mécanismes présentés succinctement ci-dessous, extrait de (CSTB, ABELÉ, et al. 2009). Ce paragraphe est à rapprocher des définitions de courbe de sorption (§1.2.3), synthèse des phénomènes décrits ci-après.

1.3.1. Mécanismes de fixation

a. Adsorption

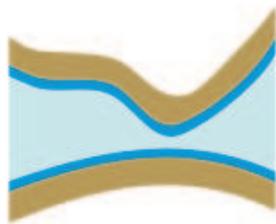
Dans la définition des courbes de sorption (cf. 1.2.3) la première région dite hygroscopique décrit des transferts de vapeur dus aux forces intermoléculaires de Van der Waals. Il s'agit d'un phénomène de surface dit d'adsorption. Les molécules d'eau viennent se fixer sur la surface des pores en une première couche monomoléculaire (humidité relative faible, environ jusqu'à 20%), (CSTB, ABELÉ, et al. 2009). Le physicien Langmuir a développé un modèle d'équation sur ce sujet qui n'est pas repris ici. Puis dans un second temps, il y a fixation de plusieurs couches d'eau sur cette première. Il s'agit alors de l'adsorption plurimoléculaire (jusqu'à l'équilibre de sorption, cf. 1.2.3). C'est alors Brunauer, Emmett et Teller qui ont développé les modèles de ce phénomène.

b. Condensation capillaire

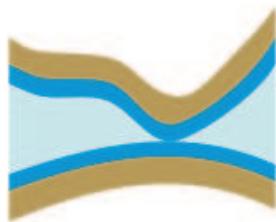
Pour une humidité relative supérieure à 50% (avant l'équilibre de sorption), il peut y avoir des phénomènes de condensation capillaire. Il s'agit en fait, comme l'explique le guide du CSTB, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009), de couches plurimoléculaires (cf. a ci-dessus) qui se rejoignent dans des pores de petite taille, formant un pont liquide. Les deux phases, gazeuse et liquide, sont en équilibre pour un état non saturé (humidité relative inférieure à 100%).

La loi de Kelvin citée au paragraphe 1.2.3 sur les courbes de sorption décrit en réalité cet équilibre.

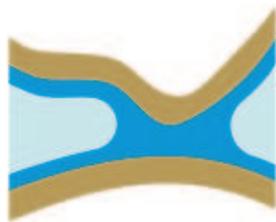
Représentation schématique du mécanisme lorsque l'humidité relative augmente :



1. Pour une faible humidité relative, de l'eau est absorbée par le matériau et forme une fine couche d'eau sur les parois des pores.



2. Lorsque l'humidité relative augmente, l'épaisseur de la couche absorbée augmente. Dans les canaux les plus étroits, les couches se touchent.



3. Lorsque l'humidité relative augmente encore, de la condensation se forme dans les pores les plus étroits du matériau; on dit qu'il y a condensation capillaire. Plus les pores sont étroits, plus la formation de condensation capillaire est rapide.

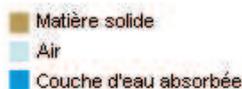


Figure 11 : Teneur en humidité hygroscopique – Extrait (Architecture et Climat 2013)

1.3.2. Transferts d'humidité

c. Vapeur d'eau

Libre parcours moyen

Le libre parcours moyen est une notion employée en cinétique des fluides qui permet de caractériser le déplacement des particules. Il s'agit de la distance parcourue entre deux chocs moléculaires successifs.

Dans la théorie des transferts de vapeur d'eau, cette notion est importante puisqu'elle est liée à la taille des pores. Pour des pores de grand rayon, le libre parcours moyen sera faible. En effet, les molécules auront plus de chance de se rencontrer entre elles que dans un pore de rayon plus faible dans lequel les particules risquent d'aller cogner la paroi avant de rencontrer une autre molécule, augmentant la distance entre deux chocs moléculaires. Il faudra distinguer les transferts de vapeur d'eau dans les pores dont le rayon est inférieur au libre parcours moyen : diffusion moléculaire ; de ceux dont il est supérieur : transport de Knüdsen.

Diffusion moléculaire - Loi de Fick

Pour commencer, les pores ont un rayon supérieur au libre parcours moyen. La diffusion moléculaire est une mise en mouvement due à un gradient de pression ou différence de concentration. Elle peut être représentée par la loi de Fick. Cette loi est exprimée différemment selon les auteurs. Dans le guide du CSTB, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009), une expression est retenue, dans le cas où le gaz est supposé parfait et la pression totale constante :

$$g_v = -D_v \nabla p_v \quad [12]$$

Où g_v : densité de flux de vapeur (kg/(m².s))

p_v : pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

D_v : coefficient de diffusion moléculaire (m²/s)

Le coefficient de diffusion moléculaire D_v dépend de la pression totale et de la température. Il représente le désordre moléculaire. Il peut être calculé de plusieurs manières. Par exemple, dans le cas de grande dilution, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$D_v = \frac{1}{3} l_{pm} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad [13]$$

Où D_v : coefficient de diffusion moléculaire (m²/s)

l_{pm} : libre parcours moyen (m)

R : constante des gaz parfaits, R=8,3143 J/(mol.K)

T : température (K)

M : masse molaire (kg/mol)

Effusion – Transport de Knüdsen

Dans le cas où le rayon des pores est inférieur au libre parcours moyen, il s'agit du même type de transfert mais les chocs entre molécules sont négligeables. Ce sont les chocs avec les parois qui régissent la vitesse des molécules. Il faut alors parler d'effusion.

L'équation de transfert est similaire, donnée par, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$g_k = -D_k \nabla p_v \quad [14.1]$$

Où g_k : densité de flux de vapeur selon Knüdsen (kg/(m².s))

p_v : pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

D_k : coefficient de diffusion moléculaire de Knüdsen (m²/s)

Ici, le coefficient de diffusion moléculaire D_k est proportionnel au rayon du pore, r (m) :

$$D_k = \frac{2}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad [14.2]$$

Où D_k : coefficient de diffusion moléculaire de Knüdsen (m²/s)

R : constante des gaz parfaits, R=8,3143 J/(mol.K)

T : température (K)

M : masse molaire (kg/mol)

Dans la réalité, les deux phénomènes ne sont pas séparés et il y a une combinaison de ces deux équations et il est possible d'écrire, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$g_v = -\delta_p \nabla p_v \quad [15.1]$$

Où g_v : densité de flux de vapeur (kg/(m².s))

p_v : pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

δ_p : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (kg/(m.s.Pa))

Cette équation permet de se rapprocher plus simplement des propriétés du matériau. En considérant l'équation [8], il est en effet possible d'écrire :

$$g_v = -\frac{\delta_0}{\mu} \nabla p_v \quad [15.2]$$

Où δ_0 : perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (kg/(m.s.Pa))

μ : facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (-)

d. Eau liquide – Loi de Darcy

Pour l'eau liquide, l'écoulement se fait aussi à partir d'un gradient de pression mais d'eau liquide cette fois-ci. La loi de Darcy reprend la densité de flux liquide par la loi donnée par (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$g_l = -K_l \nabla p_l \quad [16.1]$$

Où g_l : densité de flux liquide (kg/(m².s))

p_l : pression d'eau liquide (Pa)

K_l : perméabilité liquide (kg/(m.s.Pa))

Cette loi est en fait la loi de Poiseuille donnée à l'échelle macroscopique. Les forces gravitaires sont négligées.

Il est possible de retenir une équation fonction de la teneur en eau en utilisant les définitions citées jusqu'ici. D'après la loi de Laplace utilisée en mécanique des fluides, il est possible d'écrire la pression capillaire p_c (Pa) en fonction de la pression liquide p_l (Pa) :

$$p_c = p_l - p_0$$

Où p_0 : pression de l'air ambiant (Pa), supposée constante

Or dans la définition de la succion s (Pa), cf. 1.2.4, il a été vu que :

$$s = p_c - p_o$$

D'où :

$$p_c = s$$

Il est possible d'écrire :

$$g_l = -K_l \nabla s \quad [16.3]$$

Comme vu au paragraphe 1.2.9 dans les définitions, la perméabilité liquide K_l (kg/(m.s.Pa)) et le coefficient de transport capillaire D_w (m²/s) sont liés par :

$$K_l = D_w \frac{\partial w}{\partial s} \quad [16.4]$$

Où w : teneur en eau en masse par volume (kg/m³)

Finalement, la densité de flux de liquide peut s'écrire de la manière suivante :

$$g_l = -D_w \nabla w \quad [16.5]$$

Où g_l : densité de flux liquide (kg/(m².s))

D_w : coefficient de transport capillaire (m²/s)

w : teneur en eau en masse par volume (kg/m³)

1.4. Equations de transport

Pour finir cette explication sur la physique des phénomènes, il faut regarder les moyens de transport de l'air et de l'eau dans le matériau : les équations. Le schéma ci-dessous (Figure 12) reprend différents transferts qui peuvent opérer dans une paroi. La maîtrise de chacun de ces transferts est actuellement assez bonne. La problématique rencontrée est en réalité le couplage de ces différents phénomènes qui n'ont pas la même constante de temps. En effet, les flux de chaleur sont quasi instantanés alors que les flux de vapeur se déroulent plutôt sur un cycle de type saisonnier.

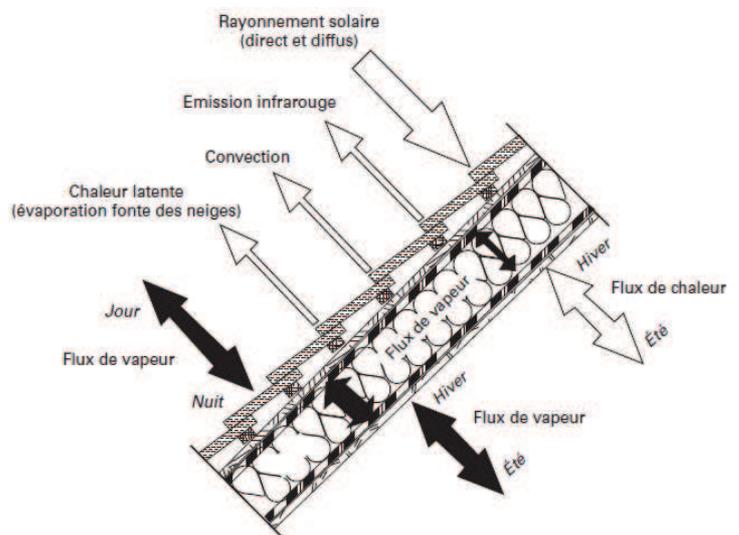


Figure 12 : Effet de la température (blanc) et de l'humidité (noir) et de leurs directions – Extrait (KÜNZEL H. , 2003)

1.4.1. Etablissement des équations

Pour préciser de manière plus complète les mécanismes de transport qui peuvent s'opérer, regardons le Tableau 2. Parmi tous ces transferts, certains peuvent être négligés et seront retenus uniquement : le transport de chaleur par conduction, la chaleur latente d'évaporation (flux d'enthalpie), le transport liquide moléculaire (Knüdsen) et le flux hydraulique.

Mécanisme de transport		Cause et potentiel de transport
transport de chaleur	conduction de chaleur	température
	échanges radiatifs	température à la puissance 4
	flux d'air	pression totale, différentiels de densité
	flux d'enthalpie dus au mouvement d'humidité	diffusion de vapeur avec changement de phase et flux de transport liquide dans le champ de température
transport de vapeur	diffusion de gaz	pression de vapeur (température, pression totale)
	transport moléculaire (effusion)	pression de vapeur
	diffusion en solution	pression de vapeur
	convection	gradient de pression totale
transport liquide	conduction capillaire	force capillaire de succion
	diffusion de surface	humidité relative
	flux du aux infiltrations	gravité
	flux hydraulique	différentiels de pression totale
	électrocinétique	champs électriques
	osmose	concentration d'ions

Tableau 2 : Liste des mécanismes de transport de chaleur et d'humidité, leurs causes et potentiels de transport - Extrait (H. M. KÜNZEL 1995), traduit par l'auteur

a. Chaleur

Par rapport au Tableau 2 ci-dessus, parmi les quatre composantes pour les équations de la chaleur à prendre en compte, seules deux auront une réelle influence. D'après (CSTB, ABELÉ, et al. 2009), il faudra considérer :

- Composante sensible (liée à la température) - La loi de Fourier : la densité de flux de chaleur g_Q (W/m²) est proportionnelle à la conductivité thermique λ (W/(m.K)) et au gradient de température T (K) :

$$\vec{g}_Q = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad [17.1]$$

- Composante latente (liée à l'humidité) - La chaleur transportée par le flux d'humidité. Dans (H. M. KÜNZEL 1995), l'auteur montre que seul le terme lié au changement de phase est non négligeable. A savoir que la chaleur latente vaut la chaleur latente d'évaporation h_e (J/kg) que multiplie la densité de flux de vapeur g_v (kg/(m².s)), soit :

$$q_{lat} = h_e g_v \quad [17.2]$$

Après considération de ces simplifications, cela donne lieu à l'équation de transfert de chaleur suivante :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(h_e \nabla g_v) \quad [17.3]$$

Où H : enthalpie massique (J/m³)

t : temps (s)

λ : conductivité thermique (W/(m.K))

T : température (K)

h_e : chaleur latente d'évaporation (J/kg)

g_v : densité de flux de vapeur (kg/(m².s))

b. Vapeur d'eau et eau liquide

Les transferts d'humidité se font dans les deux phases, liquide et vapeur, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(g_l + g_v) \quad [17.4]$$

Où w : teneur en eau totale, liquide + vapeur (kg/m³)

g_l : densité de flux de liquide (kg/(m².s))

g_v : densité de flux de vapeur (kg/(m².s))

Par rapport au Tableau 2, seuls les transports moléculaires et le flux hydraulique sera considéré. En supposant que le rayon du pore est supérieur au libre parcours moyen, le transport moléculaire se fera par effusion (transport de Knüdsen). A l'aide des équations [16.3] et [15.1], il est alors possible d'écrire :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla(K_l \nabla s + \delta_p \nabla p_v) = \nabla \left(K_l \frac{\partial s}{\partial w} \nabla w + \delta_p \nabla p_v \right) \quad [17.5]$$

Où w : teneur en eau totale, liquide + vapeur (kg/m³)

t : temps (s)

K_l : perméabilité liquide (kg/(m.s.Pa))

s : succion (Pa)

δ_p : perméabilité à la vapeur d'eau du matériau (kg/(m.s.Pa))

p_v : pression partielle de vapeur d'eau (Pa)

c. Couplages

Les couplages entre ces deux types d'équations différentielles sont en général assez complexes à résoudre. Le meilleur moyen pour une résolution en deux dimensions d'un type de paroi composée est un calcul basé sur un maillage. Ce principe s'inspire des calculs aux éléments. Il faut aussi définir

une résolution pour le pas de temps de calcul. Les détails ne seront pas repris ici. Différents outils tels que WUFI ou Delphin permettent d'effectuer ces calculs.

« Un poreux avec les fluides qu'il contient peut être en équilibre ou non. Equilibre s'entend à tout point de vue : mécanique, thermodynamique, thermique, chimique, électrique, avec les relations que cela implique entre les variables d'état. Hors de l'équilibre, le transport, ou les transferts sont potentiellement de toutes ces natures, avec tous les couplages imaginables : filtration, diffusion, thermomigration, osmose, electroosmose, ... », (DAÏAN 2010).

Cette citation pour expliquer que ces notions de base vont servir à établir un vocabulaire commun et comprendre les phénomènes les plus significatifs. Ils ne seront pas tous détaillés. Gardons à l'esprit qu'il existe d'autres enjeux physiques dans ces transferts hygrothermiques. Ils sont plus ou moins pris en compte selon leur influence dans les différentes méthodes de calculs qui vont suivre.

1.4.2. Résolution des équations : Conditions aux limites

Pour la résolution de ces équations différentielles, il faut établir des conditions aux limites. Un exemple seulement est cité dans ce paragraphe.

Pour le flux de vapeur d'eau, il est possible de mettre des conditions limites de type Neuman, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009). A savoir que le flux est imposé et la concentration de vapeur à la frontière de la paroi suit une loi d'échange par transfert convectif du type :

$$g_v = h_m [(\rho_v)_{frontière} - (\rho_v)_{ambiance}] \quad [18.1]$$

Où g_v : densité de flux de vapeur (kg/(m².s))

h_m : coefficient d'échange convectif massique (m/s)

ρ_v : masse volumique de la vapeur (kg/m³)

Ensuite, il est possible d'attribuer des conditions du même type pour les flux de chaleur. Cette condition ne peut pas s'appliquer pour les échanges radiatifs. La loi s'écrit alors :

$$q = h_c (T_{frontière} - T_{ambiance}) \quad [18.2]$$

Où q : densité de flux de chaleur (W/m²)

h_c : coefficient d'échange convectif thermique (W/m².K)

T : température (K ou °C)

Il existe une corrélation entre les coefficients d'échange h_c et h_m pour les fluides libres, (CSTB, ABELÉ, et al. 2009) :

$$h_m = h_c \frac{D_{v0}}{\lambda_{ambient}} \quad [18.3]$$

Où D_{v0} : coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ambiant ($D_{v0} = 2,5.10^{-5}$ m²/s)

2. Cadre réglementaire Différentes réglementations

Dans le référentiel normatif français de la construction et du bâtiment, il existe deux normes consacrées au dimensionnement hygrothermique. Il s'agit des normes NF EN ISO 13788 et NF EN 15026. Elles auront beaucoup d'importance pour la suite de ce travail. Donc leur contenu sera précisé dans les paragraphes qui suivent.

Pour continuer ce tour d'horizon des réglementations, il n'existe pas d'autre norme dont le contenu est dédié à ces problématiques. La norme NF EN ISO 10211 traite des calculs de ponts thermiques dans les bâtiments, des flux thermiques et des températures superficielles. Au travers des températures superficielles, il est possible d'évaluer le risque de condensation superficielle. Cette norme nous servira pour le traitement des ponts thermiques dans les analyses de cas.

En France, la commission de normalisation établit des documents techniques unifiés (DTU). Ce sont des documents applicables dans le cadre de la construction au même titre que les normes. Ils contiennent entre autre des règles de mise en œuvre et de calcul.

Dans le NF DTU 20.1 sur les travaux de bâtiments, ouvrages en maçonnerie de petits éléments (parois et murs), se trouvent des règles pour éviter la condensation interne à la paroi dans le cas d'isolation par l'intérieur. Il s'agit d'une technique constructive spécifique mais très représentée dans le parc immobilier français. Le DTU précise que cette configuration de paroi amène forcément à de la condensation interne. Mais la maçonnerie peut absorber ce trop plein si certaines conditions sont respectées. A savoir, des règles de bonnes pratiques qui donnent des spécifications sur les résistances thermiques et de diffusion de la vapeur. Prenons pour exemple un cas concret assez commun dans le bâtiment. Il s'agit d'un mur maçonné de 15cm d'épaisseur par des blocs de béton. Ce mur est isolé par 10cm de mousse de polyuréthane à l'intérieur. La finition est faite en plaques de plâtre cartonées de 1cm d'épaisseur. Dans les calculs qui suivront, il n'est pas admis de prendre en compte la mise en place d'un pare vapeur. Il n'en a donc pas été défini ici. En pratique, il y en aura très certainement un et il est tout à fait critiquable de ne pas le prendre en compte puisqu'il joue un rôle essentiel dans les transferts de vapeur d'eau. Les différentes propriétés et notations sont reprises dans le Tableau 3 ci-dessous.

	indice	épaisseur e(cm)	conductivité thermique λ (W/(m.K))	résistance thermique R_{th} (m ² .K/W)	résistance à la diffusion de vapeur R_D (m ² .h.mmHg/g)
maçonnerie	M	15	2,1	0,07	
isolant	I	10	0,038	2,63	50
plâtre	P	1	0,2	0,05	1

Tableau 3 : Propriétés des matériaux

Le DTU 20.1 dit qu'il faut respecter $3. R_{th,M} > R_{th,I} + R_{th,P}$ pour éviter tout risque de condensation. Cette règle est empirique, il n'y a pas à priori de rapport direct entre la résistance thermique et la résistance à la diffusion de vapeur d'eau. L'idée est de dire que si la maçonnerie a une forte résistance thermique, le gradient thermique y sera plus important et la température à l'interface s'éloignera suffisamment de la température de rosée (cf Figure 13). Si cette condition n'est pas respectée, il faut alors soit limiter le flux de vapeur d'eau, soit évacuer l'eau dans les cas où c'est

possible (lame d'air). Le risque étant le gel de cette eau en hiver qui peut faire des dégâts lorsqu'elle fond. Ici, il n'y a pas de lame d'air. Il faut limiter le flux de vapeur d'eau en respectant les conditions suivantes :

$$\text{si } R_{th,M} < 0,086 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \text{ alors } \frac{1}{R_{D,P} + R_{D,I}} < 0,06 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$$

Ici $R_{th,M} = 0,07 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ et $\frac{1}{R_{D,P} + R_{D,I}} = 0,02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$ donc les conditions sont bien validées.

Dans les zones très froides, il faut vérifier $\frac{1}{R_{D,P} + R_{D,I}} = 0,015 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$, ce qui n'est en revanche pas vérifié ici.

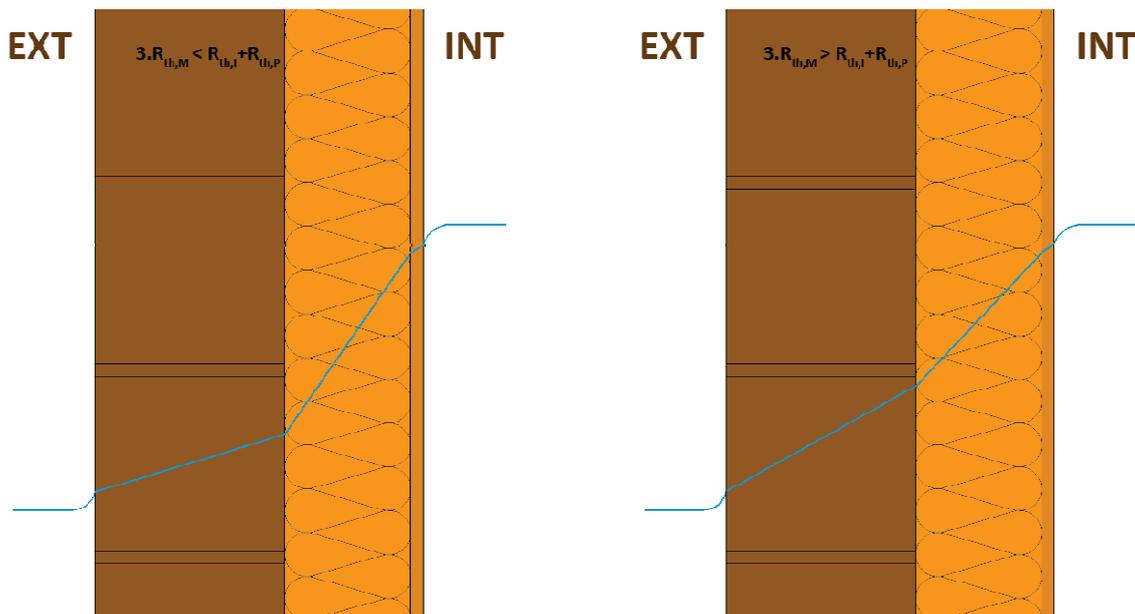


Figure 13 : Profils de température - Comparaison entre deux maçonneries

Par un rapide calcul, il est facile de comprendre pourquoi malgré la condensation existante dans les parois, celle-ci est considérée comme acceptable avec ces systèmes constructifs. Cela justifie le fait qu'actuellement, le retour d'expérience sur l'isolation par l'intérieur dans le parc immobilier français n'est pas si mauvais par rapport aux problèmes de condensation interne. Mais ces règles vont devenir désuètes avec l'emploi des techniques constructives telles que l'ossature bois et de matériaux tels que les biosourcés, dans les bâtiments à haute performance énergétique.

Le DTU 22.1 sur les murs extérieurs en panneaux préfabriqués de grandes dimensions reprend ces mêmes exigences. La question se pose alors de savoir s'il est possible de généraliser cela à tous les systèmes constructifs ou si le raccourci fait dans ce document est trop rapide.

Concernant les constructions en ossature bois, le document NF DTU 31.2 P1-1 donne des indications très vagues sur les problèmes de condensation. Il est demandé que la conception évite tout risque dommageable dû à l'humidité. Mais il n'y a pas d'indicateurs précis.

Pour continuer dans les différents systèmes constructifs, il existe un DTU sur les façades rideaux, NF DTU 33.1 P1-1. Dans celui-ci, il y a quelques préconisations sur les risques de condensation. Il s'agit d'un sujet très complexe et les phénomènes convectifs sont encore peu maîtrisés. Ce sujet ne sera donc pas abordé par la suite.

Les propriétés des matériaux sont importantes pour ces notions de transferts hygrothermiques. En termes de normalisation, il n'existe pas de préconisations à proprement parlé pour éviter un risque de condensation dans la définition même des matériaux. Mais il est possible de définir des quantités de condensat que le matériau peut accepter. Le CSTB a publié par exemple un guide technique sur les isolants à base de fibres végétales ou animales (CSTB, Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Technique : Isolants à base de fibres végétales ou animales - Produits isolants destinés à l'isolation thermique par l'intérieur 2012). Ce cahier explique qu'il faudra regarder le comportement à la vapeur d'eau des matériaux pour leur durabilité. Il renvoie alors aux avis techniques spécifiques à chaque matériau et à la notion de perméance.

A propos du béton armé, parmi les matériaux les plus fréquents à l'heure actuelle dans le bâtiment, sa porosité favorise les transferts hygrothermiques. Les pathologies dues à la carbonatation, la corrosion des aciers, au gel, etc. proviennent de transferts d'humidité, donc des transferts hygrothermiques, ce qui souligne leur importance. Ces pathologies ne seront pas abordées ici. A noter seulement que les règles BAEL 91 (DTU P18-702) qui sont les règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, préconisent de protéger les armatures avec un enrobage suffisant pour éviter tout risque vis-à-vis de la condensation de la paroi ou en cas de fissuration.

Pour finir sur le tour d'horizon des normes, il est possible d'étudier la maîtrise des conditions hygrothermiques d'un local. Il s'agit par exemple de la norme NF EN 15251 parle des critères d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique. Ou encore la norme NF EN ISO 13791 sur la performance thermique des bâtiments donne les moyens de calculer l'humidité intérieure pour éviter la condensation. Mais l'axe de travail pour cette analyse va se concentrer sur la conception de l'enveloppe.

Pour conclure sur ce petit état de l'art sur les réglementations, il faut retenir que deux normes assez récentes existent pour le dimensionnement vis-à-vis des transferts hygrothermiques, les normes (NF EN ISO 13788 s.d.) et (NF EN 15026 s.d.). Il existe quelques préconisations pour certains types constructifs : ouvrages maçonnés, murs en panneaux préfabriqués, façades rideaux. Mais à l'heure actuelle, les notions de thermique et de ventilation sont bien mieux abordées et bien plus réglementées que les transferts hygriques.

2.2. Normes de dimensionnement vis-à-vis du risque hygrothermique

Les normes ci-dessous s'appliquent pour toutes les techniques constructives, du moment que les propriétés des matériaux sont connues. Les différentes méthodes de calculs seront explicitées par la suite.

2.2.1. NF EN ISO 13788

La norme (NF EN ISO 13788 s.d.) a été mise à jour en avril 2013 pendant la rédaction de ce rapport. Cette mise à jour n'apporte pas de modification significative pour ce travail. Elle propose deux méthodes de calcul simplifié afin de détecter le risque de condensation superficielle et de condensation interne due à la vapeur d'eau. Il s'agit de méthodes statiques qui seront détaillées par la suite. C'est une norme européenne qui fait suite à la norme britannique (BS 5250:2002 s.d.) et à la norme allemande (DIN 4108-3). La société suisse des ingénieurs et des architectes en suisse a aussi une norme contenant les mêmes informations. Il s'agit de la norme (SIA180). Cette norme est actuellement en projet de remaniement afin de la compléter pour en faire un réel outil de dimensionnement vis-à-vis du confort, de la qualité de l'air, de l'étanchéité à l'air, de l'enveloppe thermique et des problèmes d'humidité.

La première méthode de calcul vis-à-vis du risque de condensation superficielle détecte en réalité la formation de moisissure. Il s'agit de regarder si l'humidité relative ne dépasse pas les 80% pendant un certain temps. C'est en corrélation avec l'hypothèse prise au paragraphe.... Ce paramètre n'est pas précisé mais une explication sera donnée lors du détail de la méthode. Pour caractériser ce risque, au lieu de passer par l'humidité relative, la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) passera par le facteur de température superficielle, f_{RSi} (-). Ce facteur contient une notion de qualité d'isolation qui permet plus de calculs que la simple humidité relative.

Pour ce qui est du calcul de la condensation interne, il s'agit de la méthode bien connue de type Glaser. Il est possible de détecter un risque et s'il existe de déterminer la quantité de condensat accumulée au sein de la paroi.

Comme il s'agit de méthodes simplifiées, il ne faut pas oublier les hypothèses de calcul associées qui seront détaillées ci-après.

2.2.2. NF EN15026

La norme (NF EN 15026 s.d.) permet de normaliser les calculs de transferts hygrothermiques en régime transitoire. Elle contient les équations de transfert non stationnaire de chaleur et d'humidité à travers les structures des bâtiments (AFNOR 2013). C'est un outil de normalisation des simulations numériques. Il y a aussi des tolérances de calculs.

Les méthodes de calcul visent aux mêmes résultats que la norme (NF EN ISO 13788 s.d.), à savoir détecter les risques de condensation superficielle et internes. Mais de manière plus précise en remettant le bâtiment dans son contexte environnemental. Les hypothèses seront bien plus fines et les calculs à priori plus justes. En traitant les données de sortie, il est possible de travailler sur les dégradations mais aussi d'aller plus loin sur les consommations d'énergie.

Dans les données de sorties, seront exploités pour les études de cas, la teneur en eau totale des différentes parois, l'humidité relative de surface et interne, le taux de condensat ainsi que la fraction volumique. Il y a beaucoup d'autres données qui peuvent sortir comme les profils de température mais elles ne seront pas utiles à cette analyse.

Il y a cependant des limites à ces calculs. Les principales hypothèses de calculs sont qu'il ne peut pas y avoir de la convection par des trous et fissures, ni d'effets bidimensionnels jouant un rôle important. Les calculs ne peuvent pas non plus s'appliquer lorsque des forces hydrauliques, osmotiques, électrophorétiques sont présentes, ni lorsque les températures quotidiennes moyennes du composant dépassent 50°C.

3. Indicateurs – Synthèse

Grâce à cet état de l'art, il est possible de synthétiser les risques liés à l'humidité par quatre indicateurs. Ils sont repris dans le Tableau 4 ci-dessous.

Le premier est le facteur de température superficielle qui se charge du risque de moisissures en superficie. L'environnement à la surface des parois intérieures ne doit pas être favorable au développement des moisissures qui pourront s'avérer dangereuses pour la santé. L'humidité relative ne doit pas être trop élevée (>80%) pendant un certain temps (5 jours). La composante temps a ici toute son importance. Ce critère est parfois sécuritaire vis-à-vis des matériaux mis en œuvre.

Le deuxième facteur est la quantité de condensat. Elle est calculée dès que l'humidité relative atteint la saturation et sera surveillée dans toute la structure. Il s'agit en fait de l'excédent d'eau liquide qui se trouve dans la structure par rapport à son état d'équilibre. Cette quantité pourra être comparée aux critères fixés par le projet de norme suisse (SIA180 2012). Il aurait été envisageable de regarder le critère du dépassement des 80% pendant 5 jours aux interfaces. Mais il n'y a à l'heure actuelle aucune validation scientifique de cette proposition. Le développement des moisissures à ces endroits est encore mal connu ainsi que ses conséquences. Les limites ne sont peut-être plus les mêmes. De plus, il faudrait savoir si ces moisissures dégradent les matériaux et si elles peuvent avoir des conséquences sur la santé. Parce que si la paroi est hermétique au transfert de ces moisissures, il est probable qu'elles ne parviennent pas dans l'environnement intérieur et n'entrave alors pas la santé. Aucun document sur ce sujet précis n'a été trouvé. C'est une question pour l'avenir qu'il sera intéressant de régler.

Le troisième indicateur est la résistance thermique. Elle varie dans le temps en fonction de l'humidité et de la température. La variation est la suivante : la conductivité thermique diminue si la température diminue ou si l'humidité relative diminue, donc l'isolant gagne en performance. En regardant les courbes données par le logiciel WUFI, il apparaît rapidement que les variations de la conductivité thermique avec la température ont moins d'amplitude que les variations avec l'humidité. Le logiciel Delphin simplifie le problème en négligeant complètement ces variations. Dans le cadre de cette étude, pour se placer du côté défavorable et pour tenir compte de ces remarques, les variations de la conductivité thermique avec la température seront négligées. La résistance thermique sera calculée par des valeurs moyennes sur chaque tranche du maillage qui sera effectué sur la paroi. Pour comparer les différentes études de cas et fixer un critère, la résistance thermique calculée de cette façon sera comparée à la résistance thermique calculée dans le cadre des calculs thermiques simples et statiques. Il y aura des pertes en efficacité dues à la charge en eau à l'intérieur de la paroi. Une limite de 10% de pertes maximum tolérée est fixée arbitrairement comme critère. Cette limite pourrait être affinée par les thermiciens. Elle a été fixée après quelques essais de calcul. Une perte minimum de 2% était toujours remarquée avec une dégradation systématique en hiver.

Pour comparer les différents cas entre eux, la limite a été fixée sur le cas de l'isolation par l'intérieur avec mise en place du pare vapeur (cas 4, paragraphe...), pratique la plus courante en isolation par l'intérieur. Les pertes maximum se situant aux alentours des 9%, une petite marge a été prise et la limite fixée à 10%.

Enfin, le quatrième et dernier indicateur est la teneur en eau totale. Elle variera dans le temps. Il sera alors intéressant de regarder si globalement la structure a tendance à se charger en eau par rapport à sa situation initiale ou au contraire à sécher. Proclima a développé un critère à ce sujet, dans (pro clima 2013). Il s'agit du potentiel de prévention des dégâts au bâtiment. Il permet de prévoir si en cas d'apport imprévu d'humidité (fuite, ...) la structure peut se décharger de ce surplus. Les auteurs regardent alors la vitesse avec laquelle la teneur en eau diminue et estiment alors s'il existe un potentiel de prévention des dégâts. Il s'agit d'un manuel commercial et même si les études menées paraissent logiques et cohérentes, elles n'ont pas encore été validées par la communauté scientifique. Dans cette optique, il est difficile de prendre ce critère dans le cadre de cette analyse. Le critère retenu finalement est de regarder si la teneur en eau a tendance à augmenter ou diminuer par rapport à sa situation initiale. Il faut qu'elle diminue pour valider ce critère (séchage). Si elle stagne dans le temps, il s'agira d'une situation limite qui devra être étudiée plus précisément.

Indicateurs	Contenu	Critère à respecter	Limites physiques	Limites d'utilisation
Facteur de température superficielle, f_{RSi} (-)	Risque de formation de moisissures en superficie L'humidité relative en surface doit être inférieure à 80% pendant 5 jours.	$f_{RSi,bât}$ doit être supérieur au $f_{RSi,min}$ calculé à partir des conditions climatiques	Moyennes mensuelles Utilisation de marges pour les calculs Dépendance des matériaux pas prise en compte	Calcul valable lorsque $T_{ext} < T_{int}$ Le calcul n'est pas simple en dynamique, il vaut mieux regarder directement les courbes d'évolution de l'humidité relative.
Quantité de condensat, w_c (kg/m ²)	Teneur en eau liquide accumulée	(SIA180), selon les matériaux, elle doit être inférieure à : 1% du volume de la couche d'isolant 3% de la masse de bois ou du matériau ligneux 800g/m ² du matériau avec capacité de transport capillaire. Dans tous les cas, elle doit s'annuler sur une année.	Calcul statique basé sur des moyennes mensuelles avec des marges et seulement aux interfaces entre deux matériaux. Calcul dynamique plus fiable mais hypothèses du modèle à prendre en compte.	Critère fixé assez grossièrement. Ne prend pas en compte les matériaux biosourcés.
Résistance thermique, R_{th} (m ² .K/W)	Calcul de la résistance thermique dans le temps et comparaison au calcul par les méthodes statiques	Les pertes de résistance ne doivent pas dépasser 10% par rapport au calcul statique	Valeurs moyennées sur des tranches d'isolant (dépend du maillage). Néglige les variations avec la température. Pas de calcul possible avec les méthodes statiques simplifiées.	Assez fastidieux Dépend des conditions initiales, en particulier de l'humidité relative donnant la valeur pour le calcul statique thermique.
Teneur en eau totale, w_{tot} (kg/m ³)	Masse d'eau liquide et vapeur Permet de voir le comportement global de la structure	La valeur moyenne est plus faible par rapport à la situation initiale.	Critère n'a pas encore été validé par la communauté scientifique. Pas de calcul possible avec les méthodes statiques simplifiées.	Limites très grossières.

Tableau 4 : Synthèse des indicateurs

4. Méthodes de calcul et Outils

4.1. Les différentes méthodes de calculs

Pour calculer les indicateurs précités, il existe différentes méthodes de calcul. Il faut regarder s'il s'agit de condensation superficielle ou interne et ensuite le régime employé, statique ou dynamique. Globalement, il est possible de réduire ces méthodes au nombre de trois qui sont comparées dans le Tableau 5 ci-dessous. La première méthode concerne le calcul du facteur de température superficielle, f_{RSi} . Cette méthode est singulière puisqu'elle ne peut calculer que cet indicateur. Les méthodes de caractérisation de la condensation interne en régime statique sont dites des méthodes de type Glaser. Il existe de nombreux outils pour effectuer ce calcul. Pour finir, les méthodes de simulation numérique selon la norme (NF EN 15026 s.d.) représentent une catégorie : la simulation dynamique. Les différentes méthodes sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

A noter que la condensation superficielle est en réalité un abus de langage pour parler du risque de formation de moisissures.

	Calcul f_{RSi}	Méthode type Glaser	Simulation dynamique selon EN 15026
Condensation superficielle	x		x
Condensation interne		x	x
Statique	x	x	
Dynamique			x
1D	x	x	x
2D	x		x
Données météo nécessaires	$T_{ext}, T_{int}, \varphi_{ext}, \varphi_{int}$	$T_{ext}, T_{int}, \varphi_{ext}, \varphi_{int}$	$T_{ext}, T_{int}, \varphi_{ext}, \varphi_{int}$, vent (direction et vitesse), rayonnement (direct et diffus), précipitations, couverture nuageuse
Données matériaux nécessaires	R_{th} (calcul 1D) T_{si} (calcul 2D)	λ, e, μ	$\lambda, e, \mu, \rho, C_p$, porosité, diverses fonctions telles que la sorption, succion, ...

Tableau 5 : Comparatif des méthodes de calcul

4.1.1. Conditions hygrothermiques

Pour les conditions extérieures, les données sont extraites du logiciel suisse Meteonorm dans les études qui vont suivre. Connaissant la température extérieure T_{ext} et l'humidité relative φ_{ext} (%), il est alors possible d'obtenir la pression de vapeur saturante de l'air extérieur $p_{sat}(T_{ext})$ avec l'équation [1.1] ou [1.2] puis la pression partielle de la vapeur d'eau de l'air extérieur $p_{v,ext}$ à l'aide de l'équation [3.2].

Concernant les conditions intérieures, elles seront déterminées selon l'usage du bâtiment. Les données seront directement connues si les conditions hygrothermiques sont contrôlées. Autrement, il sera possible de les calculer à partir de la classe du bâtiment. Une marge de sécurité est ajoutée de 5% pour l'humidité relative intérieure.

La température intérieure T_{int} (°C) peut être déterminée soit par calcul soit sur base d'hypothèses en fonction du type d'occupation. Si elle est calculée, alors il faut prendre en compte le type de local, son orientation, la composition des systèmes et parois mais aussi l'occupation et les gains internes à l'aide du logiciel TRNSYS par exemple. Ce type de calcul est assez lourd à faire. Il faudra aussi se méfier car certains logiciels qui font ce calcul parlent de température ressentie et non de température d'air.

Pour l'humidité relative intérieure φ_{int} (%), elle peut être calculée selon l'usage du bâtiment. La norme (NF EN ISO 13788 s.d.) fournit le graphique de la variation des classes d'humidité intérieure en fonction de la température extérieure T_{ext} (°C). La variation est donnée soit en pression de vapeur intérieure Δp (Pa) soit en humidité absolue Δv (kg/m³). Afin de se situer dans le cas le plus défavorable, il faut prendre la limite supérieure de la courbe. Il faut alors partir de la pression de vapeur extérieure $p_{v,ext}$ (Pa) et calculer la pression de vapeur intérieure $p_{v,int}$ (Pa) selon la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) :

$$p_{v,int} = p_{v,ext} + 1,1 \cdot \Delta p \quad [19.1]$$

Ou en humidité absolue :

$$v_{int} = v_{ext} + 1,1 \cdot \Delta v \quad [19.2]$$

La marge de sécurité de 5% est ici intégrée grâce au coefficient 1,1.

Pour obtenir l'humidité relative intérieure, il est alors possible d'effectuer le même type de calcul que précédemment à l'aide des équations [1.1] ou [1.2] et [3.2].

Les classes sont définies par la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) par le Tableau 6 ci-dessous.

Classe d'hygrothermie	Bâtiment
1	Zones de stockage
2	Bureaux, commerces
3	Logements à faible taux d'occupation
4	Logements à fort taux d'occupation, gymnases, cuisines, cantines ; Bâtiments chauffés par des appareils de chauffage au gaz sans cheminée
5	Bâtiment spécial, par exemple : laverie, brasserie, piscine

Tableau 6 : Classe d'hygrométries intérieures - Extrait norme (NF EN ISO 13788 s.d.)

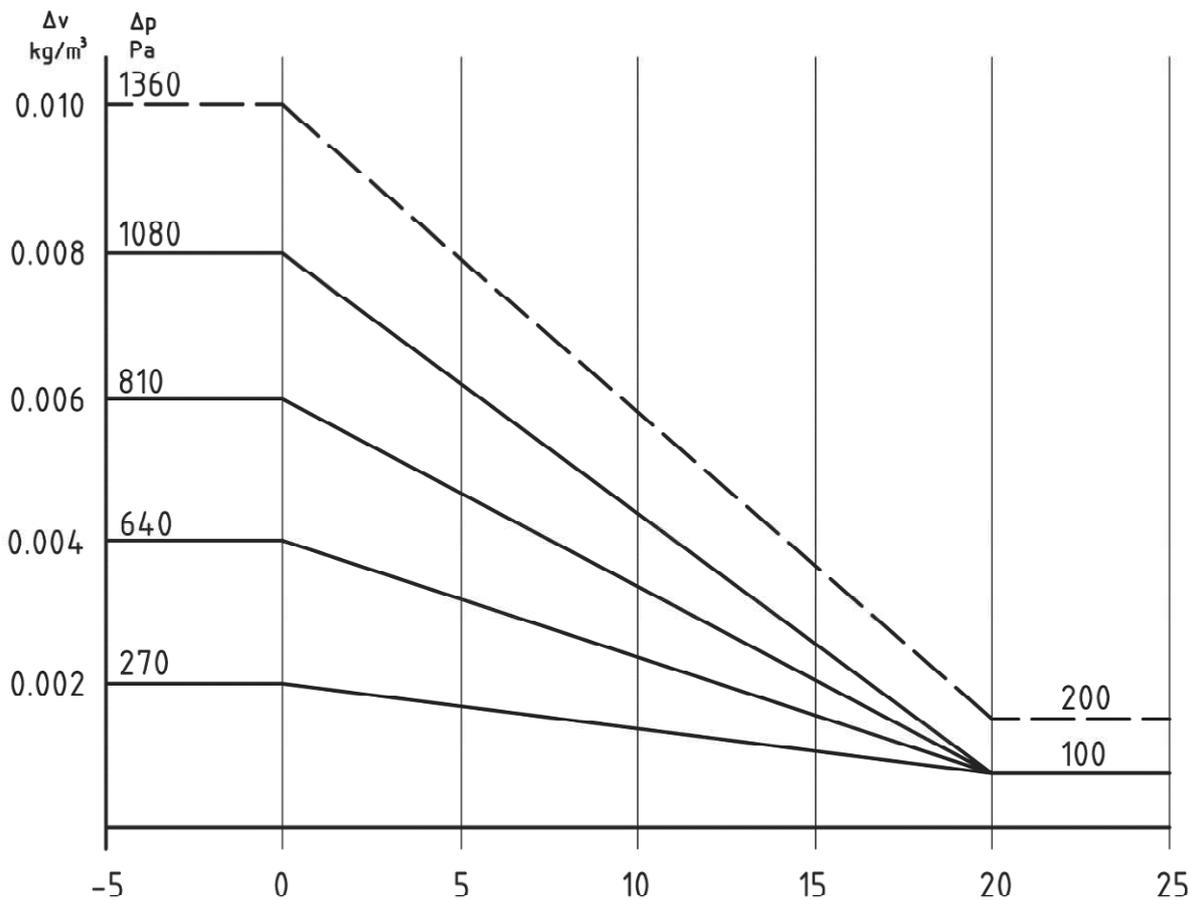


Figure 14: Variation de la classe d'humidité en fonction de la température extérieure - Extrait norme (NF EN ISO 13788 s.d.)

4.1.2. Calcul du fRSi

a. Risque de formation de moisissures

Dans un premier temps, il faut étudier la surface intérieure des parois du bâtiment.

Dans une situation hivernale, la température extérieure est très faible et le volume intérieur est chauffé. Les parois de bâtiment jouent le rôle de barrière entre ces deux ambiances. Plusieurs phénomènes sont alors mis en jeu. Il y a principalement de la conduction au sein de la paroi décrit par la loi de Fourier (cf. équation [17.1]). En fonction de la conductivité thermique, le flux de chaleur transmis sera plus ou moins important. A cela vient s'ajouter les phénomènes convectifs aux surfaces de paroi, l'inertie thermique, etc. La température sur la surface intérieure de la paroi n'est souvent pas égale à la température de l'air intérieur. En général, elle est plus faible. Si cette température est trop faible, au contact de l'ambiance intérieure, elle peut atteindre le point de rosée. Il y aura alors formation de condensation. C'est le même phénomène qui se produit lorsque l'été, de la condensation se forme sur la surface extérieure d'un verre rempli d'eau très froide.

La condensation superficielle n'est pas dangereuse en soi, ce qui est important de regarder c'est le risque de formation de moisissures. A savoir, une exposition à plus de 80% d'humidité relative pendant 5 jours consécutifs au moins. La variable du temps n'est pas réellement prise en compte ici. L'indicateur de formation de moisissure est donc le suivant : si l'humidité relative moyenne

mensuelle sur la surface de la paroi intérieure est supérieure à 80% alors il y a un risque. La finesse de cet indicateur peut poser problème. En effet, comme vu par M. Sedlbauer, (SEDLBAUER et KRUS 2003), il peut arriver formation de moisissures avec de courts épisodes d'exposition à une forte humidité relative. Ces cas ne seront peut-être pas détectés par cette méthode. D'autre part, pour certains matériaux, ce critère est presque trop sécuritaire.

Pour détecter un risque de formation de moisissures, il faut comparer la température superficielle intérieure T_{Si} à la température de même humidité absolue mais pour 80% d'humidité relative, notée $T_{Si,min}$.

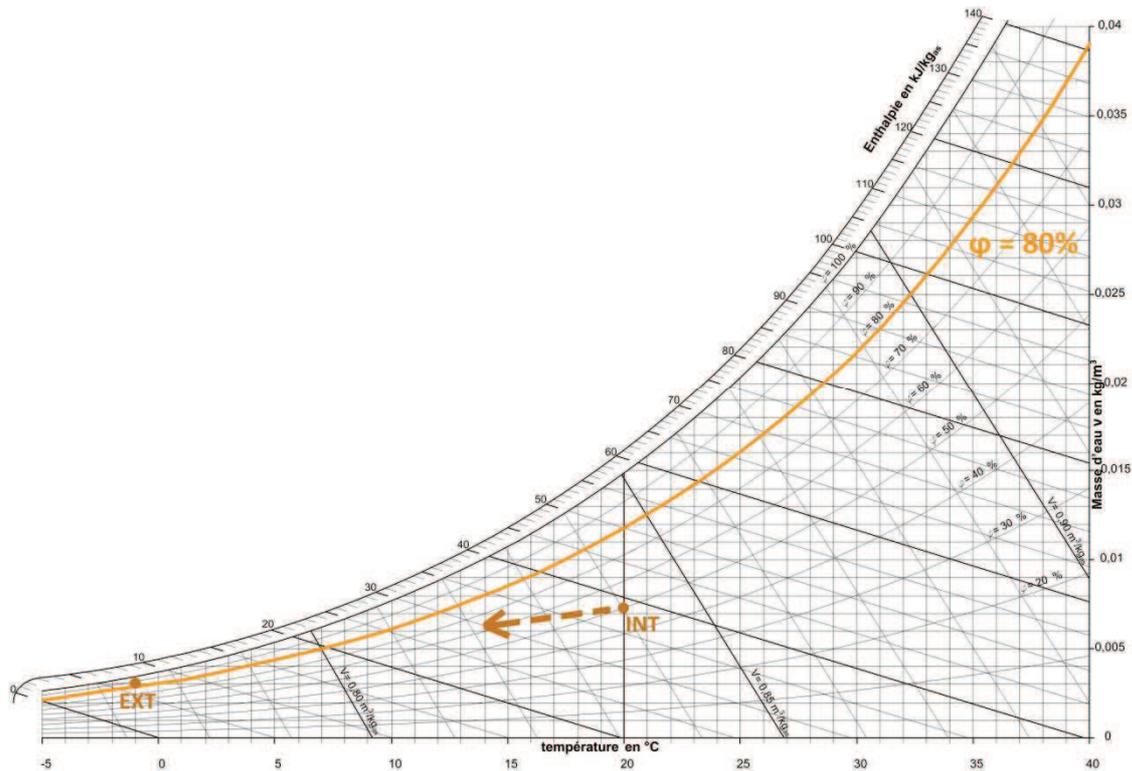


Figure 15 : Illustration du risque de condensation superficielle et de formation de moisissures– Extrait (STI 2013) - Annotations en couleur ajoutées par l'auteur

La norme (NF EN ISO 13788 s.d.) utilise le facteur de température superficielle f_{RSi} (-) pour détecter ce risque. Ce facteur définit selon (ROULET 2010) le niveau d'isolation. Il est compris entre 0 et 1. S'il est nul, alors il n'y a pas d'isolation thermique. Au plus il augmente, au mieux le local est isolé. Une isolation parfaite correspond alors à 1 et la température superficielle est donc considérée comme égale à la température intérieure. Par définition, d'après (ROULET 2010), (SIA180) et (NF EN ISO 13788 s.d.), il vaut :

$$f_{RSi} = \frac{T_{Si} - T_{ext}}{T_{int} - T_{ext}} \quad [20.1]$$

Où T_{Si} : température superficielle intérieure (°C)

T_{ext} : température extérieure (°C)

T_{int} : température intérieure (°C)

Comme ce facteur qualifie le niveau d'isolation, il peut aussi être calculé en fonction des propriétés thermiques de la paroi, pour les éléments plats, selon la formule donnée par la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) :

$$f_{R_{Si}} = \frac{R_{th} - R_{Si}}{R_{th}} \quad [20.2]$$

Où R_{th} : résistance thermique de la paroi ($m^2.K/W$)

R_{Si} : résistance superficielle intérieure de la paroi, $R_{Si} = 0,25 m^2.K/W$; sauf pour les vitres et encadrements $R_{Si} = 0,13 m^2.K/W$

Pour les nœuds constructifs, cette formule [20.2] n'est pas d'application. Il faudra faire un calcul en deux dimensions pour obtenir les isothermes qui donneront la température superficielle puis le $f_{R_{Si}}$ grâce à l'équation [20.1].

La démarche pour détecter le risque de formation de moisissure consiste alors à déterminer une valeur minimale acceptable pour le facteur $f_{R_{Si,min}}$, calculée à partir des conditions hygrothermiques des ambiances intérieures et extérieures. Cette valeur servira alors de référence. Pour dimensionner le bâtiment, il faut ensuite calculer les facteurs $f_{R_{Si,bât}}$ des parois et nœuds constructifs, respectivement selon les équations [20.2] et [20.1]. Ce facteur, $f_{R_{Si,bât}}$ doit être toujours supérieur à $f_{R_{Si,min}}$ pour éviter tout risque de formation de moisissures en superficie.

$$Si \quad f_{R_{Si,min}} < f_{R_{Si,bât}} \quad \text{alors pas de risque de formation de moisissures} \quad [20.3]$$

Les conditions hygrométriques sont déterminées par des moyennes mensuelles. Cela donne une probabilité d'avoir un jour de condensation tous les deux ans d'après la norme (NF EN ISO 13788 s.d.). Elles sont caractérisées par la température T ($^{\circ}C$) et l'humidité relative φ (%). Les raisonnements ci-dessous sont donnés en pressions partielles, il est tout à fait envisageable de faire les calculs en considérant l'humidité absolue.

Comme l'humidité relative maximale acceptable est de 80% à la surface, la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) préconise de calculer la pression de vapeur saturante minimale acceptable $p_{sat}(T_{Si,min})$ (Pa) à la surface de la paroi de la manière suivante :

$$p_{sat}(T_{Si,min}) = \frac{p_i}{0,8} \quad [21]$$

Où la pression p_i (Pa) a été calculée selon [19.1].

A partir de cette pression de vapeur saturante, la température de surface minimale acceptable $T_{Si,min}$ peut être calculée avec l'équation [1.1] ou [1.2].

Il est ensuite possible de déterminer mensuellement le facteur minimal acceptable $f_{R_{Si,min}}$ par l'équation [20.1]. Selon la norme (NF EN ISO 13788 s.d.), le mois ayant la plus grande valeur de $f_{R_{Si,min}}$ sur une année complète est le mois critique.

Les hypothèses de calcul ne sont pas énoncées dans la norme (NF EN ISO 13788 s.d.). Historiquement, cette définition vient des pays d'Europe du nord. Il est d'usage d'appliquer ce calcul à des climats froids.

Si la température intérieure devient inférieure à la température extérieure, alors le facteur de température superficielle f_{RSi} devient négatif. Or un facteur négatif n'a aucun sens physique. Cette situation arrive en été dans les climats belges et français. En réalité, il y a inversion des flux dans ce cas là, le flux va toujours du chaud vers le froid. Donc en été, il va de l'extérieur vers l'intérieur, à l'inverse de l'hiver. Il n'est alors plus question de condensation superficielle comme décrit ci-dessus. La température superficielle intérieure T_{Si} sera supérieure à la température intérieure T_{int} . Il n'y a plus de risque. Il suffira de contrôler les conditions hygrothermiques du local, ce qui n'est pas le propos ici.

Le même problème apparaît lorsque la température superficielle minimale acceptable $T_{Si,min}$ calculée est inférieure à la température extérieure. Cette situation peut arriver avec les marges de sécurité lorsque les ambiances intérieures et extérieures sont proches, à savoir au printemps ou à l'automne par exemple. Dans ce cas, comme le flux de température va de l'intérieur vers l'extérieur, la température diminue de T_{int} vers T_{ext} . Donc la température superficielle réelle T_{Si} se situe dans cet intervalle. Comme le calcul se fait pour un minimum acceptable, dans cette situation, la température superficielle réelle sera toujours supérieure au minimum acceptable. Il n'y aura aucun risque de condensation.

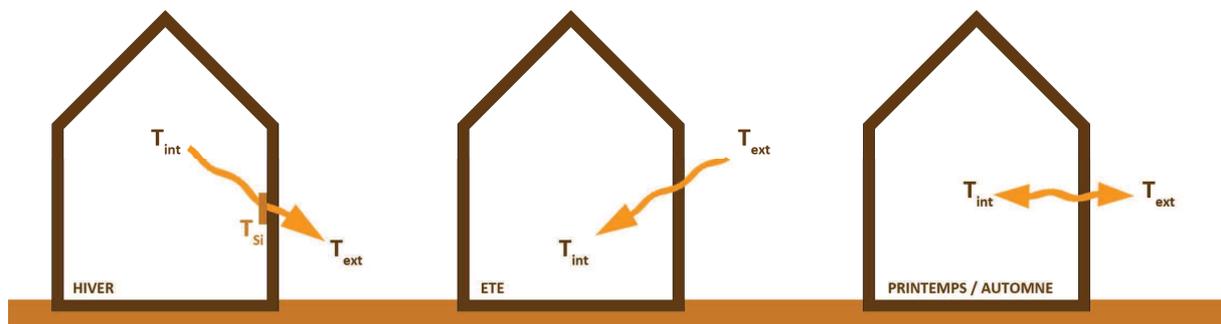


Figure 16 : Illustration schématique des flux de température

Hors du cadre du calcul normatif, pour ce travail, les hypothèses suivantes sont émises :

Il n'y a aucun risque de formation de moisissures superficielles si $T_{int} < T_{ext}$ et si $T_{Si,min} < T_{ext}$.

A noter qu'il faudra tout de même regarder ce qu'il se passe en interne dans la paroi. Dans les bâtiments climatisés, il peut arriver de trouver de la condensation derrière le pare vapeur. Cela est dû à cette inversion de flux. Ceci sera développé ultérieurement.

Pour finir, il est possible de prévoir quelques comportements. Il est aisé de comprendre qu'en augmentant l'isolation des parois, le risque de formation de moisissures va diminuer sur une paroi simple. Pour les conditions hygrothermiques, il apparaît tout de suite que si T_{int} augmente, alors $f_{RSi,min}$, valeur minimale acceptable diminue. Cela laisse une marge plus grande pour le f_{RSi} calculé pour les composants du bâtiment. Le risque de formation de moisissures diminue.

De manière générale, pour diminuer le risque de formation de moisissures, il faut s'éloigner de la saturation, côté intérieur et extérieur. En passant par une diminution des apports en vapeur d'eau (humidité absolue) ou une diminution de l'humidité relative (pour une humidité absolue constante, augmenter la température). Le climat extérieur n'est pas modifiable, il est parfois possible de modifier la localisation d'un bâtiment mais c'est rare. C'est donc le climat intérieur qu'il faut contrôler.

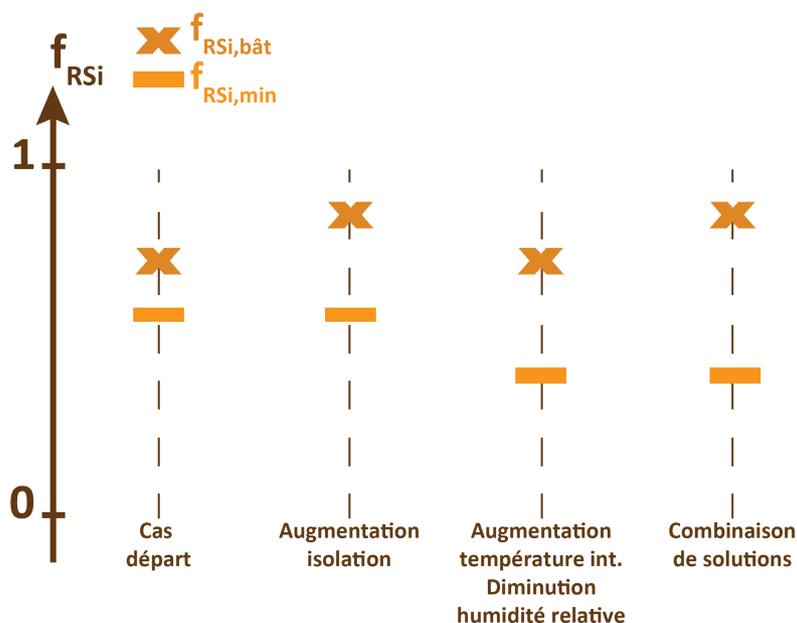


Figure 17 : Illustration schématique - Exemple de comportement du facteur de température superficielle

b. Structures à faible inertie thermique

Pour les structures à faible inertie thermiques, tels que les châssis et leurs vitrages, il est possible de faire des calculs vis-à-vis de la condensation superficielle. Il faudra baser les données climatiques sur une température moyenne minimale annuelle et l'humidité relative à 95%, d'après la norme (NF EN ISO 13788 s.d.). La résistance superficielle intérieure R_{Si} sera prise à $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Il faudra regarder le risque de condensation et non le risque de formation de moisissures. La limite n'est plus à 80% d'humidité relative mais bien à saturation soit 100%.

Le risque de formation de moisissures est considéré comme moins dangereux puisque les vitrages sont en général régulièrement entretenus et nettoyés.

Concernant la condensation interne, il n'est pas envisageable d'appliquer la méthode de type Glaser (méthode suivante). Le vitrage est totalement imperméable à la vapeur d'eau ($\delta_p=0 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) donc d'après l'équation [8], $\mu \rightarrow \infty$). Il n'y a à priori pas de transfert de vapeur d'eau au travers des vitrages. D'autre part, les calculs ne prennent pas en compte les deux dimensions, ce qui serait plus intéressant ici.

Les analyses de cas qui suivront n'étudieront pas ce cas.

4.1.3. Risque de condensation interne - Méthode type Glaser

De la condensation peut aussi apparaître au sein d'une paroi composée de plusieurs couches de matériaux. En se diffusant, la vapeur d'eau peut être confrontée à une barrière en arrivant à l'interface entre deux matériaux dont la résistance à la diffusion de vapeur est différente. La méthode reprise par la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) est de type Glaser. Elle permet de voir si la pression atteint la saturation aux différentes interfaces.

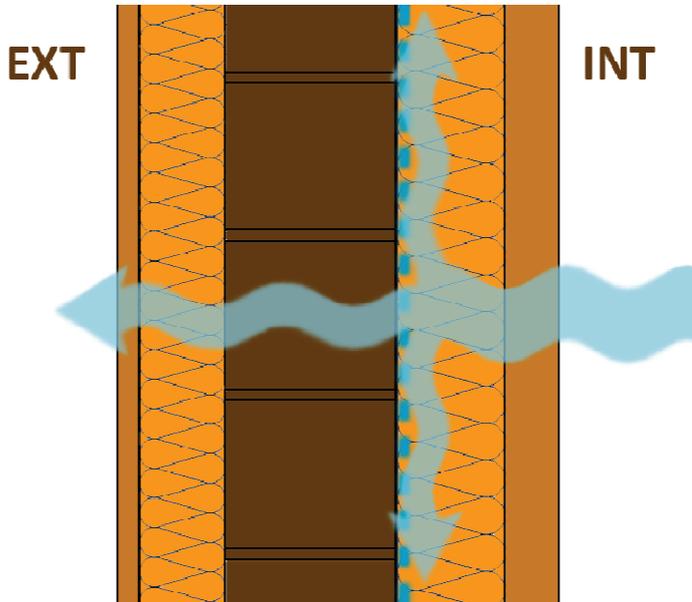


Figure 18 : Exemple de paroi composée - Transfert de flux de vapeur d'eau en bleu avec accumulation sur une interface

Les hypothèses d'applications de cette méthode citées dans la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) sont les suivantes : Le calcul ne tient pas compte

- De l'influence de la teneur en humidité sur la conductivité thermique
- Du dégagement et de l'absorption de chaleur latente
- De la variation des propriétés de matériaux avec la teneur en humidité
- De la succion capillaire et du transfert d'humidité à l'état liquide dans les matériaux
- Des déplacements d'air par les fissures ou dans les espaces d'air
- De la capacité hygroscopique des matériaux

De plus, les transferts sont supposés à une dimension uniquement, selon un axe nommé x arbitrairement.

Comparons alors la répartition du flux de vapeur à la répartition de la pression de vapeur saturante. Le calcul est fait mensuellement à l'aide de moyennes sur une année complète.

Une paroi est composée de N couches de matériaux j différents avec un nombre i d'interfaces entre chaque matériau. Afin de ne pas passer à côté de phénomènes, il faut discrétiser les éléments à forte résistance thermique tels que les isolants. La norme (NF EN ISO 13788 s.d.) préconise des couches de matériaux dont la résistance vaut moins de $0,25 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Pour commencer avec la répartition du flux de vapeur, les hypothèses permettent de simplifier l'équation [15.2] et d'écrire :

$$g_v = -\frac{\delta_0}{\mu} \nabla p_v = \frac{\delta_0}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_v}{\Delta x}$$

Où $\Delta p_v = p_{v,int} - p_{v,ext}$

$p_{v,int}$: pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air intérieur (Pa)

$p_{v,ext}$: pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air extérieur (Pa)

Comme l'épaisseur de la paroi vaut e (m), $\Delta x = e$. Avec l'équation [10], cela donne, d'après (NF EN ISO 13788 s.d.) :

$$g_v = \delta_0 \frac{\Delta p_v}{S_{d,tot}} \quad [22.1]$$

Où δ_0 : perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (kg/(m.s.Pa)), par simplification, ici, $\delta_0 = 2.10^{-10}$ kg/(m.s.Pa)

$S_{d,tot}$: épaisseur d'air équivalente totale (m)

Sachant que, pour N couches de matériaux différents :

$$S_{d,tot} = \sum_{j=1}^N S_{d,j} \quad [23.1]$$

Où $S_{d,j}$: épaisseur d'air équivalente de la couche de matériau j (m)

L'équation [21.1] montre que la pression de vapeur évolue de manière linéaire en fonction de l'épaisseur d'air équivalente à flux constant.

Dans un deuxième temps, concernant les pressions de vapeur saturante, il faut regarder les valeurs limites de pression vis-à-vis de la condensation. Pour cela, il faut regarder la densité de flux thermique qui est donnée, toujours avec les hypothèses précitées selon (NF EN ISO 13788 s.d.), par :

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{e} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad [22.2]$$

Où q : densité de flux de chaleur (W/m²)

T : température (°C)

λ : conductivité thermique (W/(m.K))

e : épaisseur (m)

R_{th} : résistance thermique (m².K/W)

Etant donné que le régime est stationnaire, pour les N couches de matériaux différents, la température est répartie linéairement et il est possible d'écrire à chaque interface i , d'après la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) :

$$T_i = T_{ext} + \frac{R_{th,i}}{R_{th,tot}}(T_{int} - T_{ext}) \quad [22.3]$$

Où T_i : température à l'interface i (°C)

T_{ext} : température extérieure (°C)

T_{int} : température intérieure (°C)

$R_{th,i}$: résistance thermique cumulée jusqu'à l'interface i ($m^2.K/W$)

$R_{th,tot}$: résistance thermique totale ($m^2.K/W$)

Pour calculer la résistance thermique cumulée :

$$R_{th,i} = R_{Se} + \sum_{j=1}^i R_{th,j} \quad [23.2]$$

Où R_{Se} : résistance superficielle extérieure, $R_{Se} = 0,04 m^2.K/W$

Pour finir, avec les équations [1.1] ou [1.2], la température T_i donne la pression de vapeur saturante à l'interface i , $p_{sat}(T_i)$.

Afin de conclure sur la répartition de pression, il faut superposer les graphiques de la pression partielle de vapeur saturante $p_{sat}(T_i)$ à la droite de pression de vapeur (droite entre $p_{v,int}$ et $p_{v,ext}$) en fonction de l'épaisseur d'air équivalente. Pour éviter tout risque de condensation interne, il faut que la courbe de pression de vapeur saturante reste au dessus de la droite entre $p_{v,int}$ et $p_{v,ext}$.

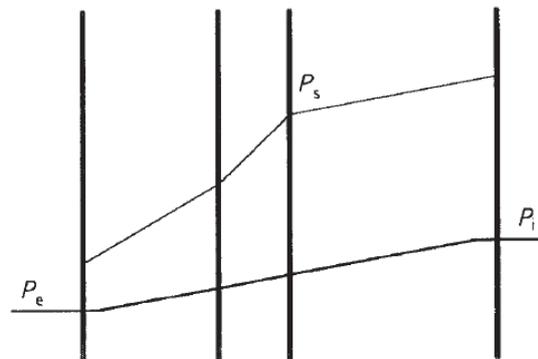


Figure 19 : Exemple de graphique de diffusion de vapeur sans condensation interne – Extrait norme (NF EN ISO 13788 s.d.)

Dans le cas où il y a condensation interne, la norme (NF EN ISO 13788 s.d.) donne une méthode pour calculer le taux de condensation. Pour cela, il faut redessiner le profil de pression de vapeur en segments de droites touchant mais ne dépassant pas le profil de pression de vapeur saturante. Les points ainsi créés aux interfaces représenteront les lieux de condensation à une pression partielle p_{cond} (Pa).

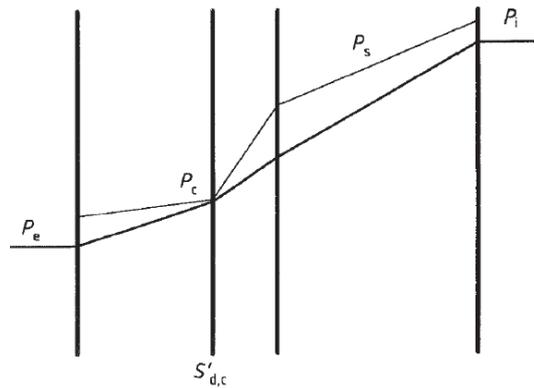


Figure 20 : Exemple de graphique de diffusion de vapeur avec condensation interne à une interface entre deux matériaux
- Extrait norme (NF EN ISO 13788 s.d.)

La norme (NF EN ISO 13788 s.d.) définit alors le taux de condensat comme la différence de flux entre ce qui entre et ce qui sort de l'interface. Il s'agit de la quantité d'humidité qui reste à l'interface. La formule est la suivante :

$$w_c = \delta_0 \left(\frac{p_{v,int} - p_{cond}}{S_{d,tot} - S_{d,cond}} - \frac{p_{cond} - p_{v,ext}}{S_{d,cond}} \right) \quad [24]$$

Où δ_0 : perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (kg/(m.s.Pa)), par simplification, ici, $\delta_0 = 2.10^{-10}$ kg/(m.s.Pa)

$S_{d,tot}$: épaisseur d'air équivalente totale (m)

$S_{d,cond}$: épaisseur d'air équivalente cumulée jusqu'à l'interface de condensation (m)

$p_{v,int}$: pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air intérieur (Pa)

$p_{v,ext}$: pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air extérieur (Pa)

p_{cond} : pression partielle de condensation (Pa)

S'il y a plusieurs interfaces de condensation, la démarche et les formules sont du même type. Elles ne sont pas détaillées ici.

Dès qu'il y a évaporation, le taux de condensat devient négatif. Il faut alors parler du taux d'évaporation qui se calcule exactement de la même manière.

Pour calculer la quantité de condensat accumulée, d'après la norme (NF EN ISO 13788 s.d.), il faut détecter le premier mois qui présente de la condensation sur une année complète (souvent fin de l'automne). A partir de là, il suffit de sommer le taux de condensat ou évaporation chaque mois. Cette quantité peut finir par s'annuler sur une année s'il y a évaporation.

D'après le projet de norme (SIA180), la condensation dans une paroi est acceptable si la quantité de condensat s'annule sur une année complète et si la quantité accumulée est inférieure à :

3% de la masse de la couche pour les bois et matériaux ligneux

1% du volume de la couche pour les matériaux isolants

800g/m² pour les matériaux poreux avec capacité de transport capillaire.

Ces critères seront repris dans les simulations numériques.

Cette méthode est à priori très fiable. S'il existe un risque, il sera détecté. Mais il arrive qu'elle détecte des risques sans réalité et qu'elle soit beaucoup trop sécuritaire.

4.1.4. Simulation dynamique selon (NF EN 15026 s.d.)

Les simulations en régime dynamiques sont faites à l'aide de logiciels qui ont validé la norme (NF EN 15026 s.d.). Elles permettent de calculer les différents indicateurs qui ont été déterminé.

Dans un premier temps, citons les hypothèses de calcul de la norme (NF EN 15026 s.d.) :

- La géométrie des éléments doit être constante (pas de retrait ni gonflement)
- Pas de réactions chimiques
- Chaleur latente de sorption égale à la chaleur latente de condensation/évaporation
- Pas de modification des propriétés des matériaux dans le temps
- Equilibre local entre liquide et vapeur sans hystérésis
- La courbe de rétention d'eau ne dépend pas de la température
- Les gradients de température et de pression n'affectent pas la diffusion de vapeur

L'équation de couplage utilisée ici se base sur la conservation de l'énergie et de l'humidité, (NF EN 15026 s.d.) :

$$(c_m \rho_m + c_l w) \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial (q_{sens} + q_{lat})}{\partial x} \quad [25.1]$$

Où c_m : capacité thermique massique des matériaux secs (J/(kg.K))

c_l : capacité thermique massique de l'eau liquide (J/(kg.K))

ρ_m : masse volumique de la matrice solide (kg/m³)

w : teneur en eau (kg/m³)

T : température (°C)

t : temps (s)

q_{sens} : densité de flux de chaleur sensible (W/m²)

q_{lat} : densité de flux de chaleur latente (W/m²)

x : distance (m)

Toutes les équations énoncées dans les notions de base sont valables. Elles sont prises dans la méthode pour préciser les différentes composantes des transferts de chaleur et d'humidité. Il manque simplement la définition des conditions aux limites.

Pour les transferts de chaleur, il s'agit de conditions de type Neuman (cf paragraphe 1.4.2. Conditions limites). Elles prennent en compte les différents transferts vus sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à savoir les échanges par rayonnement solaire, émission infrarouge, convection et les échanges avec les surfaces environnantes. La composante sensible est donc la suivante, (NF EN 15026 s.d.) :

$$q_{sens} = h (T_{eq} - T_{surf}) \quad [25.2]$$

Où q_{sens} : densité de flux de chaleur sensible (W/m²)

h : coefficient d'échange thermique surfacique (W/(m².K))
 T_{eq} : température équivalente de l'environnement proche (°C)
 T_{surf} : température de surface (°C)

Le coefficient d'échange thermique surfacique se calcule de la manière suivante, (NF EN 15026 s.d.) :

$$h = h_c + h_r \quad [25.3]$$

Où h_c : coefficient d'échange convectif (W/(m².K))
 h_r : coefficient d'échange radiatif (W/(m².K))

Et la température équivalente vaut, (NF EN 15026 s.d.) :

$$T_{eq} = T_a + \frac{1}{h} (E_{sol} \alpha_{sol} + (T_r - T_a) h_r) \quad [25.4]$$

Où T_a : température de l'air de l'environnement proche (°C)
 T_r : température radiante moyenne de l'environnement proche (°C)
 E_{sol} : densité totale du flux du rayonnement solaire incident (W/m²)
 α_{sol} : absorptivité du rayonnement solaire (-)

Concernant les conditions aux limites de la composante latente du flux de chaleur, elle est proportionnelle au flux de vapeur d'après l'équation [17.2]. Regardons ce qu'il se passe pour les transferts d'humidité aux interfaces des matériaux.

Entre deux couches de matériaux, il peut y avoir des défauts de contact qui influent sur les transferts d'eau en ces lieux. La norme (NF EN 15026 s.d.) modélise ce phénomène par l'introduction d'une résistance à l'humidité R_w (m/s). Le logiciel Delphin appelle cette résistance un coefficient d'échange. Aux interfaces, il est possible d'écrire une loi de Darcy simplifiée :

$$g_l = \frac{\Delta s}{R_w} \quad [25.5]$$

Où g_l : densité de flux liquide (kg/(m².s))
 s : pression de succion (Pa)

En surface, les conditions limites sur les transferts d'humidité sont de deux types. Il y a d'abord la diffusion, (NF EN 15026 s.d.) :

$$g_v = \frac{\delta_0}{S_d} (p_{v,a} - p_{v,surf}) \quad [25.6]$$

Où g_v : densité de flux de vapeur (kg/(m².s))
 δ_0 : perméabilité à la vapeur d'eau de l'air (kg/(m.s.Pa))
 S_d : épaisseur d'air équivalente (m)
 $p_{v,a}$: pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (Pa)

$p_{v,surf}$: pression partielle de vapeur d'eau sur une surface (Pa)

Et puis il faut regarder l'absorption d'eau en surface, c'est-à-dire les pluies battantes, (NF EN 15026 s.d.) :

$$g_{l,max} = K_l \frac{\partial s}{\partial x} \quad [25.7]$$

Où K_l : conductivité liquide (kg/(m.s.Pa))

Donc pour finir :

$$g_l = \min (g_p; g_{l,max}) \quad [25.8]$$

Où g_p : densité de flux d'humidité de l'eau provenant des précipitations (kg/(m².s))

A partir de ces différentes équations, les données initiales sont entrée pour obtenir les courbes de sorties en fonction du temps : la teneur en eau totale (liquide et vapeur), l'humidité relative, la quantité de condensat et la fraction volumique. Par rapport aux données sur les matériaux et le climat disponibles, il faut tout de même préciser comment calculer les coefficients de transfert en surface. Côté intérieur, il faut suivre les valeurs du Tableau 7 ci-dessous.

Direction du flux de chaleur	$h_{c,si}$ (W/(m ² .K))	$h_{r,si}$ (W/(m ² .K))	$S_{d,si}$ (m)
Horizontal	2,5	5,7ε	0,008
Ascendant	5	5,7ε	0,004
Descendant	0,7	5,7ε	0,03

ε est l'émissivité de grande longueur d'onde de la surface.

Tableau 7 : Coefficients de transfert de chaleur en surface intérieure et épaisseur équivalente pour la diffusion de vapeur dans la couche limite - Extrait norme (NF EN 15026 s.d.)

Quant au côté extérieur, les variations dépendent des données météorologiques. Pour la convection, le rayonnement et l'épaisseur d'air équivalente dans la couche limite, les équations sont les suivantes, (NF EN 15026 s.d.) :

$$h_{c,se} = 4 + 4v \quad [26.1]$$

$$h_{r,se} = \varepsilon \sigma_s 4\bar{T}^3 \quad [26.2]$$

$$S_{d,se} = \frac{1}{67 + 90v} \quad [26.3]$$

Où v : vitesse du vent (m/s)

ε : émissivité de grande longueur d'onde de la surface (-)

σ_s : constante de Stefan-Boltzmann (W/(m².K⁴))

\bar{T} : moyenne de la température de surface extérieure et de la température radiante moyenne (K)

4.2. Présentation des outils

Il existe différents outils pour appliquer chacune des méthodes décrites ci-avant. Le Tableau 8 ci-dessous en reprend une liste non-exhaustive. Certains n'ont pas été utilisés (disponibilité, redondance ...), ils sont cités à titre comparatif. Pour toutes les simulations dynamiques de transfert hygrothermique, c'est Delphin qui a été utilisé.

Excel a servi à tous les traitements de données météo et les résultats des simulations. Le logiciel Meteonorm a été utilisé pour créer la base de données météo du climat extérieur utile à toutes les simulations.

Pour ce qui est des autres outils, ils sont spécifiques aux problèmes de condensation. Certains logiciels n'ont pas pour fonction première de faire ce type de calcul, généralement voués à du calcul thermique. Mais soit ils ont un module pour effectuer le calcul hygrothermique, soit les éléments en sortie peuvent être manipulés.

Outil Logiciel /	Pour quelle méthode	1D ou 2D	Données en sortie	Contenu du logiciel	Utilisé
Excel Version 2007	f_{RSi}	1D (2D)	$f_{RSi,min} ; f_{RSi}$	Tableur – Calculs pour les méthodes décrites ci-dessus. Traitement de données.	x
	Glaser	1D	w_c		x
			φ_{int}		x
Meteonorm Version 6.1			$T_{ext} ; \varphi_{ext}$	Base de données météo rassemblant 8300 stations réparties sur le monde.	x
TRNSYS Version 17			T_{int}	Simulation dynamique de bâtiments. Réponse thermique en régime transitoire du bâtiment à un environnement donné (couplage avec les systèmes et l'inertie).	
Comfie + Pléiades			T_{int}	Simulation dynamique de bâtiments. Réponse thermique en régime transitoire du bâtiment à un environnement donné (couplage avec les systèmes et l'inertie). Température donnée est une température ressentie et pas la température de l'air.	
Heat 2D Version 8.03	f_{RSi}	2D	T_{Si}	Analyse de ponts thermiques. Isothermes en 2D	x
Flixo	f_{RSi}	2D	f_{RSi}	Analyse de ponts thermiques. Isothermes en 2D + valeur du f_{RSi}	
TRISCO	f_{RSi}	2D	T_{Si}	Analyse de ponts thermiques. Isothermes en 2D	
GLASTA	Glaser	1D	w_c	Calcul de la condensation interne (diffusion de vapeur d'eau et transfert par capillarité) selon la norme (NF EN ISO 13788 s.d.)	
Climawin Version 4.0.31.2	Glaser	1D	w_c	Calcul de la condensation interne selon la méthode de Glaser décrite par (NERVETTI et SOMA 1982)	x
WUFI Version Pro 5	Dynamique	1D et 2D	$f_{RSi}, w_c, \varphi_{interf}, R_{th}$	Calcul des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans des éléments composés de bâtiments. Validé par la norme (NF EN 15026 s.d.).	
Delphin Version 5.6.8	Dynamique	1D et 2D	$f_{RSi}, w_c, \varphi_{interf}, R_{th}$	Calcul des transferts couplés de chaleur et d'humidité dans des éléments composés de bâtiments. Validé par la norme (NF EN 15026 s.d.).	x

Tableau 8 : Comparaison des différents outils de calcul

4.3. Démarche

Le concepteur de bâtiments à haute performance énergétique étudie la performance des systèmes et de l'enveloppe. Il se préoccupe du confort des utilisateurs et de réduire leur facture énergétique. Ces préoccupations prennent en compte des paramètres sur lesquels l'utilisateur pourra agir (par exemple, le chauffage) ou non (par exemple le traitement des ponts thermiques). La logique de conception est de contrôler un maximum de paramètres constitutifs du bâtiment. La problématique est donc de faire en sorte de diminuer les paramètres sur lesquels peuvent agir les occupants et s'ils agissent dessus, qu'ils n'entravent pas la performance du bâtiment. Cette diminution ne peut pas être ramenée à zéro, il y a par exemple des systèmes qui demandent de la maintenance.

Pour les risques hygrothermiques, les performances de la ventilation et de l'apport de vapeur d'eau dans la pièce sont maîtrisées dans la conception mais pas dans l'utilisation. C'est sur la performance de l'enveloppe qu'il faut miser en se plaçant dans des conditions défavorables d'utilisation.

Déterminer les conditions défavorables d'utilisation se fait de manière assez logique. Pour augmenter les risques liés à l'humidité, il faut augmenter la quantité d'eau présente dans l'étude de cas. Il faut se situer pour des cas où l'humidité relative est élevée. Comme les paramètres environnementaux extérieurs ne sont pas contrôlables, il faudra choisir une orientation qui reçoit peu de rayonnements solaires susceptibles de sécher la paroi et beaucoup de pluie battantes. Pour ce qui est de l'intérieur, il faut que le taux de production de vapeur d'eau soit élevé, à savoir un environnement de cuisine ou de salle de bain.

Pour synthétiser la suite de la démarche, il faut définir le besoin, à savoir quel est le risque à détecter et sur quel élément. A partir de cela, une méthode de calcul en découle, définissant une série d'outils possibles. L'outil le plus adapté est choisi en fonction de la complexité du calcul recherchée mais aussi de la disponibilité de cet outil.

Afin de tester ces différentes méthodes, des études comparatives sur des cas assez simples ont été effectuées. Elles permettent de déterminer la fiabilité des différents calculs ainsi que leur complexité. Les trois différentes méthodes ont été à chaque fois testées de manière systématique, permettant ainsi d'établir des comparaisons. Ce travail d'analyse une fois mené, leur intégration dans le processus de conception est alors envisagée.

problématique

état de l'art

analyses de cas

intégration

CHAPITRE 3 : ANALYSES DE CAS

1. Hypothèses générales

Les différents cas seront étudiés avec des hypothèses communes.

Il s'agit dans tous les cas d'une paroi de 1m^2 , orientée au nord-est dans une cuisine située à Lyon. L'orientation a été choisie comme la plus défavorable par rapport aux pluies battantes et au taux de rayonnement solaire. Dans un logement, la cuisine est une des pièces les plus productrices en vapeur d'eau avec les salles de bains (dans la même classe hygrothermique, classe 4).

Dans toute la suite, que ce soit pour la validation ou les analyses de cas, ces hypothèses sont appliquées à la modélisation sur Delphin et aux méthodes statiques. Tous les graphiques résultant des simulations qui ne sont pas intégrés au texte se trouvent en annexe.

1.1. Conditions hygrothermiques

Côté extérieur

Les conditions météorologiques sont extraites du logiciel Meteonorm Version 6.1 pour la station Lyon Bron. La température de l'air extérieure est extraite de données prises entre 1996 et 2005. Pour le rayonnement, les valeurs sont prises entre 1981 et 2000. Ces données sont moyennées et le logiciel donne une année de référence. L'année est alors représentée par la température de l'air extérieure, l'humidité relative, le champ radiatif direct et indirect, la couverture nuageuse, la force et la direction du vent et la densité du flux de précipitations.

Côté intérieur

Comme le propos est de faire des analyses sur les méthodes de calcul et des études paramétriques, il n'est pas apparu intéressant de passer par une simulation complète sur TRNSYS pour obtenir la température intérieure.

La température de l'air intérieure T_{int} (°C) est définie comme une superposition de deux fonctions sinusoïdales. Il y a une variation entre l'hiver et l'été d'amplitude 2°C superposée à une variation journalière d'amplitude 1°C . Elle donnée par l'équation suivante :

$$T_{\text{int}}(t) = 21 + 2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365}t + \pi\right) + \sin\left(2\pi t - \frac{\pi}{2}\right) \quad [27]$$

Où t : temps en jours (d)

L'humidité relative intérieure est calculée à partir de cette température intérieure selon le calcul normatif pour un bâtiment de classe 4 (cuisine), vu au chapitre précédent, paragraphe 4.1.1.

A partir de ces conditions hygrothermiques, la limite du facteur de température superficielle pour le risque de formation de moisissures superficielle, $f_{\text{RSi,min}}$, vaut 0,828 pour les méthodes statiques. Le calcul se trouve en annexe.

1.2. Propriétés des matériaux

Les matériaux sont tous supposés homogènes. Le matériau de structure est du béton armé. L'isolant employé est de la laine minérale, sauf quand précisé. La finition est dans tous les cas du plâtre de 1cm d'épaisseur. Initialement, tous les matériaux ont une température à 20°C et une humidité relative à 80%, car les valeurs de référence des matériaux sont données dans ces conditions.

Les matériaux composants ont les propriétés suivantes :

	Nom de catalogue Delphin	λ_s (W/(m.K))	ρ (kg/m ³)	C_p (J/(kg.K))	μ (-)	θ_{por} (m ³ /m ³)	θ_{eff} (m ³ /m ³)	A kg/(m ² .s ^{1/2})
Béton	Concrete 20_25	2,5	2320,2	850	110	0,143	0,14299	-
Isolant - Laine minérale	Mineral Wool	0,038	30	840	1	0,92	0,9	-
Plâtre	Gypsum Board	0,2	850	850	10	0,65	0,551	0,277
Pare vapeur	PE-Foil	0,15	1000	1400	100000	0,00011	0,0001	-

Tableau 9 : Etude comparative - Propriétés des matériaux

Les différents coefficients d'échange pour la résolution des équations sont définis comme suit :

Coefficients	
Conductivité intérieure	$h_{c,int} = 8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Conductivité extérieure	$h_{c,ext} = 25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
Diffusion de vapeur intérieure	$R_{w,int} = 3.10^{-8} \text{ s/m}$
Diffusion de vapeur extérieure	$R_{w,ext} = 2.10^{-7} \text{ s/m}$
Absorption	$\alpha_{sw} = 0,6$ (mur gris)
Albedo	$\alpha_{albedo} = 0,9$
Emission des surfaces du bâtiment	$\varepsilon=0,9$ (calcul de Boltzmann)
Exposition à la pluie	$k_{rain} = 1$ (pas de protection contre la pluie)
Minimum T_{rain} (température de la pluie)	$T_{rain} = -2^\circ\text{C}$
Intensité minimum de pluie	$g_{p,min} = 0 \text{ L/(m}^2\text{.s)}$

Tableau 10 : Etude comparative - Coefficients

La conductivité thermique λ (W/(m.K)) augmente avec l'humidité. Cette variation se fera en fonction de la fraction volumique liquide Ψ_l (m³/m³). Elle sera de type linéaire, définie par le logiciel Delphin, à savoir :

$$\lambda(\psi) = 0,6\Psi_l + \lambda_s \quad [28]$$

Où λ_s : conductivité thermique sèche (W/(m.K)), pour $\Psi_l = 0 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Les courbes de rétention d'eau sont en annexes. Pour rappel, il s'agit de la pression de succion en fonction de l'humidité relative. C'est la capacité de s'imbiber du matériau. Elles sont directement reliées aux courbes de sorption qui donnent la capacité de stockage d'humidité du matériau.

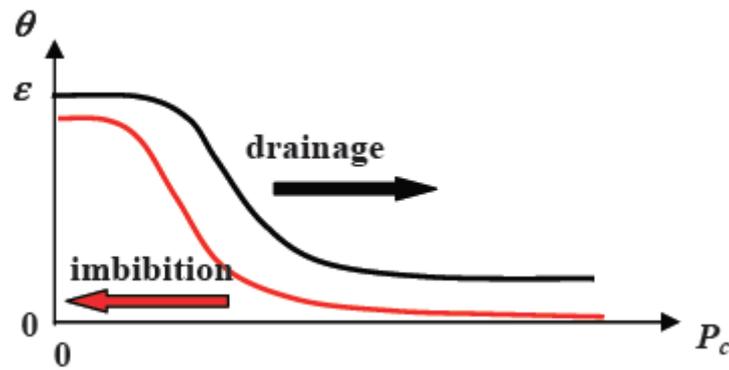


Figure 21 : Schéma - Courbes de rétention d'eau - Extrait (DAÏAN 2010)

La conductivité liquide K_l et le coefficient de diffusion de vapeur D_v sont donnés en fonction de la fraction volumique pour chaque matériau (courbes en annexe). A noter que la laine minérale ne possède pas de capacité de transport d'eau liquide. Si de l'eau apparaît aux interfaces, elle ne pourra pas s'évacuer par la laine minérale sous forme liquide. Le pare vapeur n'a aucune capacité de transport d'eau. Cela paraît tout à fait logique vu qu'il joue le rôle de barrière étanche.

1.3. Données en sortie

En sortie de simulation, sont extraites les différentes courbes suivantes, en fonction du temps (jours) :

- L'humidité relative en surface
- L'humidité relative aux différentes interfaces
- La fraction volumique dans toute la paroi
- La quantité de condensat dans l'isolant
- La teneur en eau totale dans la paroi

La fraction volumique est ensuite manipulée pour donner les valeurs de résistance thermique.

Sur Delphin, les courbes sont attribuées sur toute la hauteur de la paroi dans les mailles adaptées, notion expliquée ci-dessous.

Dans tous les cas, la quantité de condensat dans le béton et dans le plâtre a aussi été surveillée. Elle n'est pas reprise dans les analyses parce qu'elle n'était pas pertinente par rapport aux critères étudiés. Aucun n'a montré de problème ou aberration.

1.4. Maillage

Pour modéliser le détail technique, la méthode est similaire à des calculs aux éléments finis. Elle passe par un maillage. Au plus un maillage est défini avec finesse, au plus le calcul sera précis et juste. Mais au plus le temps de calcul va devenir lourd. Un compromis doit être trouvé pour réduire le temps de calcul à moins de 3heures sans pour autant perdre la fiabilité du calcul. Il s'agit d'une limite physique par rapport aux performances de l'ordinateur. La tolérance de calcul étant inconnue, il faudra que les calculs soient fiables mais une précision de l'ordre du centième sera suffisante.

1.4.1. Validation du maillage

Pour les différentes simulations, il faut définir un maillage. Le calcul de transfert sera fait au centre de chaque maille et non en surface. La finesse du maillage est essentielle pour conclure sur la fiabilité des résultats. Il n'y a pas de surface intérieure par exemple. L'humidité relative doit être prise dans la maille en contact avec l'intérieur. Comme le calcul est pris au centre de la maille, il aura une certaine profondeur et ne représentera pas exactement la surface. Pour avoir un calcul fiable il faut que cette profondeur soit minimisée. De la même manière, les calculs de flux de vapeur d'eau et de liquide seront aussi influencés par ce choix et à fortiori la quantité de condensat. En effet, les équations [25.5] et [25.6] montrent que les conditions aux limites prennent en considération des gradients de pression par rapport aux surfaces. Or elles ne sont pas représentées ici. Il a fallu valider les différents maillages utilisés.

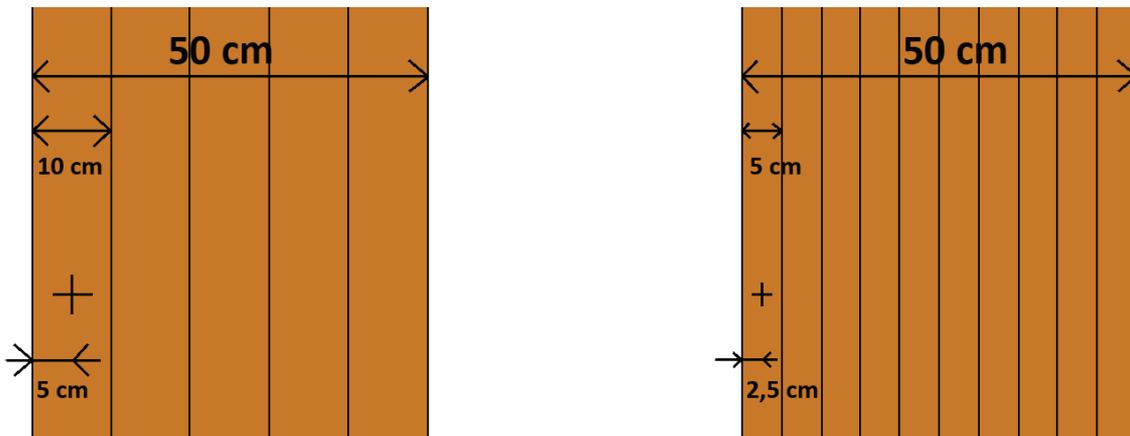


Figure 22 : Comparaison de deux maillages

Delphin propose de discrétiser les éléments soit de manière équidistante (ils feront tous la même largeur) soit de manière variable. La discrétisation variable permet de définir un maillage grossier au centre et des éléments plus fins aux extrémités des matériaux. Elle est définie par un coefficient d'étirement. Au plus ce coefficient est grand, au plus les éléments sont larges et donc au moins il y en a. Il est toujours supérieur à 100, sachant que 100 représente une discrétisation équidistante. Il est possible de définir la largeur minimum et/ou maximum des éléments. Ces paramètres n'ont pas été modifiés ici puisque les largeurs proposées par défaut étaient satisfaisantes pour cette modélisation. Le maillage peut être affiné que d'un côté. Il est alors asymétrique.

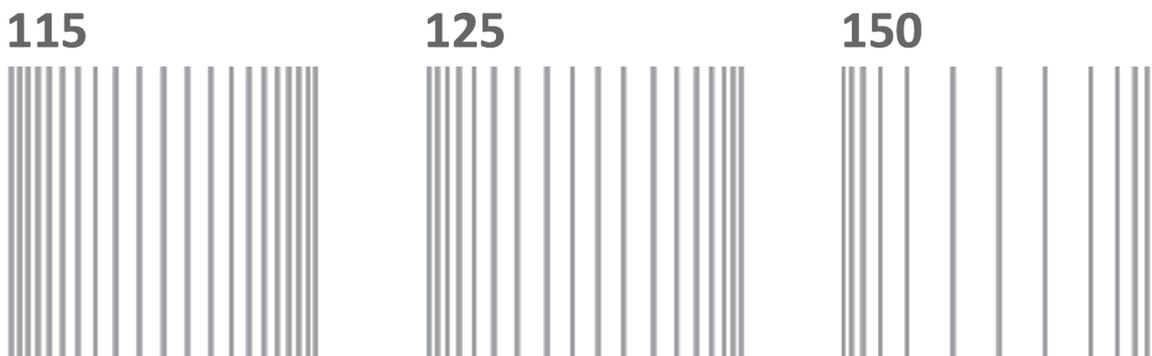


Figure 23 : Exemples de maillages d'éléments de 0,1m de large avec des coefficients d'étirement respectivement de 115, 125 et 150

La méthode de validation se fait par essais. Les différents critères seront testés et les résultats doivent converger graphiquement avec une tolérance de l'ordre du centième. Le test compare des maillages du plus gros vers le plus fin avec des maillages équidistants et variables. Le calcul est fait sur un an avec un pas de temps toutes les 6 heures. La paroi est composée de 15cm de béton armé et 10cm d'isolant de laine minérale à l'intérieur. Il s'agit d'une configuration pour laquelle il y a de la condensation, elle est intéressante pour évaluer nos critères. Les différents essais effectués sont repris dans le Tableau 11 ci-dessous :

	Isolant	Béton
Pas de maillage		
Maillage 1		
Maillage équidistant – Discrétisation en ... élément(s)		
Maillage 2	2	2
Maillage 3	10	10
Maillage 4	20	20
Maillage 5	50	50
Maillage variable – Coefficient d'étirement		
Maillage 6	175	175
Maillage 7	125	125
Maillage 8	115	115

Tableau 11 : Définition des maillages pour essais

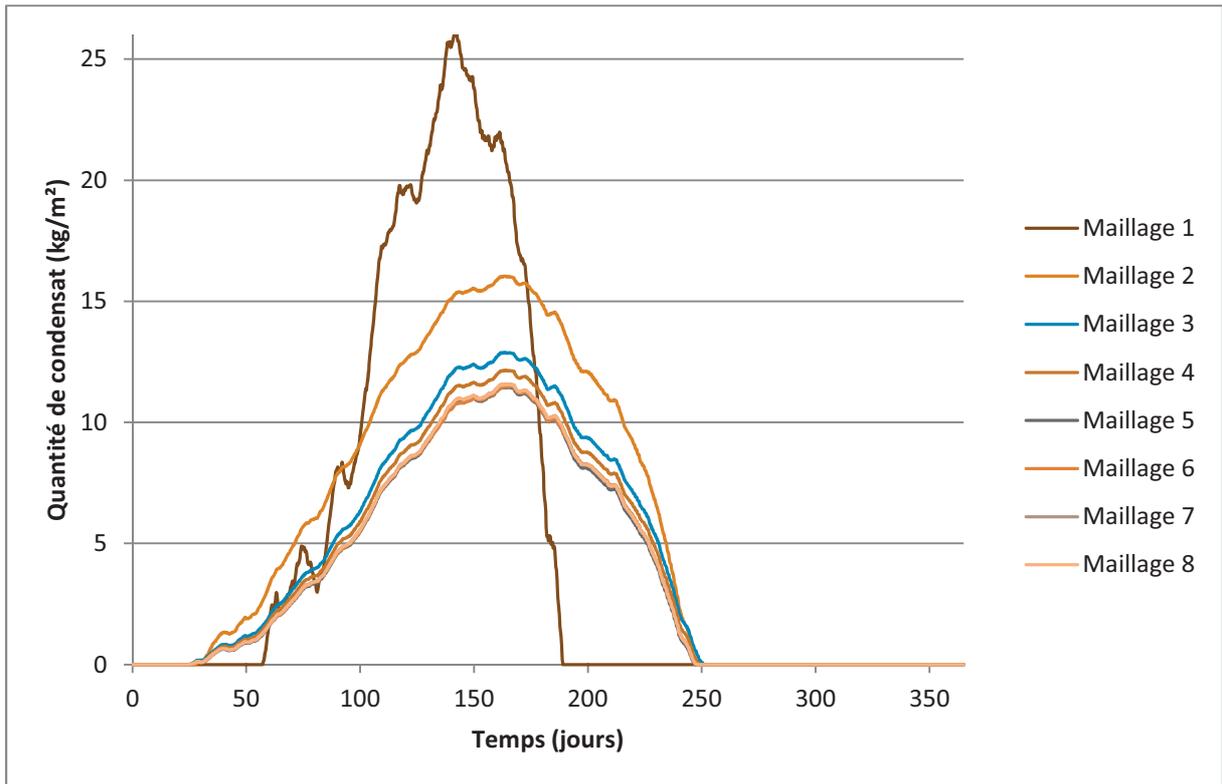
Les résultats des essais sont les suivants :

Ne pas mailler les éléments n'est pas une solution acceptable. Les résultats ne sont pas fiables.

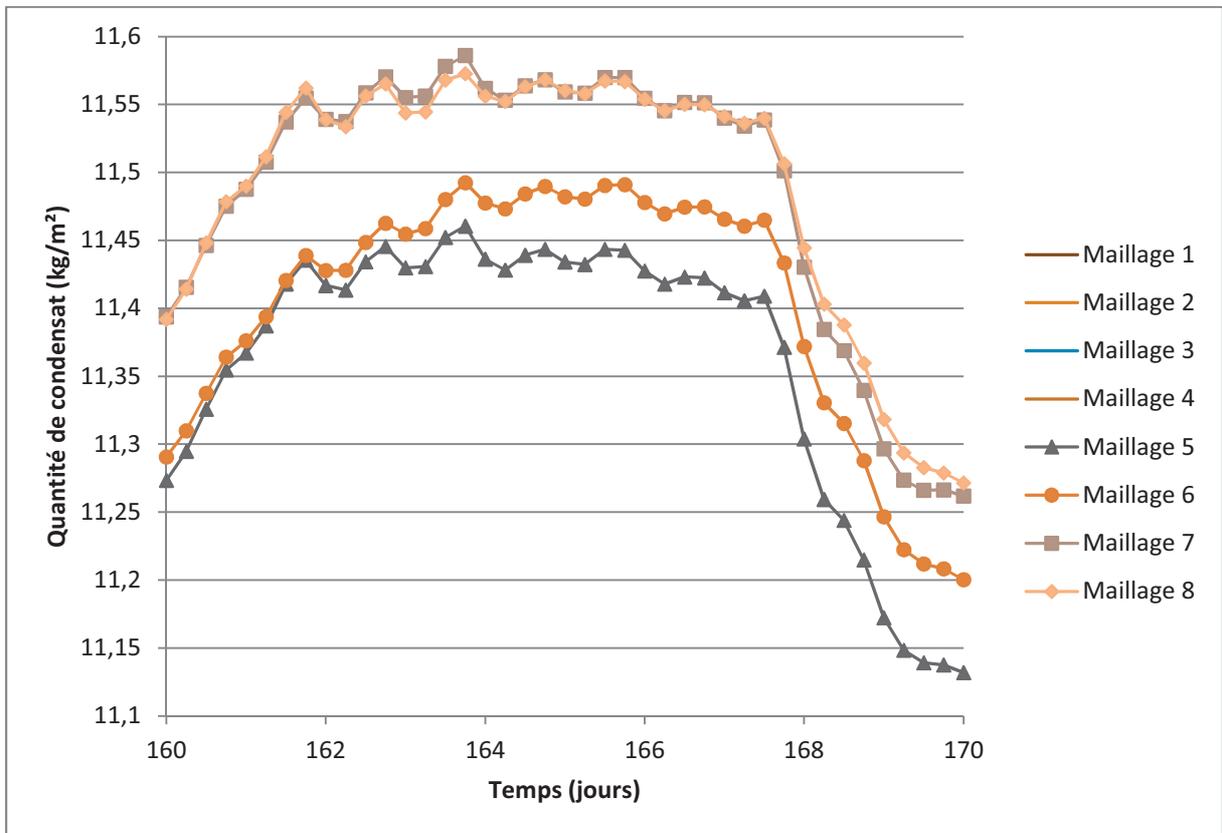
L'humidité relative converge rapidement quelque soit le maillage.

Pour les maillages équidistants, il faut atteindre une finesse de division en 50 éléments pour faire converger les résultats du calcul du condensat et de la teneur en eau totale. Alors que les résultats convergent rapidement pour des maillages variables, quelque soit leur coefficient d'étirement.

La quantité de condensat et la teneur en eau totale sont les critères les plus contraignants à faire converger. Ci-dessous, le Graphique 1 reprend la quantité de condensat dans le temps en fonction du maillage et le Graphique 2 fait un zoom pour mieux voir les convergences. Les autres graphiques se trouvent en annexes. A priori le maillage 5 possède les éléments les plus fins et donc la précision de calcul est la meilleure. Mais la finesse des maillages 7 et 8 paraissent les plus adaptés au calcul par rapport au principe d'étirer le maillage. De plus, les temps de calculs ne sont pas raisonnables avec des maillages du type 5.



Graphique 1 : Quantité de condensat pour les différents maillages



Graphique 2 : Quantité de condensat pour les différents maillages - Zoom entre le jour 150 et le jour 170 sur 4 maillages

1.4.2. Hypothèses de modélisation du maillage

D'après les résultats de ces essais, des hypothèses de modélisation ont été établies.

Calcul 1D

Pour le calcul unidimensionnel, le maillage est défini pour les épaisseurs de 15 à 25cm comme étant variable avec un coefficient d'étirement de 115. Pour les couches d'épaisseur de 5 à 10cm, le coefficient d'étirement est de 125. Les éléments les plus fins de ces maillages sont de 2,5mm de large. Pour le plâtre d'épaisseur 1cm, l'élément est maillé en quatre éléments de même épaisseur. Le pare vapeur de 0,1cm n'est pas discrétisé.

Calcul 2D

Le maillage en deux dimensions respecte les mêmes principes. La procédure de validation devrait être effectuée pour chaque configuration de calcul. Dans le cadre de cette analyse, les principes validés en 1D ont été appliqués.

Les ponts thermiques sont modélisés avec des prolongements de 1m de part et d'autre pour les planchers et murs afin de ne plus ressentir les effets du pont thermique, principe repris de la norme (NF EN ISO 10211 s.d.). Ces prolongements sont maillés plus grossièrement puisque l'étude ne s'y intéresse pas. Le maillage s'affine proche du pont thermique.

Pour la configuration de plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur, la dalle est définie longitudinalement par l'axe X et perpendiculairement à cela le mur suit l'axe Y. La dalle est maillée selon X par des éléments de 10cm d'épaisseur sur 90cm. Au contact du mur, le dernier élément de 10cm est affiné par un maillage variable avec coefficient d'étirement de 125 vers la gauche. Pour l'élément de dalle posé sur le mur, la finesse est celle du mur. L'épaisseur de dalle est elle aussi maillée de manière variable vers le bas avec un coefficient d'étirement de 125 selon Y. Pour le mur, les éléments sont maillés en éléments de 10cm de haut pour les hauteurs de 0 à 80cm, pour l'axe Y. Le maillage est affiné sur les 20cm qui restent par un maillage variable avec coefficient d'étirement 125 vers le haut.

1.4.3. Interfaces

La notion d'interface entre deux matériaux est complexe à aborder dans ce type de simulation puisque les calculs sont faits en milieu de maille. Pour être juste, il faudrait définir une surface délimitant les deux matériaux. Mais des essais ont été faits avec la mise en place de petits volumes très fins d'air ou de vide et les résultats ne sont pas concluants. Pour représenter au mieux cette notion, il vaut mieux affiner le maillage au contact entre deux matériaux, regarder ce qu'il se passe dans les deux couches de matériaux et conclure sur la situation la plus défavorable par rapport au matériau ou au condensat par exemple.

Les critères tels qu'ils ont été définis n'emploient pas cette notion. Sera tout de même contrôlée l'humidité relative aux différentes interfaces entre les matériaux pour voir si elles sont bien le lieu favorable de condensation.

De manière générale, l'isolant est toujours le lieu le plus défavorable au niveau de l'interface pour les risques liés à l'humidité par rapport au béton et au plâtre, excepté quand l'isolant ne possède ni diffusivité de vapeur ni conductivité de vapeur, comme c'est le cas du polyuréthane par exemple. Auquel cas, il faudra regarder l'interface dans le béton ou dans le plâtre.

1.5. Temps

De la même manière que pour le maillage géométrique des parois, le pas de temps des calculs doit être le plus fin et pertinent possible pour autant alourdir la simulation dynamique.

Les calculs s'effectuent à partir du 1^{er} octobre 2000 sur 1an. Il faut commencer le calcul à une date où il n'y a pas de condensat. Sinon, les résultats sur la première année ne sont pas fiables. Reprenons la paroi précédente avec un maillage variable pour chaque composant ayant pour coefficient 125.

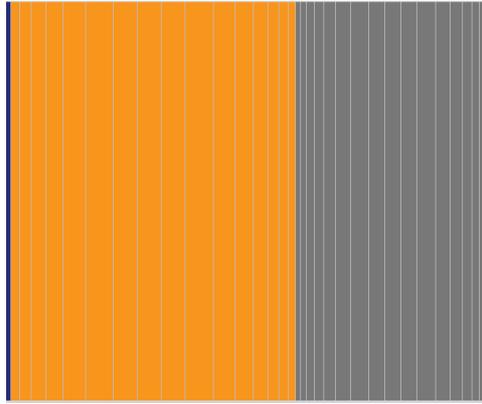
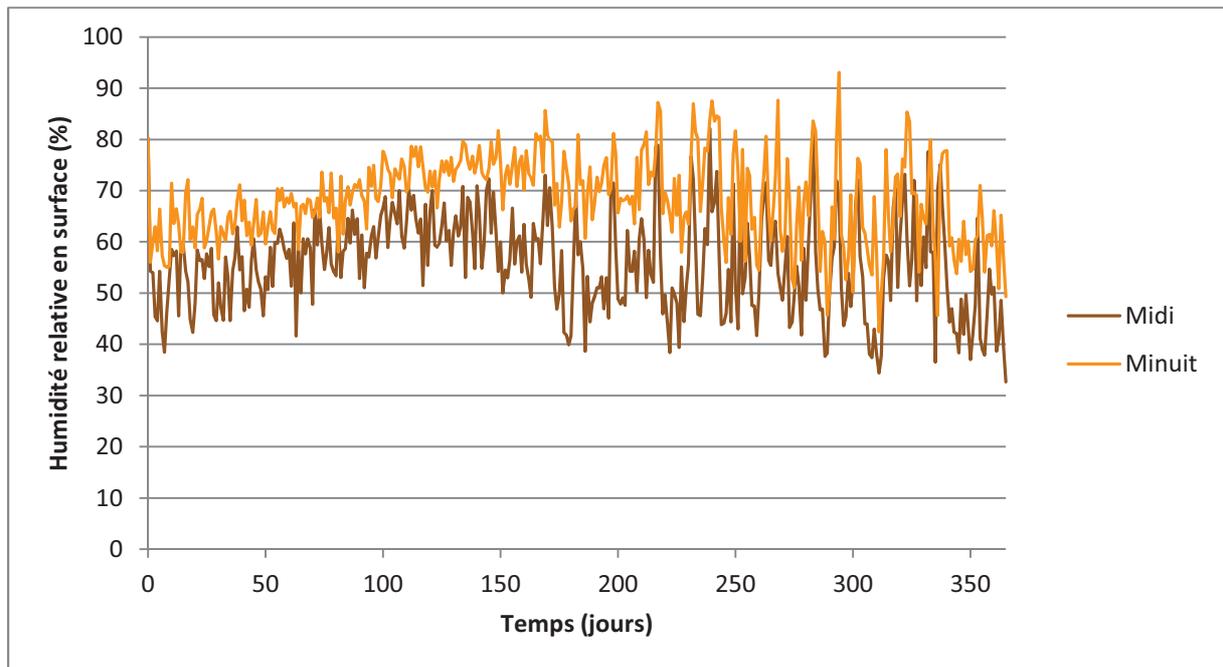


Figure 24 : Paroi composée modélisée sous Delphin pour validation du pas de temps

1.5.1. Influence de l'heure de début de calcul

Le calcul peut commencer à n'importe quelle heure de la journée. Cela pourra avoir une influence dans les cas où seul un calcul par jour est effectué par exemple. Le pas de temps est réglé à 24h et le début du calcul à 12h puis 00h.

Le paramètre le plus influencé par cette variation est l'humidité relative en surface. En moyenne, elle est supérieure pour les calculs effectués à minuit par rapport à ceux faits à midi. La nuit, les températures sont plus basses que la journée mais comme cette diminution se fait généralement par radiation côté extérieur, l'humidité absolue reste quasi constante. D'après les équations [1.1] et [1.2], la pression de saturation augmente avec la température, donc pour un taux d'humidité d'air constant dans l'atmosphère, l'humidité relative diminue d'après l'équation [3.2]. Côté intérieur, l'application des hypothèses de modélisation (T_{int} et bâtiment de classe 4) et le calcul normatif mènent au même résultat. Il est illustré sur le Graphique 3 ci-dessous. Pour s'affranchir de cette influence, le mieux est d'effectuer plusieurs calculs par jour. Les autres courbes sont en annexe.



Graphique 3 : Humidité relative en surface - Influence de l'heure de début de calcul

1.5.2. Influence du pas de temps

Connaissant cette première influence, il faut régler la finesse du pas de temps.

Les données météo du climat extérieur sont horaires, il ne sera pas possible de descendre en dessous sans passer par des interpolations. Pour les calculs effectués sur 5 ou 10 ans, cela demande beaucoup de manipulations, d'interprétations et d'hypothèses.

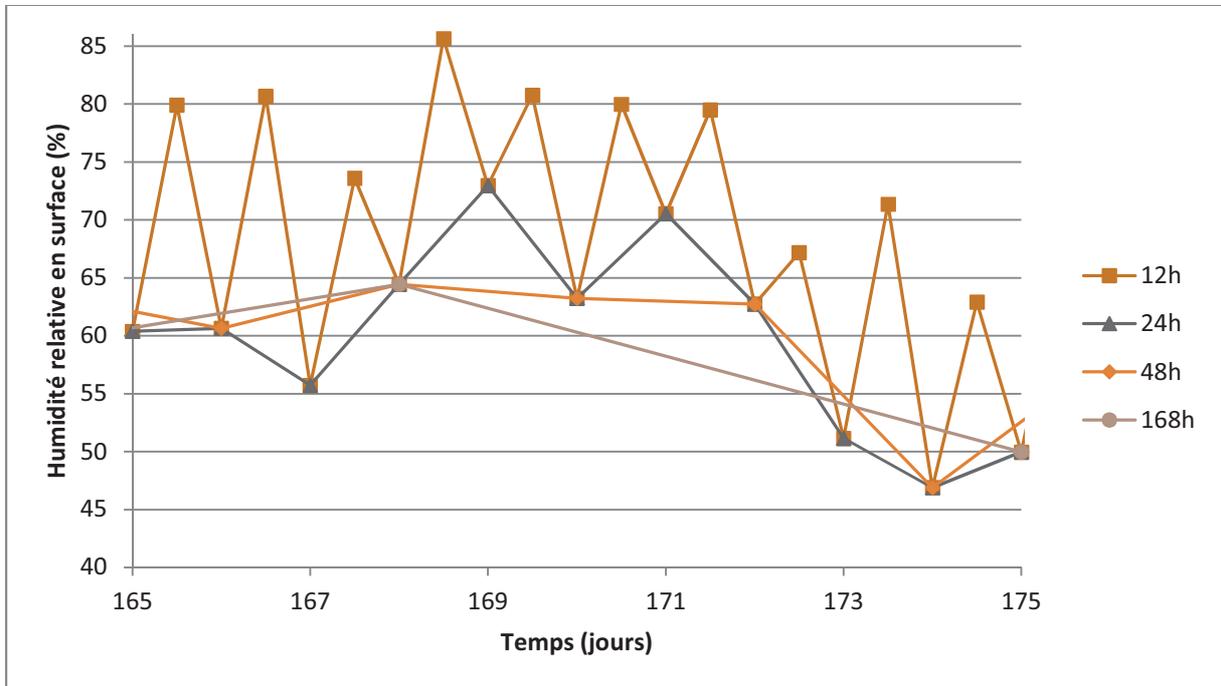
Malgré ce qui a été vu précédemment, seront essayé des pas de temps grossiers avec des calculs débutant à midi pour pouvoir les comparer entre eux. En effet, il est expliqué dans la littérature que les phénomènes hygrothermiques sont lents, se pose alors la question de la précision nécessaire de calcul. Le Tableau 12 ci-dessous reprend les pas de temps essayés pour la validation.

Calcul effectué ...	Δt (pas de temps de calcul)
... toutes les heures	1h
... toutes les 3heures	3h
... toutes les 6heures	6h
... 2 fois par jour	12h
... 1 fois par jour	24h
... 1 fois tous les 2jours	48h
... 1 fois par semaine	168h

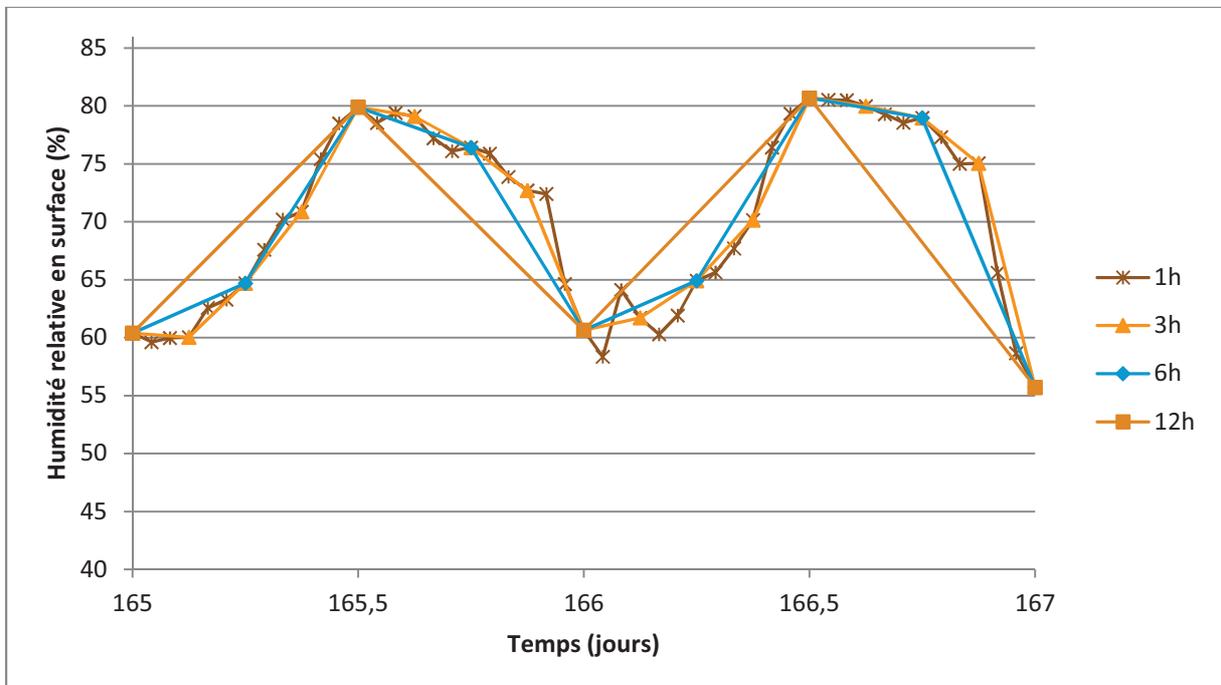
Tableau 12: Définition des pas de temps pour essais

Les résultats montrent que la finesse du pas de temps ne modifie pas beaucoup les calculs. Seule l'humidité relative de surface peut perdre en informations, à voir sur le Graphique 4 ci-dessous. En effet, ici, comme le calcul se fait tous les midis pour les pas de temps de 24h, 48h et 168h, les valeurs prises en considérations sont à chaque fois les plus basses. Entre ces valeurs, il s'agit d'interpolations linéaires. Par rapport à la limite des 80% fixée pour le risque de moisissures en surface, il peut y avoir

des épisodes qui ne seront pas pris en compte avec ce calcul. Inversement, si le calcul se fait de manière défavorable, en prenant les valeurs hautes, alors le risque sera peut-être surévalué. Si les calculs sont faits plusieurs fois par jour, la fiabilité est bien meilleure. Le Graphique 5 montre qu'il suffit même de deux calculs par jour pour pouvoir conclure vis-à-vis du risque hygrothermique.



Graphique 4 : Humidité relative en surface en fonction du pas de temps de calcul – Zoom entre les jours 165 et 175 pour des pas de temps grossiers



Graphique 5 : Humidité relative en surface en fonction du pas de temps de calcul - Zoom entre les jours 165 et 167 pour plusieurs calculs par jour

1.5.3. Hypothèses de modélisation

Pour éviter l'influence du pas de temps sur les calculs et prendre une finesse suffisante mais pas trop lourde pour le logiciel, le pas de temps employé est de 6 heures. Tous les calculs débuteront au 1^{er} octobre.

Pour les parois à une dimension, le calcul sera fait sur 10 ans. Ce calcul prend environ 3min pour le logiciel (hors modélisation). En revanche, avec les simulations 2D, comme le maillage devient lourd pour le logiciel, en prenant ces paramètres de calcul, le logiciel calcul pendant plus de 10h. L'amplitude est réduite à 5ans. Cela permet de voir tout de même quelques cycles saisonniers et d'avoir la tendance générale dans le temps. Dans ces conditions, le logiciel prend deux fois moins de temps pour calculer. Avec la prise en compte des géométries, 2h30 de calcul seront nécessaires au final pour chaque cas en deux dimensions.

2. Etudes de cas

Une fois toutes les hypothèses posées, il est possible de passer aux études de cas.

2.1. Etude 1D : parois composées

Pour commencer cette analyse d'études de cas, de simples compositions de parois ont été étudiées de manière unidimensionnelle. Ces cas permettent de tester les différentes méthodes et d'en montrer leurs limites. Elles permettent aussi de vérifier des règles de bonne pratique. Il s'agit dans tous ces cas de parois définies selon les hypothèses vues ci-dessus. La structure du mur est en béton armé d'une épaisseur 15cm, l'isolant est une laine minérale dont l'épaisseur et la position varieront et la finition se fait par 1cm de plâtre.

2.1.1. Cas 1 : Isolation par l'extérieur (15cm)

Le premier cas étudie une paroi en béton isolée par l'extérieur par 15cm en laine minérale.

Pour cette configuration, les méthodes statiques ne détectent aucun risque lié à l'humidité. Confirmé par les méthodes dynamiques, les différents indicateurs ne dépassent aucune des limites fixées.

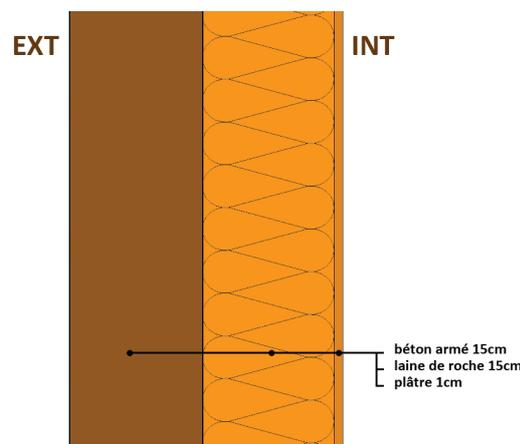


Figure 25 : Cas 1 - Illustration

Globalement, la teneur en eau totale, w_{tot} , a tendance à diminuer dans le temps, ce qui est favorable. Des dépassements de l'humidité relative à 80% d'humidité relative sur la surface intérieure sont

parfois observés, il s'agit de courts épisodes qui ne durent jamais au-delà des 5 jours consécutifs fixés comme limite. Cela est dû à la prise en compte d'un environnement défavorable de cuisine. Pour ce qui est des interfaces, le comportement ne prête à aucune conclusion vis-à-vis d'un risque lié à l'humidité. Concernant la résistance thermique, elle ne présente pas de fortes variations. La prise en compte de l'humidité donne tout de même une diminution de 3% en moyenne par rapport au calcul statique (environ $0,1 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$). Par rapport à notre limite fixée à 10%, cela apparaît encore acceptable.

2.1.2. Cas 2 : Isolation par l'intérieur (15cm)

L'isolation est passée maintenant côté intérieur et toujours de 15cm. En statique, le calcul du f_{RSi} ne montre pas de risque. Aucun pont thermique n'est considéré ici, c'est pour cela que cette méthode est validée. Dans la pratique, en isolation par l'intérieur, les ponts thermiques sont courants et ce seront des lieux préférentiels à la formation de moisissures, études effectuées ci-après.

En calcul dynamique, l'humidité relative intérieure se comporte quasiment comme dans le cas précédent. L'épaisseur d'isolant est toujours la même, seule sa position varie. Le gradient de température reste globalement le même entre l'intérieur et l'extérieur (cf chapitre 2, les équations des conditions aux limites 1.5.2 et 4.1.4

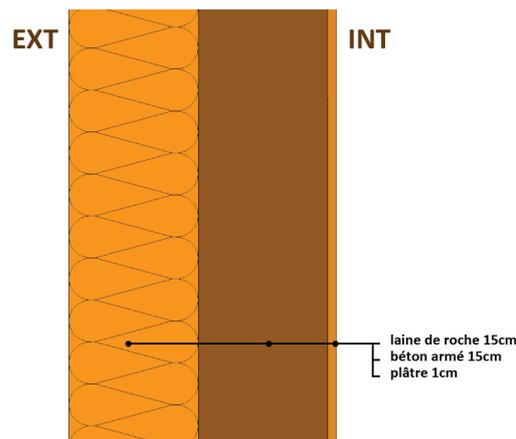


Figure 26 : Cas 2 - Illustration

La méthode de Glaser prévoit de la condensation interne en hiver avec évaporation totale sur une année. Le maximum de condensat accumulé à $9,2 \text{ kg}/\text{m}^2$, environ 6 fois supérieur à la limite acceptable (1% du volume de la couche d'isolant, soit $1,5 \text{ kg}/\text{m}^2$). Cette configuration n'est donc pas acceptable selon cette méthode.

Pour ce qui est de la simulation dynamique, le condensat s'accumule et s'évapore aussi complètement sur une année. En revanche la quantité maximale accumulée n'atteint que $3,7 \text{ kg}/\text{m}^2$, mais reste largement au dessus des $1,5 \text{ kg}/\text{m}^2$ (2,5 fois supérieur).

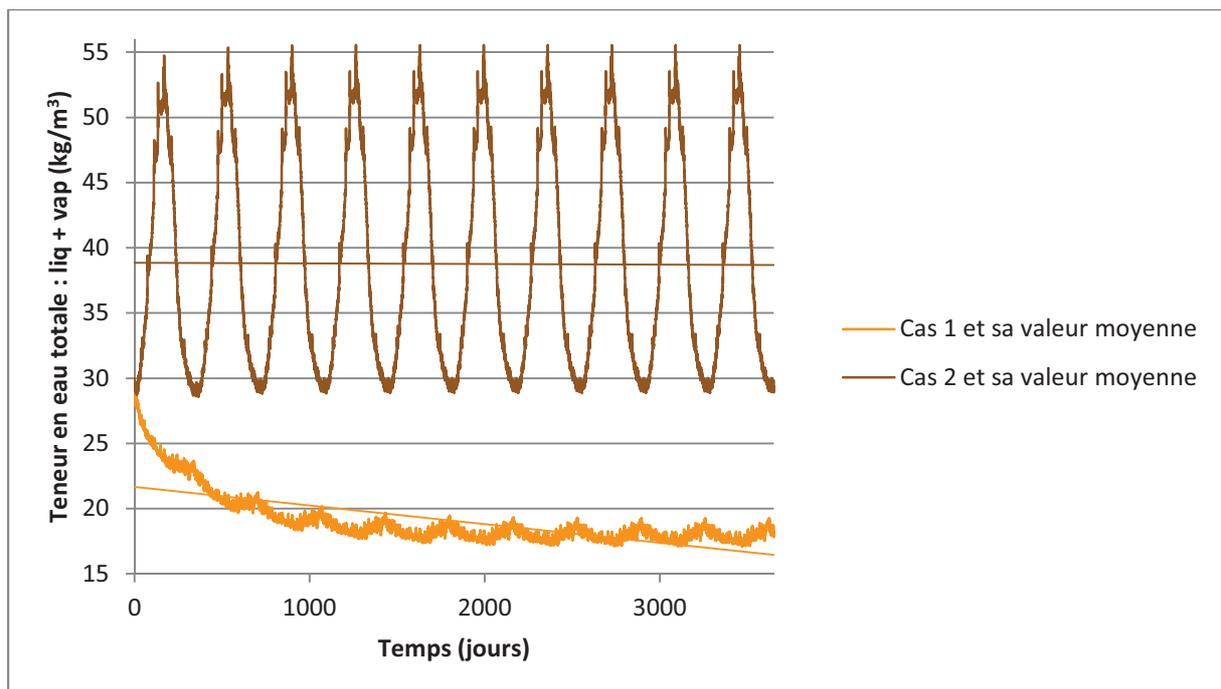
A l'interface entre le béton et l'isolant, l'humidité relative dépasse 80% pendant quasiment 60% de l'année, de manière consécutive en hiver. La saturation est atteinte quasi tout ce temps, correspondant à la quantité de condensat. Au printemps, quand cette humidité relative diminue, c'est à l'interface entre le plâtre et l'isolant que l'humidité relative augmente et dépasse les 80%

pendant 15 jours successifs. Pour autant, il n'y a jamais condensation et il n'y a pas de conclusion possible par rapport à ce dépassement.

La résistance thermique de l'isolant perd jusqu'à 15% d'efficacité en hiver (pendant plus de 60% de l'année totale), au dessus des 10% acceptables fixés par les critères.

La teneur en eau totale suit des cycles saisonniers mais reste en moyenne stable. Par rapport au cas précédent, il s'agit d'une situation plus défavorable. En effet, si un évènement accidentel venait à se produire chargeant la structure en eau, l'évaporation de celle-ci serait difficile.

Pour conclure, cette composition de paroi n'est pas acceptable vis-à-vis des risques liés à l'humidité.



Graphique 6 : Teneur en eau totale - Comparaison des parois des cas 1 et 2

2.1.3. Cas 3 : isolation par l'intérieur (25cm)

Le cas 3 est un cas théorique qui se rencontre rarement dans la pratique. Il va servir à montrer les limites des méthodes statiques. Il s'agit du même cas que précédemment excepté que l'isolant intérieur a une épaisseur de 25cm maintenant.

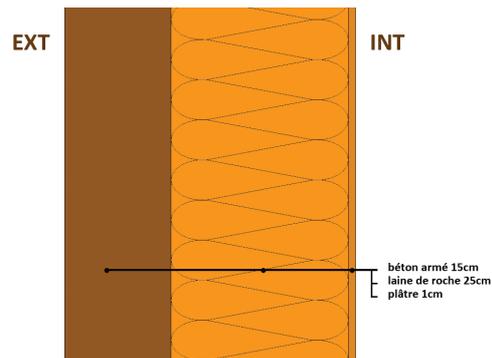


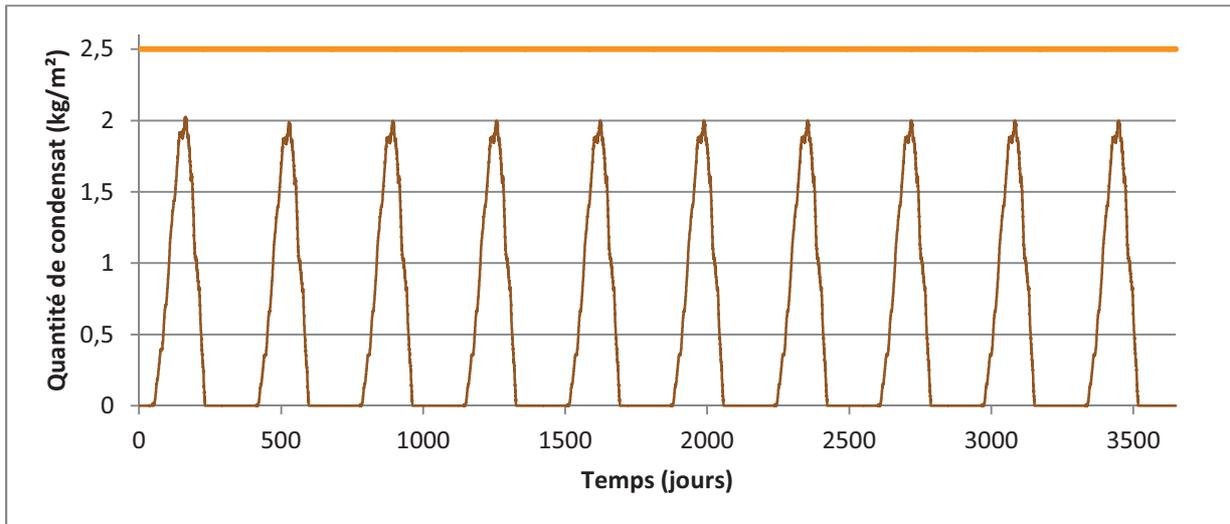
Figure 27 : Cas 3 - Illustration

Les méthodes statiques prévoient la même chose que précédemment, à savoir aucun risque de formation de moisissures superficielles et un risque de condensation interne. Vis-à-vis du calcul du f_{RSi} , il paraît logique qu'il n'y ait pas de risque. En effet, dans le cas 2 précédent il n'y avait pas de risque et la résistance thermique de la paroi était plus faible (moins d'isolant). D'après la formule [20.2], au plus la résistance de la paroi augmente, au plus f_{RSi} augmente et donc s'éloigne de la valeur limite pour des conditions hygrothermiques données. Le risque de formation de moisissures diminue avec l'augmentation d'isolation, si seul ce paramètre varie.

Pour le risque de condensation interne, la quantité de condensat maximum accumulée vaut maintenant 6 kg/m^2 . Comme le volume d'isolant augmente, la valeur limite de condensat n'est plus à $0,5 \text{ kg/m}^2$ mais $2,5 \text{ kg/m}^2$. Cette limite est dépassée avec le calcul de Glaser. Il y a un risque de condensation interne. Le taux de condensat diminue par rapport au cas 2 précédent, car la résistance à la vapeur d'eau augmente, diminuant ainsi la quantité de flux de vapeur d'eau et donc la quantité de condensat (cf Notions de base, définition de la perméance + équation [24]).

Le calcul dynamique montre que la quantité de condensat est en réalité acceptable puisqu'elle monte maximum à 2 kg/m^2 ($< 2,5 \text{ kg/m}^2$). Cet indicateur est validé alors qu'il ne l'était pas par la méthode de Glaser, du aux hypothèses et marges prises. Le calcul sur Delphin est plus précis. Cette méthode statique est sécuritaire et peut détecter des risques où il n'en existe pas.

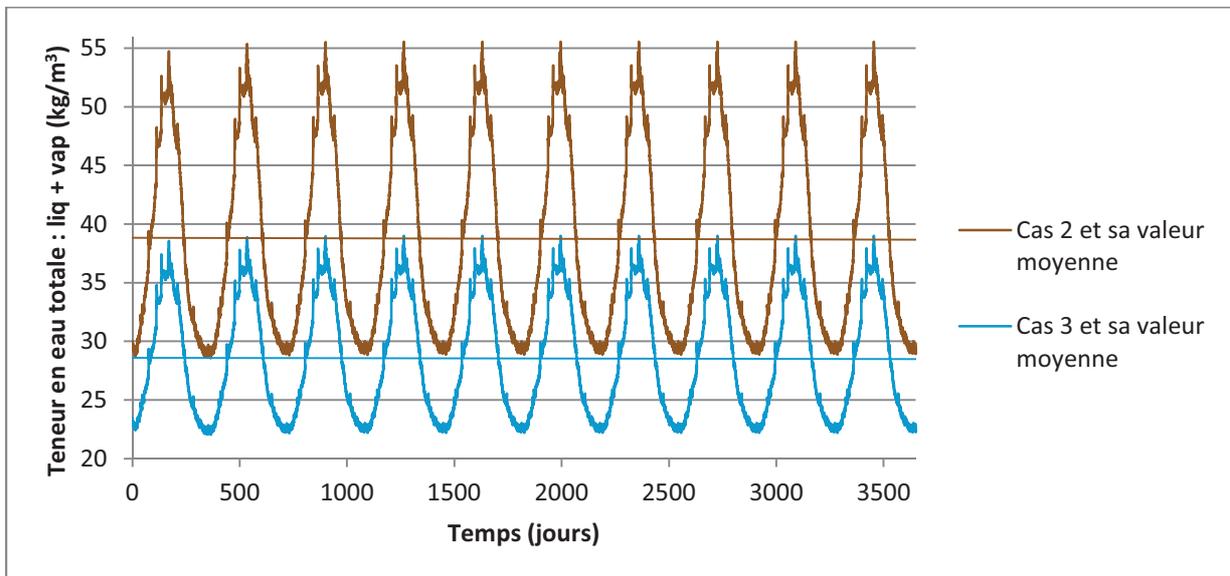
L'humidité relative aux interfaces confirme le taux de condensat. Au niveau de l'interface entre l'isolant et le béton, elle dépasse les 80% consécutivement pendant 62% de l'année en hiver atteignant la saturation la plupart de ce temps. Derrière le plâtre, il y a un épisode tous les ans à la mi-mai où l'humidité relative dépasse 80% pendant 5 jours consécutifs. Il n'y a pas trop d'inquiétude à avoir là.



Graphique 7 : Quantité de condensat - Cas 3 : Isolation par l'intérieur 25cm

La résistance thermique perd en efficacité l'hiver jusqu'à 11% par rapport au calcul effectué en statique à sec. La limite des 10% est donc dépassée. Proportionnellement, la perte en résistance est plus faible par rapport au cas précédent. Ajouter de l'isolant augmente la résistance à la diffusion de vapeur (équation [7.2]). Il y a donc moins de flux qui pénètre et qui peut altérer la résistance thermique de l'isolant.

La teneur en eau totale se comporte de la même manière que le cas où il n'y a que 15cm d'isolant intérieur mais avec des valeurs en moyenne inférieure de 10 kg/m^3 et des amplitudes plus faibles. Cela est dû aussi à la moindre quantité de flux qui peut passer.



Graphique 8 : Teneur en eau totale – Comparaison des parois des cas 2 et 3

2.1.4. Cas 4 : isolation par l'intérieur (15cm) et pare vapeur

Le dernier cas de cette première analyse est un cas pratiqué couramment dans le bâtiment. Il s'agit d'une paroi isolée par 15cm de laine minérale à l'intérieur avec la mise en place d'un pare vapeur entre la finition et l'isolant. Les règles de bonne pratique préconisent la mise en place du pare vapeur à l'intérieur de la paroi pour éviter la condensation interne, confirmé par les méthodes statiques. En effet, le flux de vapeur d'eau va de l'ambiance chaude vers le froid, à savoir de l'intérieur vers l'extérieur dans une situation hivernale. Donc il vaut mieux arrêter le flux avant qu'il n'entre dans la paroi et si celui-ci peut passer, il faut éviter qu'il ne rencontre une barrière à l'intérieur de la paroi où il aurait l'opportunité de condenser.

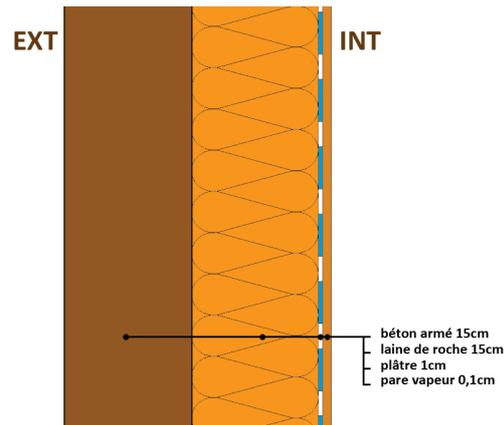
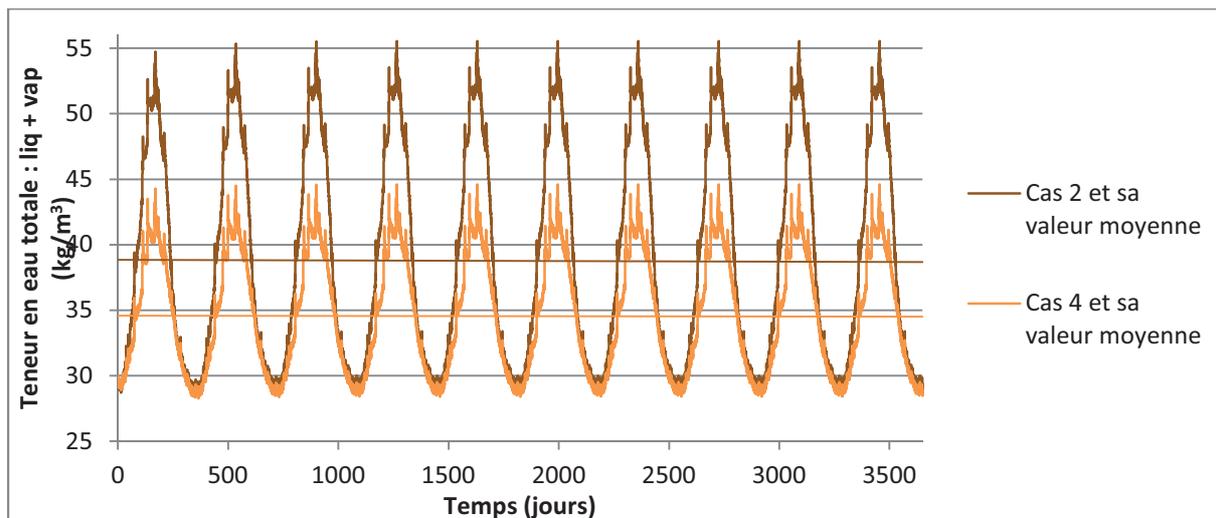


Figure 28 : Cas 4 - Illustration

En dynamique, les propriétés de non conductivité liquide ni diffusivité de la vapeur du pare vapeur ont un effet de barrière vis-à-vis de l'isolant qui ne peut plus autant se charger en eau. Les transferts de vapeur d'eau liquide et vapeur décrits par les lois de Darcy et Knüdsen deviennent négligeables (cf chapitre 2, paragraphe 1.3) Le calcul montre que le taux de condensat est bien en dessous des limites. Sur une année complète, il s'annule et atteint le maximum de $0,8\text{kg/m}^2$ alors que la limite est à $1,5\text{kg/m}^2$. La teneur en eau totale diminue significativement en hiver par rapport au cas où il n'y a pas de pare vapeur. Il y a toujours des pertes en efficacité de la résistance thermique mais elles deviennent acceptables (maximum de 9%). Il faudrait tout de même en tenir compte dans les calculs réglementaires.

Derrière le pare vapeur, l'humidité relative augmente en été et dépasse les 80% pendant 22% de l'année, de manière consécutive, sans condensation. Cette configuration est à surveiller et peut paraître limite sur ce paramètre. A la surface, l'humidité relative passe au dessus des 80% ponctuellement et il n'y a pas de risque détecté, comme pour les cas précédents.



Graphique 9 : Teneur en eau totale – Comparaison des parois des cas 2 et 4

2.1.5. Isolation mixte

L'isolation mixte consiste à mettre une partie de l'isolation du côté intérieur de la structure et une partie du côté extérieur. C'est une solution dont la mise en œuvre est fréquente en France. C'est un compromis permettant de traiter en partie les ponts thermiques de manière plus ou moins efficace. Cette solution n'est pourtant pas exempte de risque hygrothermique. La règle de bonne pratique pour s'en affranchir est de mettre un tiers d'isolant à l'intérieur et deux tiers à l'extérieur, appelée règle des 1/3 - 2/3. Le béton a une très forte résistance à la diffusion de vapeur ($\mu=110$). Il joue quelque part le rôle de pare vapeur dans cette configuration, retenant le flux de traverser la paroi en hiver. Au vu du cas 4, c'est pour cela qu'il vaut mieux que le béton soit proche de la surface.

Dans tous les cas qui suivront, la structure est un béton armé de 15cm d'épaisseur et la finition en plâtre de 1cm. Il n'y a pas de pare vapeur. L'isolant, une laine minérale, aura toujours au total une épaisseur de 15cm mais sa répartition dans les couches du mur variera. Les hypothèses générales s'appliquent ici aussi.

a. Méthode de Glaser

La méthode de Glaser est relativement rapide à appliquer. Pour vérifier la règle des 1/3 - 2/3, incrémentons la répartition de l'isolant cm par cm pour passer d'une isolation intérieure à une isolation extérieure. Le cas où il y a autant d'isolant côté intérieur qu'extérieur est ajouté à l'étude. Les résultats sont repris synthétiquement dans le Tableau 13 ci-dessous.

Dans tous ces différents cas, le calcul de f_{RSi} est le même puisqu'il ne dépend pas de la répartition de l'isolant dans la paroi mais uniquement de la résistance thermique globale de celle-ci. Il ne prévoit aucun risque.

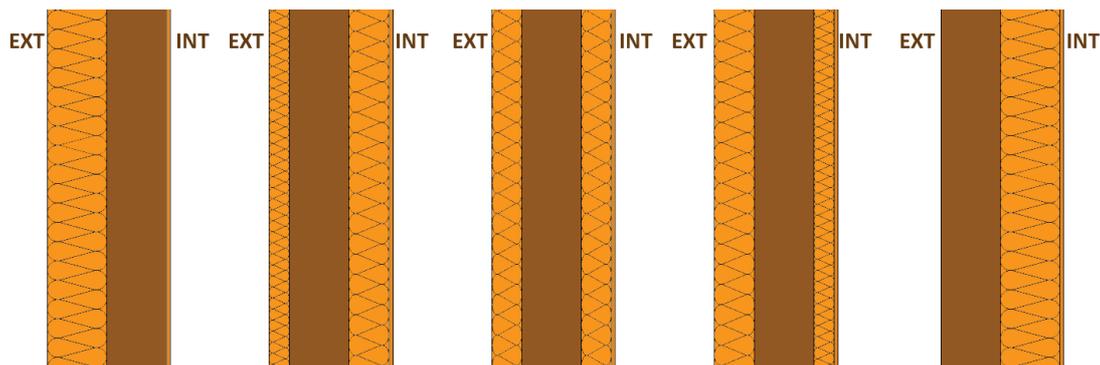


Figure 29 : Isolation mixte - Illustration de l'incrémentation

Epaisseur d'isolation (cm)		Risque ?	Condensat		
Côté intérieur	Côté extérieur		Maximum accumulé (kg/m ²)	Début de condensation	Fin d'évaporation
15	0	Oui	9,2	Novembre	Août
14	1	Oui	8,4	Novembre	Août
13	2	Oui	7,3	Novembre	Juillet
12	3	Oui	6,2	Novembre	Juillet
11	4	Oui	5,0	Novembre	Juin
10	5	Oui	4	Novembre	Juin
9	6	Oui	2,8	Novembre	Mai
8	7	Oui	1,8	Décembre	Avril
7,5	7,5	Oui	1,4	Décembre	Avril
7	8	Oui	0,85	Décembre	Mars
6	9	Oui	0,18	Janvier	Mars
5	10	Non	-	-	-
4	11	Non	-	-	-
3	12	Non	-	-	-
2	13	Non	-	-	-
1	14	Non	-	-	-
0	15	Non	-	-	-

Tableau 13 : Méthode de Glaser sur l'isolation mixte - Variations de la répartition de l'isolant dans la composition de paroi

La règle des 1/3 – 2/3 est tout à fait justifiée par la méthode de Glaser pour ce cas d'étude si aucune tolérance n'est prise vis-à-vis de la quantité de condensat. Le rôle de barrière à la vapeur d'eau du béton se comprend ici. La zone de condensation se situe entre le béton et l'isolant intérieur.

Les critères employés par le projet de norme (SIA180 2012) limitent le taux de condensat à 1% du volume de la couche d'isolant, ici l'isolant intérieur. Cela rend juste le cas 6cm intérieur et 9cm extérieur acceptable.

Cependant ces résultats sont nuancés en fonction des taux hygrothermiques des ambiances intérieures et extérieures. Un comparatif a été fait avec un climat du nord connu pour être plus humide, il s'agit d'Uccle en Belgique, tout autre paramètre inchangé. Cette étude montre que s'il y a très peu d'isolant à l'intérieur, la structure ne valide pas les critères de la méthode de Glaser. L'eau condensée ne s'évapore pas sur une année complète. De plus, les taux de condensat sont plus

élevés. La règle à suivre serait plutôt du type 7/15 -8/15. Ce qui est plus défavorable qu'à Lyon mais toujours en faveur de la règle de bonne pratique. Pour aggraver la situation, en plus d'être à Uccle, la température de l'air intérieur est en moyenne diminuée de 1°C. L'humidité relative intérieure augmente (cf équations [1.1] et [1.2]). La règle du 1/3 – 2/3 est tout à fait d'application dans ce cas. Les tableaux récapitulatifs de ces deux études sont en annexe.

Revenons au cas initial à Lyon. Maintenant que les tendances générales ont été dégagées, une étude dynamique ciblée est intéressante. Pour regarder ce qu'il se passe dans la zone limite de condensation, trois cas ont été défini qui correspondent aux configurations suivantes :

Deux tiers d'isolant intérieur et un tiers extérieur

Moitié d'isolant à l'intérieur et l'autre moitié côté extérieur

Un tiers d'isolant intérieur et deux tiers côté extérieur

b. Cas 5: Isolation mixte - 10cm intérieur / 5cm extérieur

Le premier cas d'isolation mixte étudié concerne la mise en place de 10cm d'isolant à l'intérieur et 5cm à l'extérieur. Le calcul dynamique confirme la zone de condensation dans l'isolant intérieur avec des dépassements des limites fixées. Le taux de condensat suit des cycles avec des montées en hiver et une évaporation totale en été. L'humidité relative à l'interface entre le béton et l'isolant est très élevée en hiver mais n'atteint pas pour autant la saturation. Il y a là la question de la définition de l'interface qui se pose. Le condensat s'est accumulé dans tout l'isolant et non seulement en ce lieu. Côté extérieur, il y a une très faible quantité de condensat qui doit provenir des pluies battantes (cf chapitre précédent, équations dans la simulation prennent en compte la vitesse du vent et la pluie, paragraphe 4.1.4). Elle est tout à fait acceptable par rapport aux limites fixées.

Pour toutes les autres interfaces ainsi que la surface intérieure, l'humidité intérieure ne présente aucune situation inquiétante.

La résistance thermique varie assez fortement, jusqu'à moins 9,7% d'efficacité par rapport au calcul thermique pur, proche de la limite des 10% fixée. En moyenne sur une année, elle perd 0,21 m².K/W, soit 5%.

La teneur en eau totale suit des cycles saisonniers atteignant son maximum fin février. Elle diminue les deux premières années de 2,7 kg/m³ en moyenne puis se stabilise autour d'une valeur moyenne.

c. Cas 6: Isolation mixte - 7,5cm intérieur / 7,5cm extérieur

La répartition de l'isolant dans cette étude de cas est équitable entre intérieur et extérieur.

La statique prévoyait des risques de condensation inacceptables. Ceci n'est pas confirmé par le calcul dynamique. Les quantités de condensat dans l'isolant qu'il soit intérieur ou extérieur sont tout à fait en dessous des limites fixées par le critère du projet de norme (SIA180 2012). Il n'y a pas de différence notable sur le comportement de l'humidité relative par rapport au cas 5. La résistance thermique perd moins en efficacité en hiver, jusqu'à 7,6%. Mais en moyenne, son efficacité est moins bonne par rapport au cas précédent : pertes à 0,23 m².K/W en moyenne, soit 5,5%.

Pour ce qui est de la teneur en eau totale, elle suit le même comportement avec des cycles saisonniers et une diminution moyenne de 4 kg/m³ sur les trois premières années. En moyenne, elle est plus faible de 3,6 kg/m³ par rapport au cas précédent. Le rôle du béton comme barrière à la vapeur d'eau commence à prendre son sens ici.

La règle du 1/3 – 2/3 est sécuritaire par rapport à ce cas ci.

d. Cas 7: Isolation mixte - 5cm intérieur / 10cm extérieur

Le dernier cas d'étude d'isolation mixte se concentre sur la mise en place d'un tiers d'isolant intérieur et du reste à l'extérieur.

Il n'y a plus du tout de condensat dans l'isolant intérieur. Et côté extérieur, il y a la même quantité que précédemment. La thèse des pluies battantes est confirmée ici. L'humidité relative est globalement plus faible aux interfaces mais il n'y a pas de différence significative pour ce cas.

La résistance thermique ne perd quasiment plus d'efficacité entre l'été et l'hiver. Elle ne subit des variations que de l'ordre de 0,1 m².K/W. Par rapport au calcul de thermique pur, il faut tout de même prendre en compte une dégradation en moyenne de 0,13m².K/W, soit 3%.

La teneur en eau totale se comporte quasiment comme l'isolation par l'extérieur avec une très forte diminution sur les trois premières années (6kg/m³) puis une stabilisation. Elle est aussi inférieure en moyenne de 3kg/m³ par rapport au cas précédent pour les raisons précitées.

En surface intérieure, il n'y a pas de différence entre ces trois cas parce que le gradient de température et de pression de vapeur reste le même entre les surfaces intérieures et extérieures.

2.1.6. Conclusions

La meilleure solution pour isoler une maçonnerie ou une structure en béton est l'isolation par l'extérieur. Elle ne présente aucun risque hygrothermique. De plus, le traitement des ponts thermiques est beaucoup moins problématique que pour l'isolation par l'intérieur. Les autres méthodes constructives montrent soit des risques francs, soit certains paramètres sont limités.

L'isolation mixte avec plus d'isolant côté extérieur qu'intérieur est une solution acceptable. L'isolation par l'intérieur avec la mise en place d'un pare vapeur donne les mêmes résultats. Elle ne présente pas de risque mais par rapport à l'isolation par l'extérieur la teneur en eau ne diminue pas franchement. En cas de surcharge hygrothermique imprévue, la structure risque de ne pas se décharger de son surplus. Si la mise en œuvre de l'étanchéité à l'eau et à l'air ne présente pas de défaut dans sa conception ni son exécution, alors pourquoi mettre cette solution de côté ?

Le Tableau 14 reprend synthétiquement les résultats obtenus pour ces différentes études de cas. Il permet donc de comparer rapidement les méthodes de calcul. Il y a un réel manquement en statique pour évaluer les indicateurs de résistance thermique, R_{th} , et de teneur en eau totale, w_{tot} . Surtout pour le calcul de résistance thermique qui peut avoir un gros impact par rapport au calcul thermique pur. Une évaluation simplifiée ou l'intégration d'une dégradation systématique serait utile.

La méthode du f_{RSi} apparaît tout à fait fiable pour ces études à une dimension.

Pour des cas limites tels que le cas 3 (25cm d'isolation par l'intérieur) ou le cas 6 (isolation mixte 7,5cm à l'intérieur et à l'extérieur), la statique prédisait un risque qui n'existe pas en dynamique. L'évaluation de la quantité de condensat peut poser problème. Celle-ci se contredit entre les calculs effectués par Glaser et par Delphin. Ceci est dû aux hypothèses très simplificatrices dans la méthode de Glaser (calcul mensuel, ...). La méthode de Delphin affine ce résultat par des hypothèses moins fortes et un calcul plus fin. Il n'est pour autant pas tout à fait juste, la tolérance n'est à ce jour pas connue. Mais ce calcul est considéré comme plus proche de la réalité et celui par Glaser comme très sécuritaire. Il faudra y penser pour l'intégration de ces méthodes dans le processus de conception.

La prise en compte des critères dynamiques permet d'aller plus loin dans les conclusions de manière générale. Ce qui paraît logique puisque, même si elles intègrent des hypothèses de calcul et quelques simplifications dans les équations, elles sont bien plus précises. Pour finir sur la critique des différentes méthodes, le niveau de complexité se répercute sur le temps de modélisation et de calcul des différents indicateurs. Il faut mettre cela en correspondance avec le résultat voulu.

Méthode	f_{RSi}		w_c			R_{th}	w_{tot}
	Statique	Dynamique	Statique	Dynamique		Dynamique	Dynamique
1 – Isolation par l'extérieur 15cm laine minérale	OK	OK	OK	OK		OK	↘
2 – Isolation par l'intérieur 15cm laine minérale	OK	OK	RISQUE	RISQUE		RISQUE	→
3 – Isolation par l'intérieur 25cm laine minérale	OK	OK	RISQUE	OK		RISQUE	→
4 – Isolation par l'intérieur 15cm laine minérale+ pare vapeur	OK	OK	OK	OK		OK	→
				Isolation intérieure	Isolation extérieure		
5 – Isolation mixte 10cm intérieur / 5cm extérieur	OK	OK	RISQUE	RISQUE	OK	OK	→
6 – Isolation mixte 7,5cm intérieur / 7,5cm extérieur	OK	OK	RISQUE	OK	OK	OK	→
7 – Isolation mixte 5cm intérieur / 10cm extérieur	OK	OK	OK	OK	OK	OK	→

Tableau 14 : Comparatif des résultats du risque de condensation interne - OK = pas de risque détecté

2.2. Etude 2D : Ponts thermiques

Pour passer à l'étude en deux dimensions, il est intéressant d'étudier les ponts thermiques. Ce sont des nœuds particuliers. La circulation de l'air est modifiée dans ces lieux, les conditions y sont souvent défavorables et la rupture de l'isolant mène à des désordres. L'influence des ponts thermiques sur l'enveloppe globale peut-être importante en calcul statique de thermique. Qu'en est-il de son effet sur les transferts hygrothermiques ?

Les conditions hygrothermiques sont supposées homogènes dans les différentes ambiances. Seule l'influence de la rupture d'isolant sera alors étudiée.

2.2.1. Plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur

a. Généralités

L'analyse de cas qui suit concerne l'étude d'un plancher intermédiaire et le pont thermique formé par une isolation par l'intérieur. Il s'agit d'une structure en béton armé, dont la structure du mur fait 15cm d'épaisseur et le plancher intermédiaire en fait 20cm. Tous les paramètres des matériaux sont fixés excepté ceux de l'isolant. C'est le paramètre qui nous intéresse dans cette étude. En effet, dans la pratique des bureaux d'études, une fois le système constructif choisi, les ingénieurs structures fixent les éléments structurels laissant la liberté sur le reste de la composition de paroi, principalement l'isolant. Comme l'étude se centre sur le pont thermique, vont varier l'épaisseur et le type d'isolant. Le choix a été fait de ne pas mettre en place de pare vapeur, afin de mettre en avant les variations dues à l'humidité.

Les analyses de l'humidité relative et la fraction volumique se penchent à chaque fois sur les tranches haute et basse du mur, définies comme étant respectivement le point le plus haut du mur, juste sous la dalle et le point le plus bas du mur.

Ce pont thermique présente des symétries géométriques. Les conditions aux limites étant homogènes, elles sont aussi symétriques. En effet, les ambiances extérieure et intérieur sont supposées homogènes. Il est possible de limiter la modélisation. Cela permet de diminuer le temps de calcul de la simulation par deux et d'arriver aux 2h30 précitées. Il faudra juste faire attention aux valeurs données par intégration sur le volume et les rapporter au m^2 ou au m^3 en fonction des critères.

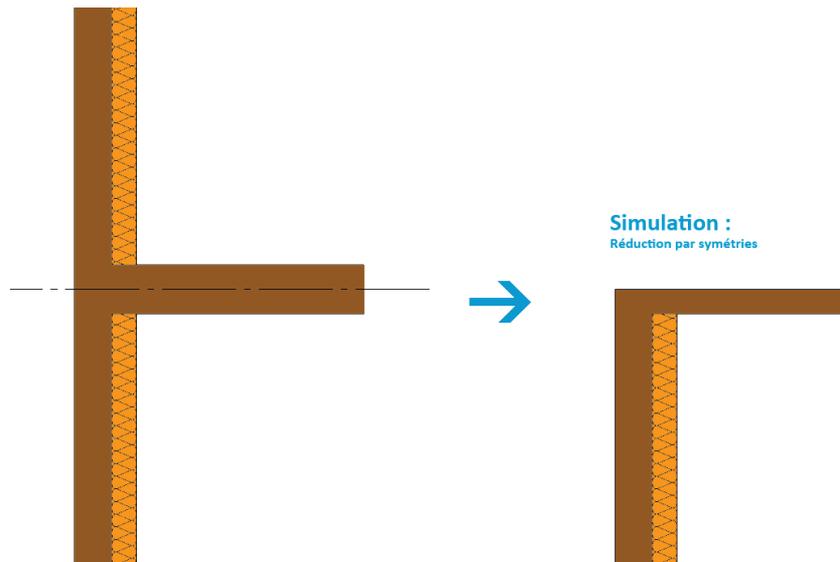


Figure 30 : Modélisation du pont thermique

Le pont thermique est modélisé par des prolongements du mur et de la dalle de 1m pour qu'il n'y ait plus les effets du pont thermique, principe repris de la norme (NF EN ISO 10211 s.d.). Toutes les hypothèses générales de maillages, pas de temps, conditions aux limites et paramètres des matériaux sont d'application.

b. Cas initial

Un cas initial est défini par 10cm d'isolation intérieure en laine minérale. C'est un cas courant en isolation par l'intérieur. La Figure 31 ci-dessous reprend la modélisation de ce pont thermique. Toutes les courbes sont en annexe.

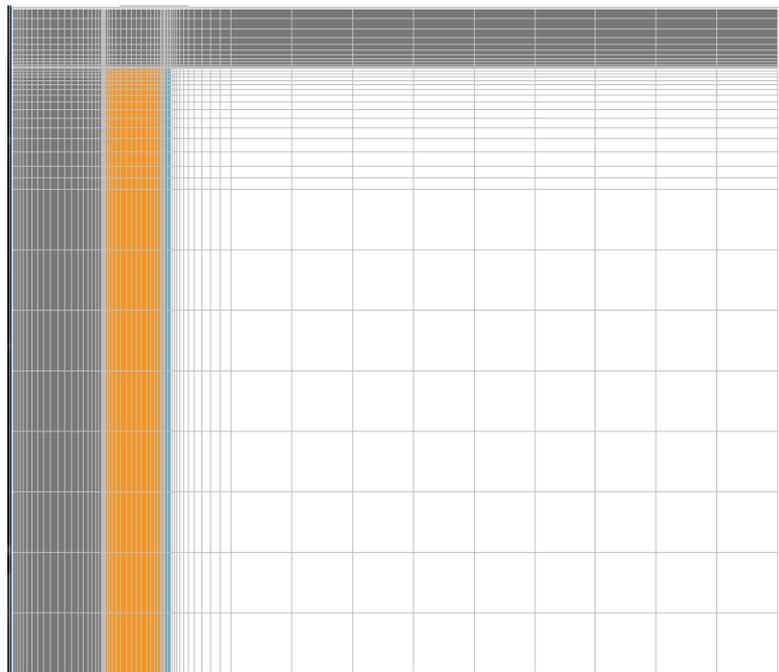


Figure 31 : Modélisation sous Delphin du pont thermique

Pour cette configuration initiale, les méthodes statiques prévoient un risque de formation de moisissures sur le pont thermique et une zone de condensation interne au niveau de l'interface entre le béton et l'isolant. Elle apparaît en novembre et s'évapore complètement en août. La quantité de condensat accumulée est au maximum à $10,7\text{kg/m}^2$ en mars. La limite est fixée à 1kg/m^2 (1% du volume d'isolant). Elle est largement dépassée.

La simulation dynamique montre quant à elle une quantité de condensat accumulée au maximum à $4,8\text{kg/m}^2$. Elle évolue dans le temps de manière cyclique. Elle apparaît une fois par an entre le 28 octobre et le 29 mai. Et elle atteint son maximum le 10 mars. Les limites ne sont pas respectées ici non plus. Elles dépassent la valeur de 1kg/m^2 autorisée. Globalement, les prédictions statiques et dynamiques se rejoignent excepté au niveau de la quantité de condensat calculée où elle diminue quasi de moitié en dynamique.

En superficie, l'humidité relative ne dépasse pas les 80% pendant plus de 5 jours sur toute l'année sur la paroi. Seuls quelques pics sont observés. Au niveau du pont thermique en revanche, il y a un risque de formation de moisissures en superficie. L'humidité relative dépasse la limite pendant 140 jours environ, soit 38% de l'année en période hivernale. Les 5 jours sont largement dépassés, il y a un risque de formation de moisissures.

La structure se charge en eau en hiver, donc la conductivité thermique augmente, diminuant la résistance thermique. Les pertes de résistance atteignent les 20% au niveau de la paroi. Elles durent quasiment la moitié de l'année (46% de l'année) sur la période hivernale.

La teneur en eau totale suit des cycles saisonniers mais en moyenne, elle reste stable dans le temps. En hiver, elle augmente significativement, du à l'accumulation de condensat qui se fait entre le béton et l'isolant. Puis elle redescend en été pendant la période de séchage du condensat.

c. Effet du pont thermique sur les propriétés de la paroi

Dans un premier temps, regardons l'effet du pont thermique sur les propriétés de la paroi. La rupture d'isolation crée une dégradation des propriétés thermiques. Qu'en est-il des effets de l'humidité ?

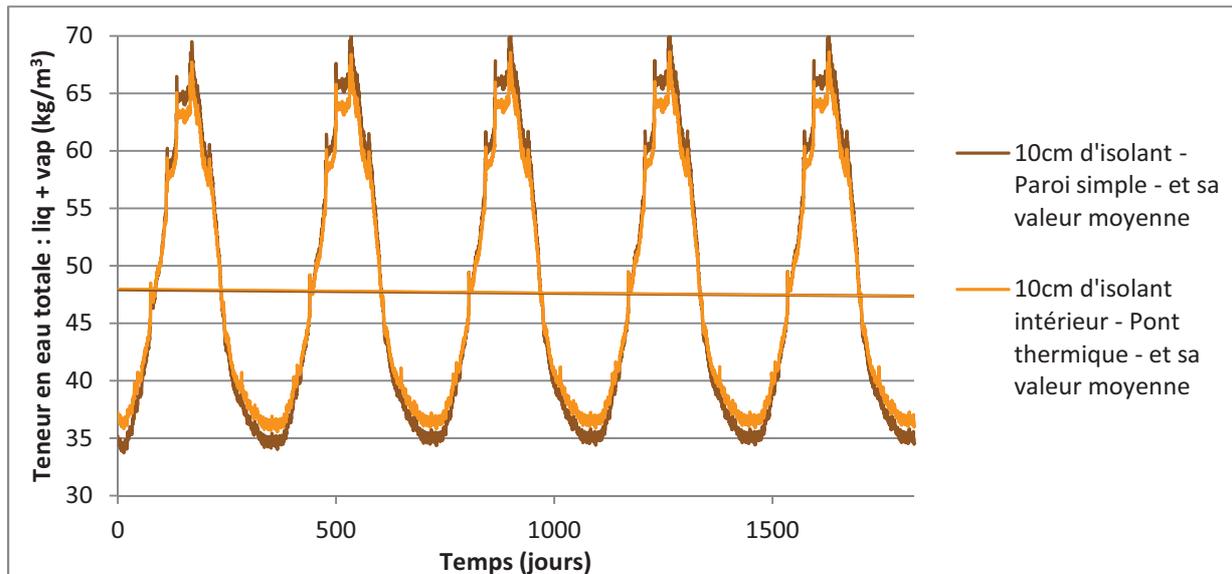
Le pont thermique diminue le gradient thermique, diminuant ainsi le gradient de pression de vapeur. A l'intérieur, la température de surface diminue et s'approche plus facilement des valeurs limites. Le risque de formation de moisissures y est augmenté. En revanche, la quantité d'humidité qui transfère est donc amoindrie ayant des conséquences positives sur la paroi telles que la diminution de la quantité de condensat, de la teneur en eau totale, de la perte en efficacité thermique, ... Pour autant, il faut éviter de tomber dans la conclusion que les ponts thermiques sont bénéfiques pour l'enveloppe. En proportion, ces effets ne compensent pas les pertes thermiques créés par la rupture de l'isolant et ils ne sont en rien une solution à la régulation des transferts hygrothermiques (risque de formation de moisissures).

Pour regarder la proportion de ces effets, une paroi simple et une paroi avec pont thermique ont été simulées. La paroi fait 1m de haut et le pont thermique est défini comme expliqué ci-avant. La teneur

en eau totale est prise sur toute la hauteur du mur, soit 1,10m pour le pont thermique. Les valeurs seront donc rapportées au m^2 ou au m^3 .

Afin de regarder la validité de cette comparaison, deux cas d'isolation par l'intérieur ont été étudiés, à savoir 10 et 15cm d'isolant. Les résultats vont vers les mêmes conclusions, ils sont en annexe.

Les conséquences du pont thermique ne dépassent pas les 5% sur les différentes propriétés par rapport à une paroi simple. Il diminue faiblement la quantité d'eau liquide et vapeur qui se trouve au sein du mur en hiver. Mais en été, il augmente ces quantités légèrement. Globalement, les valeurs moyennes sont identiques mais les amplitudes sont diminuées.

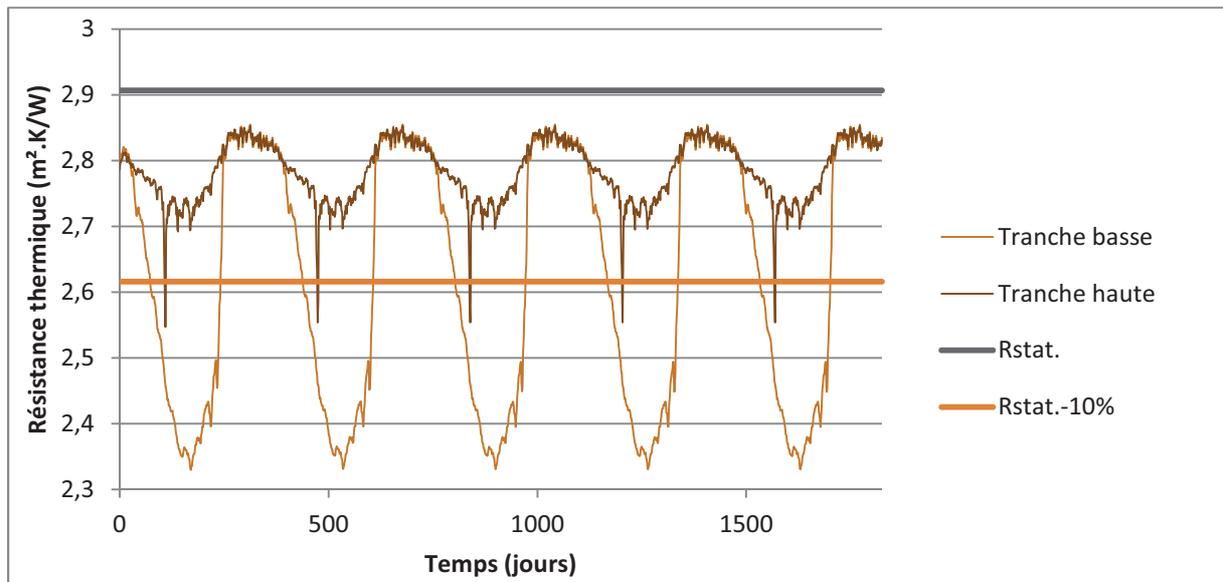


Graphique 10 : Teneur en eau totale - Comparaison de la paroi simple et de la paroi avec pont thermique pour 10cm d'isolation par l'intérieur

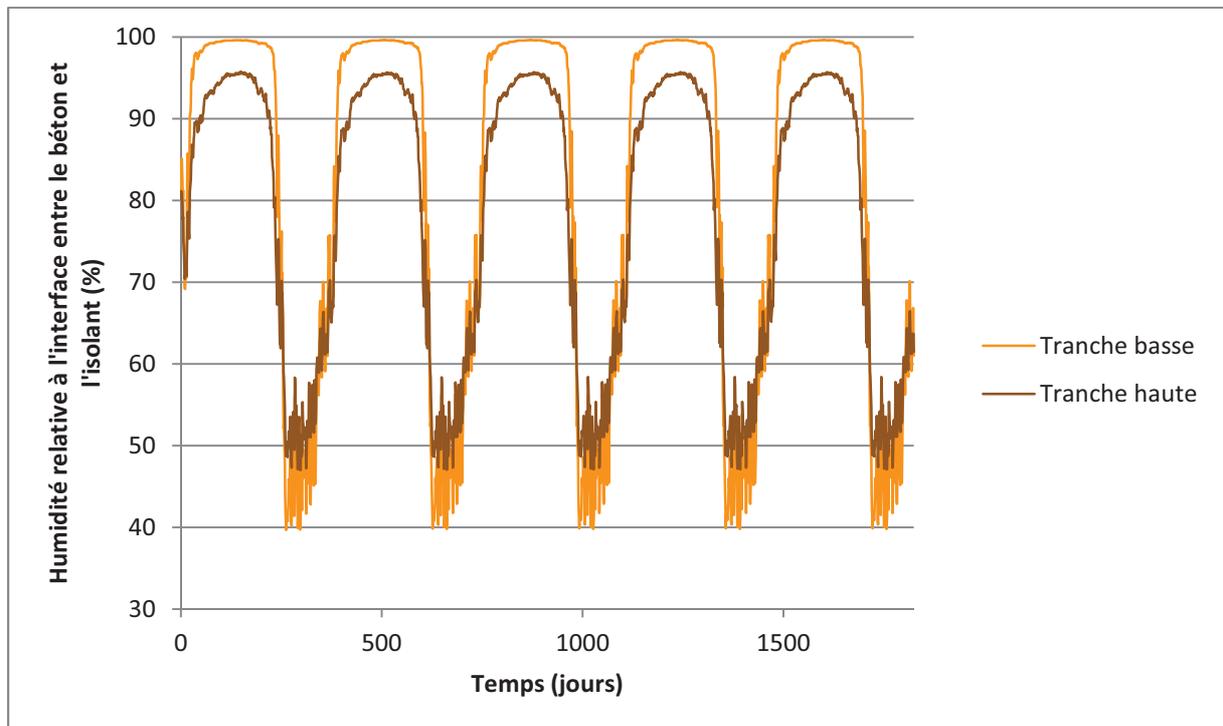
d. Au niveau du pont thermique

Comparons la tranche haute et la tranche basse de mur pour voir ce qu'il se passe dans le pont thermique. Comme il a été expliqué précédemment, seule l'humidité relative et la fraction volumique, à savoir la résistance thermique, sont observés.

Rappelons que le gradient de pression est moins important au niveau du pont thermique à cause de la rupture d'isolant. Les amplitudes de variations dues à l'humidité seront moins importantes, à mettre en lien avec les équations de couplages prises en compte par Delphin (cf chapitre 2, paragraphe 4.1.4). La structure aura moins tendance à se charger en eau au niveau du pont thermique. Les chutes de résistances thermiques seront donc moins importantes et l'humidité relative va diminuer. Les courbes ne suivront plus de variations franches mais des courbes plutôt sinusoïdales. L'humidité sera relativement homogène. Les interfaces se comporteront globalement de la même manière. Au niveau de l'interface entre le plâtre et l'isolant, il y aura un déphasage avec ce qu'il se passe en tranche basse du mur.

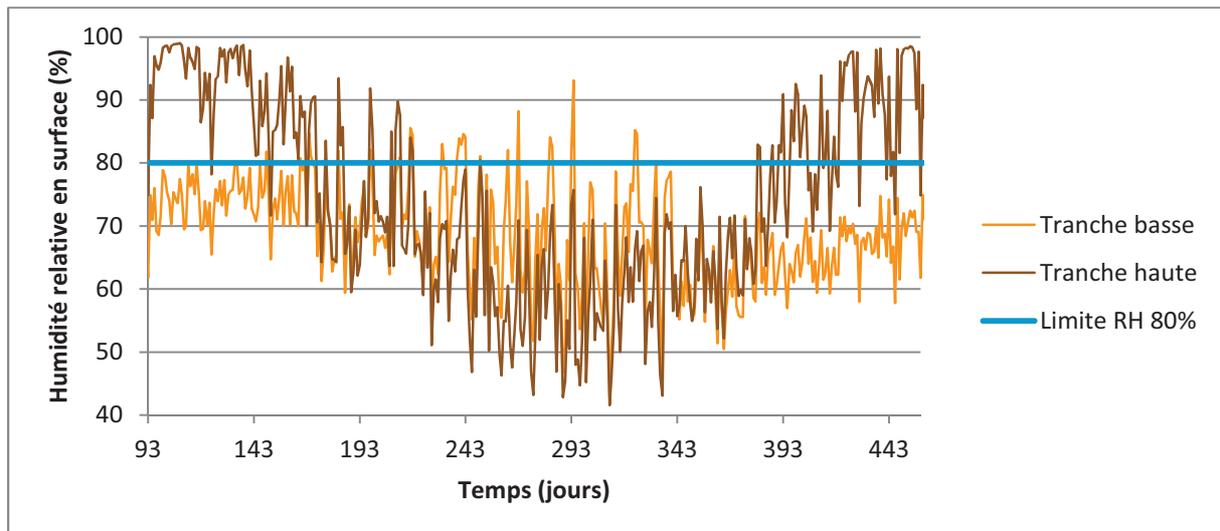


Graphique 11 : Résistance thermique - Comparaison entre la tranche basse et haute du mur pour 10cm d'isolant



Graphique 12 : Humidité relative à l'interface entre le béton et l'isolant - Comparaison entre la tranche basse et haute du mur pour 10cm d'isolant

Comme expliqué, le problème principal rencontré est celui de la surface intérieure. Il y a risque de formation de moisissures au niveau de la tranche haute du mur. Toujours du à la diminution de gradient thermique, la surface se rapproche rapidement de son état limite par rapport au risque. Ce risque est persistant sur quasiment un tiers de l'année en hiver. Alors qu'il n'existe pas sur la paroi simple (tranche basse).



Graphique 13 : Humidité relative en surface - Zoom sur une année du 1er janvier (jour 93) au 31 décembre 2000 (jour 458) – Comparaison entre la tranche basse et haute du mur pour 10cm d’isolant

2.2.2. Etude paramétrique

Pour rappel, le cas de base a été défini par une épaisseur d’isolant fixée à 10cm de laine minérale. A partir de cette référence, l’épaisseur et le type d’isolant vont varier.

La modélisation se fait ici aussi selon les hypothèses générales. Les isolants utilisés en plus pour cette étude de cas ont des propriétés différentes qui seront précisées.

a. Variation de l’épaisseur d’isolant

Dans un premier temps, c’est l’épaisseur d’isolant qui varie : 5cm – 10cm – 15cm. L’isolant considéré est une laine minérale dans tous ces cas.

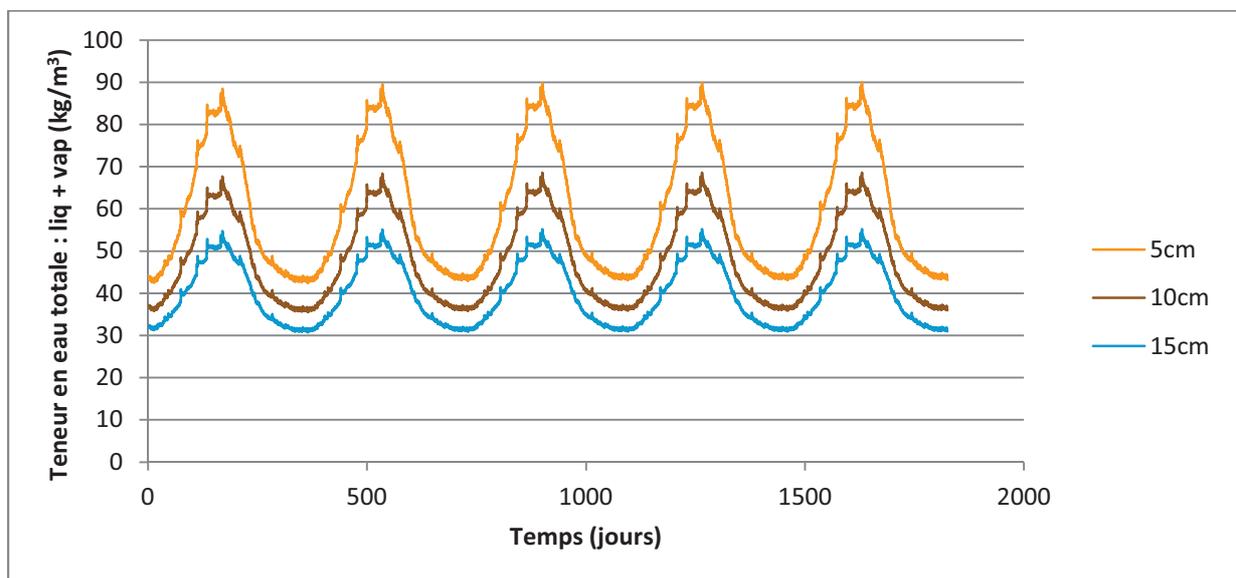
La teneur en eau totale diminue quand l’épaisseur d’isolant augmente. En effet, au plus l’épaisseur augmente, au plus la résistance à la vapeur d’eau augmente d’après l’équation [7.2]. Donc la paroi est moins perméable à l’eau. Il y a moins de flux de vapeur d’eau qui passe, donc moins d’eau dans la paroi.

La quantité de condensat diminue pour cette même raison (cf équations [10.1] et [24]). Dans tous les cas, que ce soit en statique ou dynamique, elle suit un cycle qui s’annule sur une année. Par rapport à la limite fixée par le projet de norme (SIA180 2012), la quantité de condensat dépasse toujours 1% du volume de l’isolant.

Pour les mêmes raisons, l’humidité relative au sein de la paroi est plus basse lorsque l’épaisseur d’isolant augmente. Dans tous les cas, à l’interface entre le béton et l’isolant, elle dépasse les 80% et atteint la saturation pendant plus de 60% de l’année en période hivernale, correspondant au taux de condensat. Pour ce qui est de l’interface entre le plâtre et l’isolant, l’humidité relative monte au-delà de 80% en été, mais n’atteint jamais la saturation.

Comme la quantité d'eau diminue quand l'épaisseur augmente, les pertes de résistance thermique en hiver diminuent aussi. Elles ne sont pour autant pas acceptables dans ces différents cas : elles dépassent les 10%.

Pour tous les cas, en superficie, les méthodes statiques ne prévoient pas de risque sur la paroi mais un risque de formation de moisissures sur le pont thermique. La simulation dynamique confirme l'absence de risque sur la paroi. Il y a quelques dépassements ponctuels des 80% mais sans durée significative. Ces dépassements d'humidité relative sont plus fréquents pour l'épaisseur de 5cm d'isolant, ceci étant du à la plus grande perméance de la paroi (résistance à la diffusion d'humidité diminue). Combiné à cela, la résistance thermique diminue avec l'épaisseur d'isolant, diminuant ainsi le gradient thermique au sein de la paroi. La paroi étant plus froide atteint plus facilement la température superficielle limite.



Graphique 14 : Teneur en eau totale - Comparaison en fonction de l'épaisseur d'isolant

b. Variation du type d'isolant

Dans un second temps, il s'agit de la variation du type d'isolant : laine minérale – fibre de bois – polyuréthane. Rappelons qu'il s'agit de 10cm d'isolation intérieure avec le pont thermique formé par le plancher intermédiaire.

Afin de ne regarder que les modifications liées à l'hygrothermie, les propriétés thermiques des isolants seront les mêmes. La laine minérale sera alors comparée à la fibre de bois connue pour ses propriétés d'absorption et au polyuréthane, isolant à base de polymères très utilisé dans le bâtiment. La capacité d'absorption implique une capacité de transport d'eau par capillarité, les courbes sont en annexe. Le polyuréthane quant à lui se comporte plutôt comme un par vapeur n'ayant pas de capacité de conductivité liquide ni de diffusivité de vapeur.

Les isolants suivants ont été choisis dans le catalogue de Delphin mais leur conductivité thermique sèche a été modifiée à 0,038 W/(m.K).

	Nom de catalogue Delphin	λ_s (W/(m.K))	ρ (kg/m ³)	C_p (J/(kg.K))	μ (-)	θ_{por} (m ³ /m ³)	θ_{eff} (m ³ /m ³)	A kg/(m ² .s ^{1/2})
Isolant Laine minérale	Mineral Wool	0,038	30	840	1	0,92	0,9	-
Isolant Fibre de bois	Wood fibre insulation board	0,038	155	2000	2	0,981	0,6	0,07
Isolant Polyuréthane	PU-Foam	0,038	35	1320	100	0,95	0,949	-

Tableau 15 : Propriétés des isolants

En étude statique, le seul paramètre qui varie est le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ . D'après les équations [10.1] et [24], au plus il augmente, au moins il y a de condensat accumulé dans la paroi. Comme celui-ci double entre la laine minérale et la fibre de bois, la quantité de condensat accumulée diminue. Pour le polyuréthane, la résistance à la diffusion de vapeur augmente d'un facteur 100. La quantité de condensat diminue franchement et devient quasiment négligeable, elle valide les critères. Dans ces différents cas, elle s'annule toujours sur l'année.

Concernant le calcul du f_{RSi} en statique, il n'y a aucune variation puisque la conductivité thermique est constante dans tous ces cas.

En régime dynamique, la fibre de bois se comporte globalement comme la laine minérale en termes de cycles. Le calcul dynamique prend en compte plus de paramètres. En comparaison à la laine minérale, la fibre de bois possède une porosité efficace θ_{eff} plus petite (cf définition de la porosité dans les notions de base du chapitre 2). A saturation, il y aura donc moins d'eau dans les pores. La résistance à la vapeur d'eau est deux fois plus grande. Elle possède des propriétés d'absorption d'eau et la possibilité de transport d'eau par capillarité. Ces différences de propriétés entraînent une quantité de condensat dans l'isolant bien moindre que dans la laine minérale (23fois inférieure). Elle ne dépasse plus les critères fixés par le projet de norme (SIA180 2012). Ceci est du à l'absorption dans le matériau qui répartit l'eau dans toute la couche d'isolant et évite la concentration à l'interface.

L'humidité relative aux interfaces est un peu plus faible (1 à 2% en moyenne sur 5ans). Les variations sont moins franches et les courbes ressemblent plus à une sinusoïde.

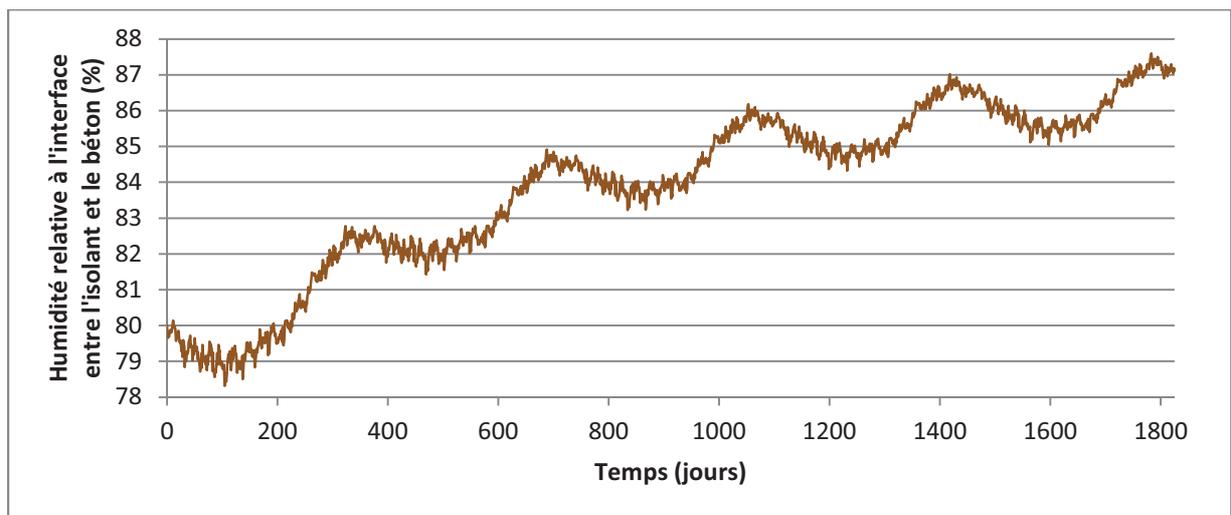
La teneur en eau totale (liquide et vapeur) sur 5ans est en moyenne supérieure de 1kg/m³ dans toute la paroi.

Il n'y a pas de différence notable à la surface intérieure de la paroi. La résistance thermique perd jusqu'à 23% en hiver, ce qui n'est pas acceptable. C'est 3% de pertes en plus que pour la laine minérale, expliqué par une plus forte teneur en eau.

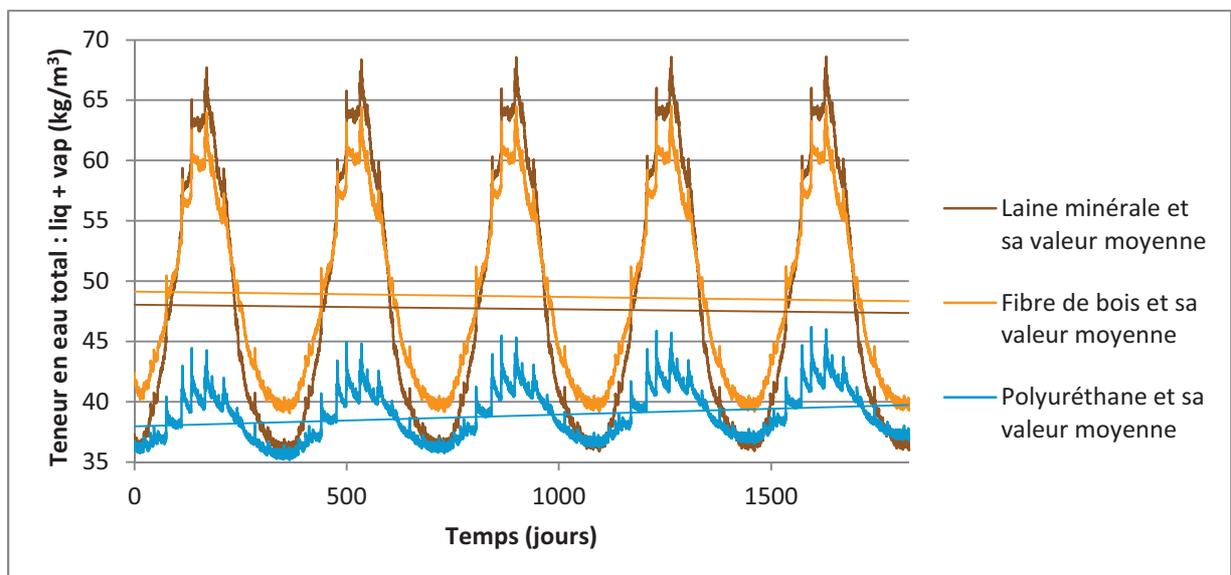
La fibre de bois est donc meilleure pour la gestion du condensat mais elle possède de trop fortes pertes en résistance thermique qui devront être gérées. Pour ce faire, il faudra envisager la mise en place d'un pare vapeur et la prise en compte de cette dégradation dans le calcul des déperditions de l'enveloppe.

Concernant le polyuréthane, son comportement est bien différent des deux autres isolants. Celui-ci a une grande résistance à la vapeur d'eau. Il constitue une barrière au flux de vapeur d'eau. Il ne

contient pas de condensat dans cette simulation car il ne possède pas de capacité de transfert. La première conséquence est qu'il n'y a pas de pertes en efficacité de la résistance thermique. Par rapport au régime statique, il y a une perte de 2% qui est due à la prise en compte de l'humidité contenue initialement dans tous les matériaux. Cette perte devrait être intégrée au calcul thermique. Une autre conséquence importante est pour la définition des interfaces : il faut regarder ce qu'il se passe du côté du béton et du plâtre et non plus dans l'isolant. Aux interfaces, l'humidité relative a tendance à augmenter rapidement dans le temps malgré les cycles saisonniers. Sur les 5 ans de simulation, elle n'atteint pas la saturation au niveau de la paroi. La teneur en eau totale est en moyenne plus faible de 8,9 kg/m³ par rapport à la laine minérale, mais comme l'humidité relative elle a tendance à augmenter dans le temps. Qu'en est-il à plus long terme ?



Graphique 15 : Humidité relative à l'interface entre isolant et béton - Cas du polyuréthane calculé sur 5ans



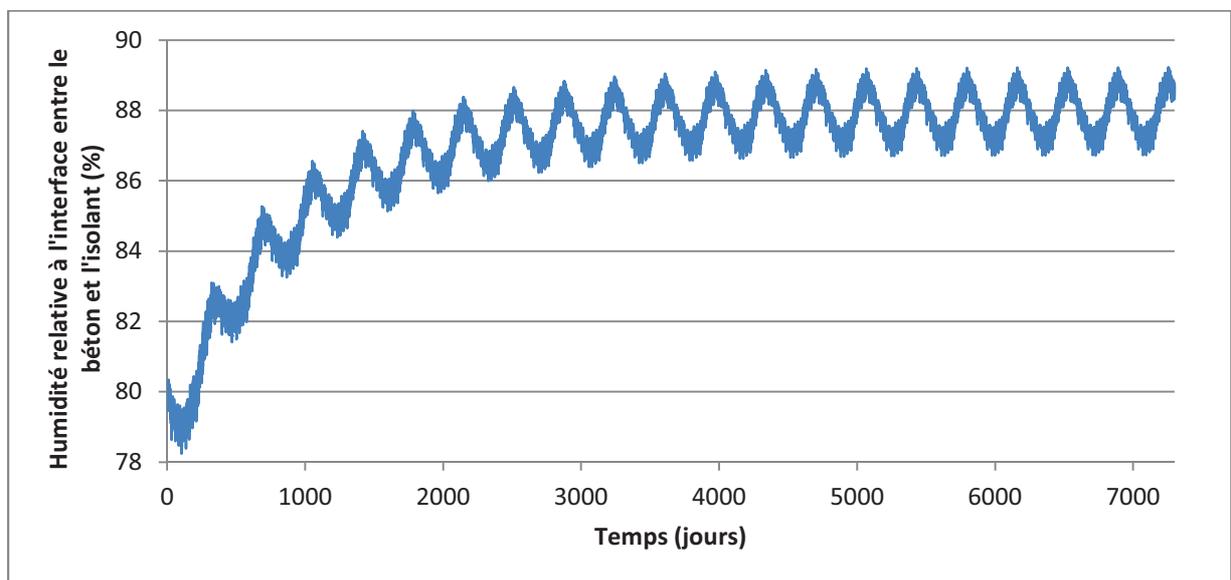
Graphique 16 : Teneur en eau totale - Comparaison des différents types d'isolant

Ces différentes courbes montrent que la simulation sur 5ans est insuffisante ici. Il faudrait voir s'il y a un risque de saturation. Le souhait est de regarder le comportement sur 20 ans car si l'humidité relative continue sa progression de cette manière, elle devrait atteindre la saturation après 15 ans.

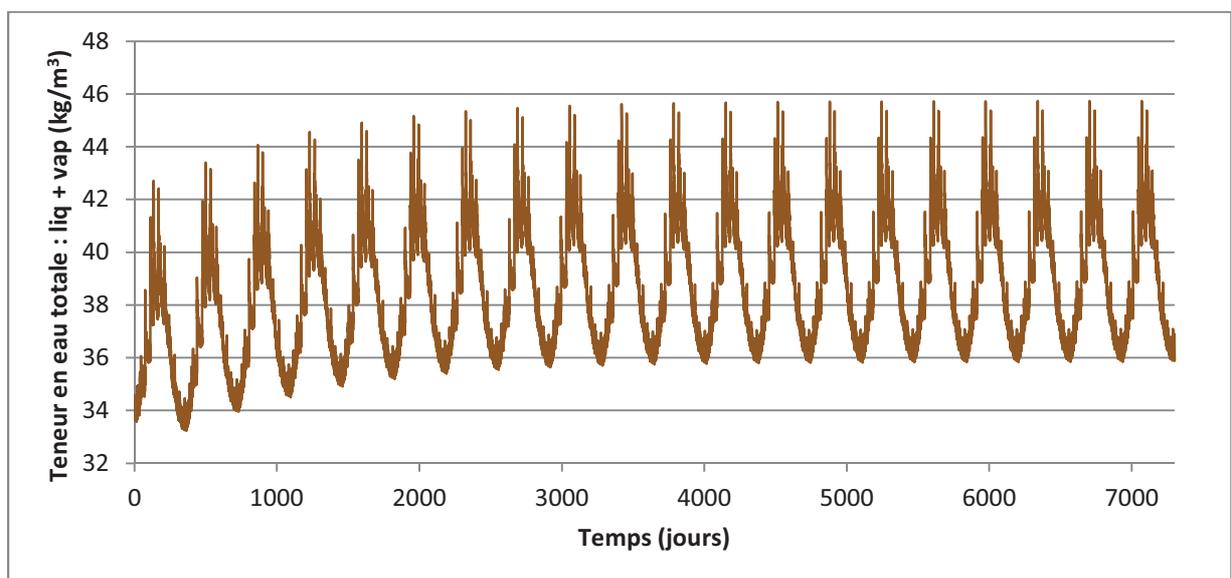
Ce calcul est bien trop lourd pour l'ordinateur (12h de calcul). Comme les propriétés de la paroi ne sont pas beaucoup modifiées entre paroi simple et paroi avec pont thermique, une simulation est faite sur une simple paroi à une dimension. Cela permettra de conclure sur cette problématique.

Seuls les graphiques de l'humidité relative et de la teneur en eau totale sont étudiés, Graphique 17 et Graphique 18. Les autres n'apportent pas d'informations supplémentaires parce qu'en réalité, la saturation n'est jamais atteinte à l'interface entre le béton et l'isolant. La quantité de condensat reste nulle sur 20ans. Au bout de 7 ans environ, la structure se stabilise.

Ce comportement est donc acceptable tant qu'il n'y a aucune altération dans la mise en œuvre. Il n'y a en revanche pas de sécurité en cas de surcharge hydrique imprévue. Le temps de séchage et sa rapidité seront trop longs.



Graphique 17 : Humidité relative à l'interface entre le béton et l'isolant - Calcul sur 20 pour une isolation par l'intérieur en polyuréthane



Graphique 18 : Teneur en eau totale - Calcul sur 20 pour une isolation par l'intérieur en polyuréthane

c. Synthèse

Pour s'affranchir totalement du risque de formation de moisissures sur un pont thermique de type plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur, il n'existe pas de solution simple à première vue pour ces conditions hygrothermiques. La mise en place d'un pare vapeur paraît essentielle, vu dans les études unidimensionnelles de parois composées. Elle permet de diminuer considérablement la teneur en eau dans la paroi. Mais cette solution n'est pas effective dans certains cas particuliers. Dans un bâtiment climatisé en été par exemple, la température intérieure devient inférieure par rapport à l'extérieur. Les flux sont inversés : ils vont de l'extérieur vers l'intérieur. Le pare vapeur jouera le rôle de barrière et de la condensation pourra s'y accumuler. Il faudra donc faire attention aux conditions hygrothermiques.

Il est possible de diminuer ce risque en augmentant l'épaisseur d'isolant et en utilisant des matériaux absorbants. Il faudra tout de même faire attention au risque de tassement de ces matériaux. De plus, les pertes en efficacité thermique sont assez importantes. Elles ont lieu en hiver, période où l'isolant est plus que nécessaire pour éviter de trop grandes déperditions et une facture de chauffage trop élevée. L'augmentation de l'épaisseur d'isolant n'est pas toujours possible. En effet, celle-ci diminue la surface au sol intérieure du local si elle est posée à posteriori.

Le Tableau 16 ci-dessous synthétise les résultats de cette étude paramétrique. Il montre que les risques, comme prévu, se situent au niveau du pont thermique en surface. Dans tous les cas, il y a un risque de formation de moisissures à cet endroit. Augmenter l'isolant doit être fait de manière significative pour être efficace. Ce paramètre n'est pas assez sensible pour être une solution à préconiser dans la pratique.

L'emploi de la fibre de bois permet de diminuer considérablement la quantité de condensat accumulée mais il faut alors intégrer une perte en efficacité thermique dans la conception. Le polyuréthane par ses propriétés de barrière à la vapeur d'eau est une solution pour éviter l'accumulation de condensat et la perte en efficacité thermique, malgré ses limites. Cependant, dans le contexte de développement durable actuel, ce matériau n'est pas des meilleurs d'un point de vue bilan carbone.

Méthode	f_{RSi}				w_c		R_{th}	w_{tot}
	Statique		Dynamique		Statique	Dynamique	Dynamique	Dynamique
	Paroi	Pont thermique	Paroi	Pont thermique				
1 – Isolation par l'intérieur 5cm laine minérale sur plancher intermédiaire	OK	RISQUE	OK	RISQUE	RISQUE	RISQUE	RISQUE	→
2 – Isolation par l'intérieur 10cm laine minérale sur plancher intermédiaire	OK	RISQUE	OK	RISQUE	RISQUE	RISQUE	RISQUE	→
3 – Isolation par l'intérieur 15cm laine minérale sur plancher intermédiaire	OK	RISQUE	OK	RISQUE	RISQUE	RISQUE	RISQUE	→
4 – Isolation par l'intérieur 10cm fibre de bois sur plancher intermédiaire	OK	RISQUE	OK	RISQUE	RISQUE	OK	RISQUE	→
5 – Isolation par l'intérieur 10cm polyuréthane sur plancher intermédiaire	OK	RISQUE	OK	RISQUE	OK	OK	OK	↗

Tableau 16 : Comparatif des résultats de l'isolation par l'intérieur sur plancher intermédiaire - OK = pas de risque détecté - NV = non validé, risque

2.2.3. Généralisation : Moisissures et ponts thermiques

Les ponts thermiques sont des lieux favorables à la formation de moisissures en surface, du fait que la température de surface intérieure y est plus faible. Pour rappel, la rupture d'isolant diminue le gradient de température au niveau du pont thermique. La température superficielle est se rapproche plus de la température extérieure. En hiver, pour un local chauffé à l'intérieur, la température de surface peut atteindre plus facilement la température de rosée.

En limitant l'analyse aux cas des déperditions linéaires, la caractérisation d'un pont thermique en calcul thermique se fait par le coefficient de déperditions ψ (W/(m.K)). Ce coefficient est utilisé autant pour le calcul RT que pour la P.E.B. (cf paragraphes ...). Ces méthodes sont statiques et souvent simplifiées. Il serait alors intéressant de voir s'il existe une corrélation entre cette

caractérisation et une méthode simplifiée de détection de risque hygrothermique. Le calcul du f_{RSi} est la méthode la plus simple connue à ce jour. Elle paraît la plus adaptée à cet exercice.

Traiter le pont thermique, en augmentant la qualité de l'isolation, diminue la valeur de ψ . Or augmenter la qualité de l'isolant augmente le facteur de température superficielle, $f_{RSi,pont\ th}$. Il apparaîtrait alors logique de faire le raccourci suivant : diminuer la valeur de ψ devrait augmenter $f_{RSi,pont\ th}$. Il faut vérifier cela et se poser la question de savoir s'il y a une corrélation entre ces deux facteurs pour tout type de configuration. Ou encore, chercher une valeur limite de ψ à partir de laquelle il n'y a plus de risque de formation de moisissures.

L'analyse qui suit extrait des cas de la RT2012 qui donne des valeurs de ψ en fonction de la configuration du pont thermique. Le but est de pouvoir étudier un panel assez complet, avec ou sans traitement du pont thermique.

a. Hypothèses de modélisation

Les différents cas étudiés ci-dessous répondent aux hypothèses générales de modélisation énoncées, aux exceptions suivantes près :

Les isolants sont définis selon les ponts thermiques. Comme il s'agit de méthodes statiques simplifiées, seule la conductivité thermique de l'isolant est utile ici. Les valeurs prises ici sont des valeurs usuelles et définies comme suit :

	λ_s (W/(m.K))
Isolant intérieur de paroi	0,038
Isolant extérieur de paroi	0,038
Isolant de toiture-terrasse (et recouvrement)	0,023
Isolant sous dalle (et recouvrement)	0,037

Tableau 17 : Conductivité thermique des isolants pour l'étude des ponts thermiques

La température extérieure est prise pour le cas le plus défavorable du calcul du $f_{RSi,min}$ à Lyon, soit 3,8°C. La température intérieure sera de 19°C pour la première variante (A) et 22°C pour la deuxième variante (B). Les humidités relatives correspondantes sont définies comme énoncées dans les hypothèses générales de modélisation (classe 4).

Les éléments structurels sont tous en béton armé ($\lambda_s = 2,5$ W/(m.K)). Les épaisseurs varient en fonction des cas. Il y a toujours une finition en plâtre de 1cm d'épaisseur.

Le calcul statique thermique est effectué selon la norme (NF EN ISO 10211 s.d.). Une modélisation 2D dans le logiciel Heat 2D donne les courbes isothermes.

b. Cas étudiés

Trois configurations de ponts thermiques sont étudiées et déclinées de la manière suivante :

Plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur

Le pont thermique est formé par le plancher intermédiaire qui rompt la continuité de l'isolant intérieur. Le mur en béton a une épaisseur $e_m = 16$ cm. Les variantes sont données dans le Tableau 18 et le Figure 32 ci-dessous.

Variante	Épaisseur du plancher e_p (cm)	Épaisseur de l'isolant e_{isol} (cm)
1	15	10
2	25	10
3	15	15

Tableau 18 : Variantes de plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur

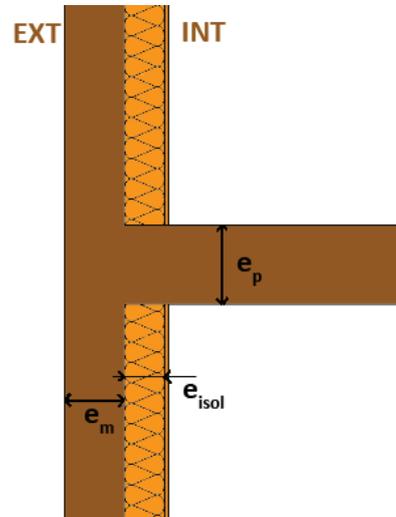


Figure 32 : Pont thermique - Plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur

Plancher haut type toiture terrasse en isolation par l'extérieur

L'acrotère en toiture terrasse crée un pont thermique s'il n'est pas recouvert en isolation par l'extérieur. L'isolant extérieur a une épaisseur de $e_{isol} = 16$ cm. La hauteur de l'acrotère est de 1m à partir du dessus de l'isolant et jusqu'au sommet de l'acrotère (sans recouvrement). Le Tableau 19 et le Figure 33 donnent les variantes.

Variante	Épaisseur du mur en béton e_m (cm)	Épaisseur du plancher e_p (cm)	Épaisseur de l'isolant de toiture e_{toit} (cm)
4	16	25	14
5	25	25	14
6	16	20	14 avec recouvrement

Tableau 19 : Variantes de plancher haut en isolation par l'extérieur

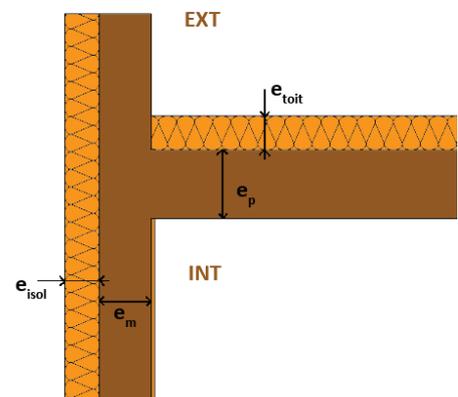


Figure 33 : Pont thermique - Plancher haut en isolation par l'extérieur

Plancher bas en isolation par l'extérieur

Pour des questions de structure, il n'est pas envisageable de passer un isolant sous l'appui d'une dalle. Il y a là un pont thermique puisque la continuité de l'isolation est rompue.

La structure en béton est définie par un mur d'épaisseur $e_m = 16$ cm et un plancher d'épaisseur $e_p = 25$ cm. L'isolant a partout une épaisseur de 16 cm. Les variations concernent la longueur de recouvrement du mur de fondation par l'intérieur, elles sont définies par le Tableau 20 et la Figure 34.

Variante	Longueur de recouvrement L (cm)
7	0
8	25
9	50

Tableau 20 : Variantes de plancher bas en isolation par l'extérieur

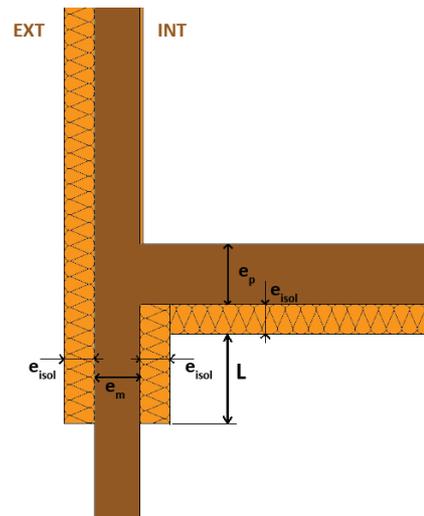


Figure 34 : Pont thermique - Plancher bas en isolation par l'extérieur

Chaque configuration de pont thermique (1 ... 9) est étudiée pour les deux variantes de température intérieure (A et B).

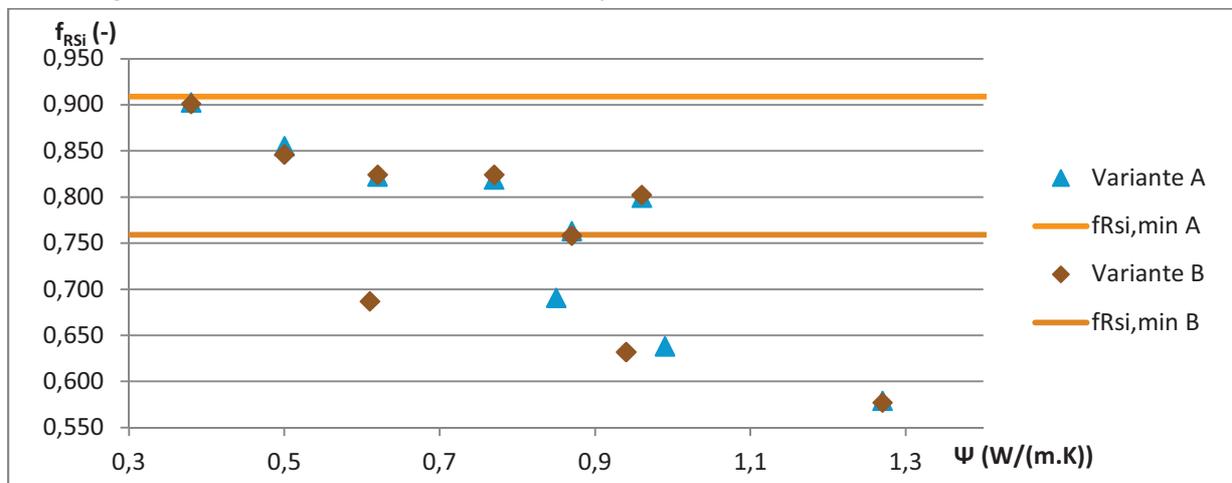
c. Résultats

Chaque cas a été analysé d'un point de vue thermique et hydrique. Les conclusions sont les suivantes :

Conclusions générales

Quelque soit le pont thermique, dans une cuisine à 19°C à Lyon, il y a risque de formation de moisissures, pour ces différentes configurations. Quand la température augmente à 22°C, il n'y a plus de risque sauf pour le plancher intermédiaire. La diminution du risque avec l'augmentation de la température était prévisible. Les raisons ont été expliquées dans la description du calcul du f_{RSi} (cf. chapitre 2, paragraphe 4.1.2).

Pour une température intérieure donnée, il n'existe pas de corrélation simple entre les deux facteurs ψ et f_{RSi} . Par exemple, pour $\psi = 0,6$ à 19°C intérieur, il n'y a pas de risque pour le plancher bas alors qu'il y en a pour le plancher intermédiaire. Il n'est pas possible d'effectuer une généralisation pour toutes les configurations de pont thermique. De plus l'étude est trop restreinte pour conclure de manière générale. Seules des tendances auraient pu être soulevées.

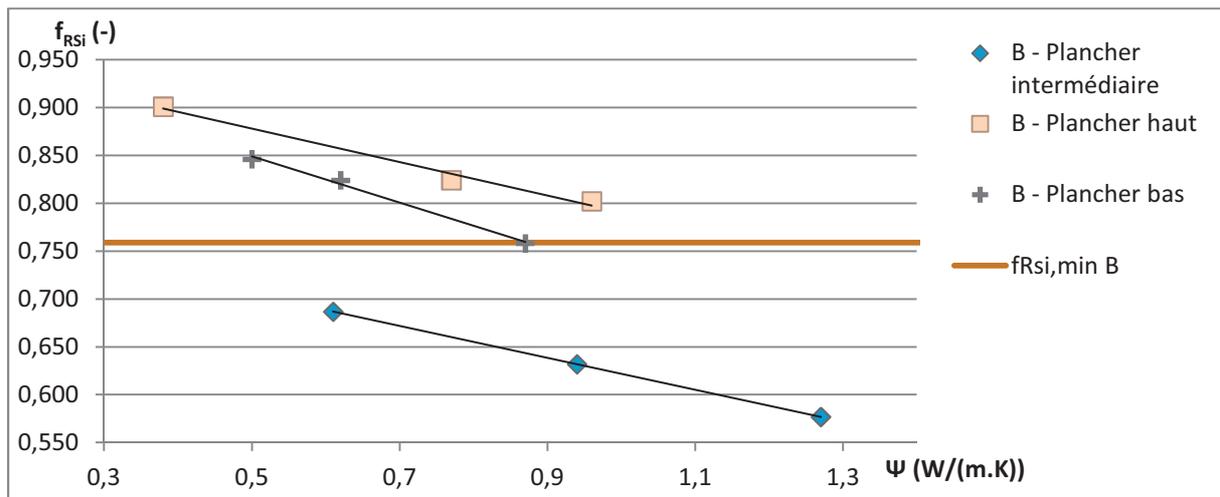


Graphique 19 : f_{RSi} en fonction de ψ (W/(m.K)) pour les deux variantes de température

Conclusions par type de configuration

Pour chaque configuration, comme prévu, diminuer le facteur de déperdition thermique diminue le risque de formation de moisissures. Il existe cette limite recherchée auparavant, pour chaque configuration spécifique. A savoir, une valeur de ψ à partir de laquelle le pont thermique ne présente plus de risque de formation de moisissures.

Il faudra surveiller le pont thermique formé par le plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur. Parmi les trois configurations testées, c'est le plus problématique. Il est bien en dessous des limites acceptables pour le risque de formation de moisissures.

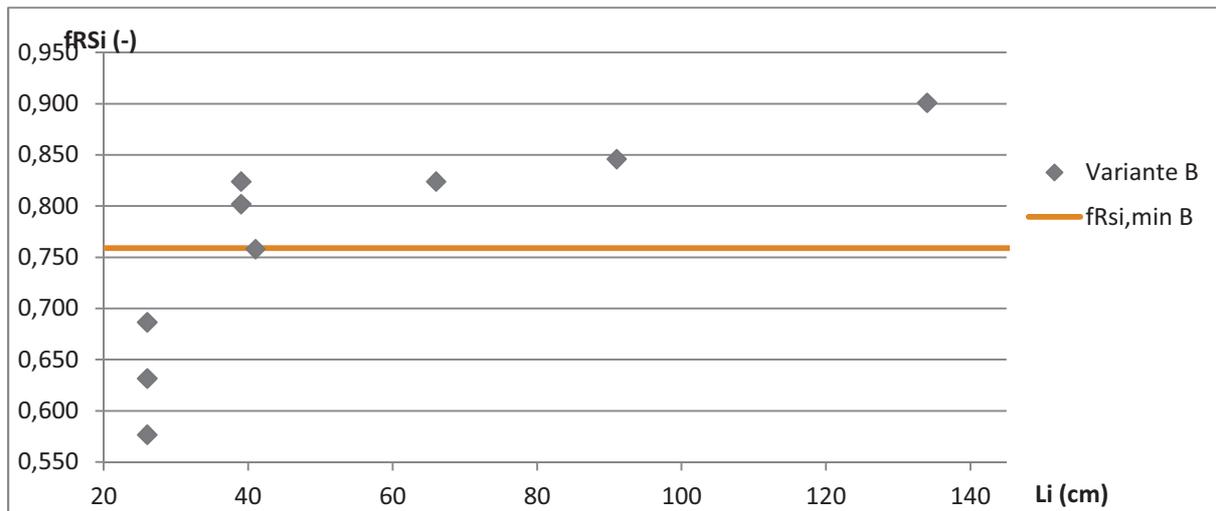


Graphique 20 : f_{RSi} en fonction de ψ (W/(m.K)) par type de configuration pour la variante à 19°C intérieur

Longueur de moindre résistance

Dans le but de trouver une corrélation avec des méthodes de calculs simplifiées, l'idée est venue d'utiliser la longueur de moindre résistance comme indicateur de comparaison. La longueur de moindre résistance L_i représente la distance la plus courte entre l'intérieur et l'extérieur pour laquelle il n'y a pas d'isolant dans un pont thermique. Ce critère est utilisé notamment par le calcul P.E.B pour la caractérisation des déperditions des ponts thermiques. En la calculant pour chaque configuration, il est possible de la comparer graphiquement au facteur de température superficielle f_{RSi} .

La conclusion à cela est qu'une tendance est pressentie. A savoir qu'il doit exister une valeur limite de L_i à partir de laquelle il n'y a plus de condensation. Mais il faudrait une étude beaucoup plus approfondie pour pouvoir valider ce propos et déterminer la corrélation.



Graphique 21 : f_{RSi} en fonction de L_i pour la variante à 19°C intérieur

Longueur de condensation

Il est possible de regarder la longueur de condensation L_c . C'est un abus de langage, il s'agit de la longueur sur laquelle il y a risque de formation de moisissures. Le calcul du f_{RSi} donne un minimum de température superficielle acceptable à la surface, $T_{Si,min}$. D'autre part, à partir du calcul thermique, il est possible d'obtenir le profil de température à la surface de chaque élément de paroi, les isothermes. Il faut alors regarder la longueur sur laquelle la température vérifie : $T_{Si} < T_{Si,min}$. Sur cette longueur, il y aura risque de formation de moisissures.

De même que pour les calculs précédents, il n'y a pas de corrélation simple avec le facteur de déperdition thermique.

Mais pour aller plus loin, regardons l'impact que peuvent avoir les prédictions de formation de moisissures sur un cas de bâtiment de 100m par 20m sur 5 étages. Les calculs qui vont suivre s'affranchissent des effets 3D dans les coins. Il s'agit d'une approximation défavorable puisque la méthode du calcul du f_{RSi} est basée sur des hypothèses grossières.

Quelque soit la configuration de plancher intermédiaire mise en œuvre, pour des températures d'air intérieur entre 19 et 22 °C, il faudra compter sur 8 à 10% de surface de plancher touchée par de la moisissure. Ce résultat peut être mis en parallèle avec la nature des matériaux mis en œuvre en surface. Par exemple, s'il y a une peinture en partie basse et un parquet en partie haute de la dalle, alors il faudra prévoir les dégradations occasionnées dans les coûts de maintenance du bâtiment. A savoir, un nettoyage de ces moisissures régulier, refaire la peinture sur les 4 ou 5% de la surface endommagée en fonction de son état et pour finir, le remplacement du parquet à long terme s'il est dégradé sur une surface aussi équivalente à 4 ou 5%. Cela pourra mener à des choix de matériaux en conséquence (carrelage, ...), sachant que ces dégradations apparaîtront au niveau des ponts thermiques. La réflexion est la même sur les configurations de plancher haut et bas. Les surfaces touchées par le risque de formation de moisissures y est plutôt de l'ordre de 2% de la surface de plancher totale. C'est une problématique intéressante pour les bureaux d'études.

3. Conclusions et règles de bonnes pratiques

Il faut remettre cette étude dans son contexte, il s'agit d'hypothèses contraignantes qui s'appliquent pour le cas de logements. Pour des bâtiments de bureaux, la production de vapeur d'eau est beaucoup moins importante. Les risques seront largement diminués. L'orientation a aussi de l'influence sur ces transferts puisque d'ils dépendent de l'exposition au rayonnement solaire, à la vitesse du vent et à la pluie (cf équations du paragraphe 4.1.4 du chapitre précédent). Ici elle a été choisi défavorable. Les conclusions qui vont suivre sur les risques hygrothermiques sont sécuritaires.

Les analyses de cas qui ont été faites mettent en avant l'isolation par l'extérieur. La solution d'isoler par l'intérieur, bien que courante, présente des risques de condensation interne. Pour s'affranchir de ce risque, la mise en place d'un pare vapeur du côté intérieur de la paroi peut s'avérer efficace. Mais la paroi n'aura pas de potentiel de séchage en cas de surcharge d'humidité inattendue. Passer par une solution d'isolation mixte peut s'avérer intéressante pour le traitement des ponts thermiques, il faudra cependant faire attention à la répartition de l'isolation. Les études de cas sur l'isolation mixte ont montré que la proportion d'isolant extérieur par rapport à l'intérieur doit être définie en fonction de chaque cas d'étude de bâtiment. La spécificité des nœuds constructifs rencontrés avec cette configuration mixte demandera aussi une étude vis-à-vis du risque hygrothermique. Pour finir, l'étude en deux dimensions montre que la formation de moisissure sur les ponts thermiques est une réelle problématique qui devrait être abordée dans toutes les nouvelles constructions, en particulier pour les bâtiments à haute performance énergétique.

Pour raccrocher cela à une réalité, regardons le retour d'expérience sur les constructions. Basée sur des constatations faites au sein de la société exNdo studio, l'expérience montre que la pratique d'isoler les murs par l'intérieur est courante dans la région lyonnaise. Peu de problèmes d'humidité sont relevés. Il peut y avoir plusieurs raisons à cela. Les conditions de développement de ces problèmes ne sont peut-être pas rassemblées (orientation favorable du bâtiment, peu de production de vapeur d'eau, ...). Les occupants peuvent aussi ne pas se rendre compte du problème (condensation interne) ou vivre sans le déclarer. Et pour finir, il s'agit de détecter un risque. La notion de risque est importante ici. Il se peut très bien que rien ne se produise malgré les prédictions.

Le climat belge est bien plus favorable à ces problèmes d'humidité. Avec une modeste expérience d'étudiante, j'ai remarqué dans de nombreux kots et appartements qu'il y avait des problèmes de formation de moisissures. Il s'agit de logements souvent peu ou mal isolés. La problématique de rénovation du parc immobilier belge prend alors tout son sens. La prise en compte de ces risques hygrothermiques ne peut en aucun cas être écartée de cette réflexion.

Revenons maintenant aux différentes méthodes de calcul. Au travers de ces analyses de cas, certaines limites ont été dégagées après l'étude unidimensionnelle. A savoir, que la méthode de Glaser et la simulation sur Delphin pouvait donner des conclusions contradictoires. L'explication à cela est l'aspect simplificateur dans la méthode de Glaser ainsi que la prise en compte de moyennes mensuelles. Pour évaluer la différence qu'il peut y avoir entre ces deux méthodes, pour chaque étude de cas, les quantités de condensat maximum accumulées ont été comparées dans le Tableau 21 suivant. Il n'y a pas de conclusion simple à faire à partir de ce tableau. Mais grossièrement, la quantité de condensat calculée par Glaser représente quasiment le double par rapport à celle calculée par Delphin. Le calcul Delphin n'est pas le calcul juste puisqu'il utilise aussi des hypothèses

mais il est déjà plus proche de la réalité. La méthode de Glaser est donc bien par son aspect simple mais elle est trop sécuritaire.

	$w_{c,max}$ (kg/m ²) calculé avec la méthode de Glaser	$w_{c,max}$ (kg/m ²) calculé par Delphin	Pourcentage de différence du calcul par Delphin par rapport au calcul de Glaser
Etude 1D			
1 – Isolation par l’extérieur 15cm laine minérale	0	0	-
2 – Isolation par l’intérieur 15cm laine minérale	9,2	3,7	60%
3 – Isolation par l’intérieur 25cm laine minérale	6	2	67%
4 – Isolation par l’intérieur 15cm laine minérale+ pare vapeur	0	0,8	-
5 – Isolation mixte 10cm intérieur / 5cm extérieur	4	1,3	68%
6 – Isolation mixte 7,5cm intérieur / 7,5cm extérieur	1,4	0,35	75%
7 – Isolation mixte 5cm intérieur / 10cm extérieur	0	0,12	-
Etude 2D			
1 – Isolation par l’intérieur 5cm laine minérale sur plancher intermédiaire	11,8	6,6	44%
2 – Isolation par l’intérieur 10cm laine minérale sur plancher intermédiaire	10,7	4,8	55%
3 – Isolation par l’intérieur 15cm laine minérale sur plancher intermédiaire	9,2	3,5	62%
4 – Isolation par l’intérieur 10cm fibre de bois sur plancher intermédiaire	8,4	0,18	99%
5 – Isolation par l’intérieur 10cm polyuréthane sur plancher intermédiaire	0,2	0	-

Tableau 21 : Comparatif calcul du condensat statique et dynamique

Pour conclure plus généralement sur ces analyses de cas, il faut regarder ce qu’il se passe à l’échelle du bâtiment. Comme expliqué dans la démarche (cf paragraphe...), le concepteur doit optimiser la performance de l’enveloppe. Il faut prendre en compte les différents indicateurs mis en place pour détecter les risques de formation de moisissures et de condensation interne. D’autre part, intégrer la notion de dégradation thermique en fonction de l’humidité est importante. Lors de calculs réglementaires, l’optimisation de la résistance thermique cherche à gagner des dixièmes voire des centièmes sur le calcul alors que cette dégradation qui peut aller jusqu’à l’ordre de 15 à 20% en hiver. La réalité n’est donc pas très bien représentée par ces réglementations qui devraient prendre en compte plus de paramètres.

problématique

état de l'art

analyses de cas

intégration

CHAPITRE 4 : INTÉGRATION À LA DÉMARCHE DE CONCEPTION

CHAPITRE 4 : INTEGRATION A LA DEMARCHE DE CONCEPTION

Les pathologies dues aux transferts hygrothermiques sont une réalité dans le bâtiment. Les différentes études de cas sont une analyse critique des pratiques régulières dans la construction en France et en Belgique. Elles intègrent des techniques de construction mais aussi les paramètres matériaux. Cette analyse montre les problématiques qu'engendrent ces pratiques du point de vue hydrique. La question se pose de comment intégrer ces analyses de risque dans les phases de conception d'un bâtiment pour améliorer ces pratiques et en éviter les méfaits par des solutions architecturales.

1. Processus de conception

Pour commencer, le projet d'architecture débute par une esquisse qui évolue au cours de la conception vers un plan d'exécution. Les études d'ingénieries viennent alimenter ce travail au fur et à mesure.

1.1. Les étapes du projet

En France, les projets sont régulés par trois grandes étapes avant la mise en chantier : l'esquisse, l'avant projet et le projet. Cette régulation vient en partie de la loi MOP relative à la maîtrise d'ouvrage publique. Il s'agit d'étapes de validations du projet. La notion d'échelle y est importante puisqu'elle s'affine au cours du projet. La Belgique suit ces mêmes principes.

Le projet débute par une phase d'esquisse dans laquelle seront choisis les systèmes constructifs seulement. La définition des éléments de paroi sera donnée à quelques centimètres près. En général, il s'agit d'une étape de concours et le projet peut n'aboutir sur rien. La rentabilité est donc essentielle. Les études doivent être simples et grossières mais rester fiables malgré les nombreuses hypothèses sur lesquelles elles sont basées.

La deuxième étape concerne l'avant-projet. Le travail commence réellement à ce moment là. La précision du projet est plutôt de l'ordre du centimètre. Les nœuds constructifs commencent à être abordés par le calcul de certains ponts thermiques et la prise en compte des systèmes de fixation.

Pour finir, la dernière phase du projet concerne le dossier d'exécution où tout est défini au millimètre près. Les études sont très fines et le bâtiment peut-être construit correctement à partir de là.

Les calculs effectués à l'heure actuelle intègrent uniquement la notion de thermique et non les problèmes liés à l'humidité. Ces calculs se font dans toutes les phases du projet avec un affinement des calculs au cours du temps. Sont aussi abordés les problèmes du traitement de l'air avec le contrôle des conditions hygrothermique de l'ambiance intérieure : renouvellement d'air, chauffage, ventilation, ... Tout cela dans le but d'optimiser la performance énergétique de l'enveloppe mais aussi le confort des occupants. Les calculs réglementaires ne vont pas non plus dans ce sens. Ils préconisent des performances minimum et concentrent leurs efforts sur la notion énergétique principalement. Dans tout ce processus de conception, la question se pose alors de l'intégration des dimensionnements hygrothermiques pour éviter tout risque lié à l'humidité.

1.2. Le dimensionnement

Le dimensionnement hygrothermique connaît aussi des échelles différentes. Regardons ce qu'il en est en partant d'une échelle grossière vers une échelle fine.

Pour commencer, les analyses de cas ont montré que les règles de bonne pratique donnent une première approche avec des marges élevées mais fiable. Elles donnent ainsi des directives pour la conception qui seront affinées par la suite.

En rentrant dans les calculs, le plus simple et rapide est celui du f_{RSi} pour la paroi. Connaissant le lieu d'implantation du projet et la classe du bâtiment ou ses conditions hygrothermiques, la limite à respecter, $f_{RSi,min}$, est donnée par la norme (NF EN ISO 13788 s.d.). Cet indicateur peut ensuite être travaillé à l'aide de sa définition par l'équation [20.2]. Il peut donner une résistance thermique minimum de la paroi à respecter. C'est un travail grossier mais donnant ici aussi une première approche pour l'enveloppe.

La méthode de Glaser s'applique à des calculs unidimensionnels. C'est une méthode qui peut s'étudier dans la phase esquisse ou avant-projet, connaissant la composition de la paroi. Elle peut être complétée par une simulation unidimensionnelle sur Delphin (ou Wufi). Cette simulation prendra plus de temps de calcul mais sera plus précise et permettra de valider des cas limites. Elle permettra aussi de donner une évaluation des propriétés de la paroi (résistance thermique, ...) intégrant les transferts hygrothermiques avec une marge de l'ordre de 5% (cf paragraphe 2.2.1 du chapitre 3).

A partir du moment où le travail se fait en deux dimensions, il gagne en précision mais aussi en complexité. Il permet en particulier de voir le comportement des ponts thermiques et les risques qu'ils peuvent occasionnés. L'étude thermique statique des ponts thermiques permet une première évaluation en passant par l'indicateur f_{RSi} à partir des isothermes. Certains logiciels donnent directement cette valeur, autrement il faut la calculer à partir de l'équation [20.2]. Elle est ensuite comparée à la limite calculée à partir des conditions hygrothermiques $f_{RSi,min}$.

La dernière étape possible du dimensionnement qui est la plus fine est l'évaluation des transferts hygriques et thermiques en deux dimensions par une simulation sur logiciel. Les études de cas ont montré que cette évaluation apporte de l'information surtout sur le comportement hygrique en surface des ponts thermiques. Le logiciel fournit aussi les isothermes. Il peut aussi être utile à l'évaluation thermique du nœud constructif. La modélisation demande tout de même un temps conséquent de réflexion et de simulation, proportionnel à la complexité du calcul.

Ce paragraphe nous a permis de synthétiser les différentes méthodes de calcul de manière plus fine par rapport au descriptif donné dans l'état de l'art. Cet affinement a été rendu possible par la compréhension des calculs et leur application concrète sur des études de cas. Il ne faut pas oublier leur contenu. Chaque méthode évalue certains indicateurs visant les risques liés à l'humidité.

2. Dimensionnement hygienique et processus de conception

2.1. Evaluation des méthodes

Les différentes méthodes de dimensionnement peuvent être évaluées selon plusieurs critères, trois d'entre eux, les mieux maîtrisés dans cette étude, ont été choisis : le niveau de complexité, le temps et la fiabilité. Ces critères sont différents mais dépendants les uns des autres. Ils correspondent aux phases de dimensionnement à savoir dans l'ordre, conception, exécution et résultat. Pour chacune de ces évaluations, ont été défini des indicateurs mais qui sont ici approximatifs. Il existe d'autres critères tels que le coût (investissement, rentabilité, reproductibilité des études, ...), les impacts sur les études énergétiques, ... Ils ne sont pas négligeables mais leur évaluation n'a pas été possible ici par manque d'information. L'étude devrait être plus poussée.

2.1.1. Les échelles

Pour faire une évaluation objective des différentes méthodes, je propose de définir des échelles pour chaque critère.

Niveau de complexité

La précision du calcul est directement proportionnelle à la complexité de celui-ci. Par précision, il faut comprendre la définition des hypothèses et de la modélisation. Cela peut aussi engendrer des simplifications sur les équations prises en considération. Pour cette analyse, il y a trois niveaux de complexité correspondants aux différentes étapes du projet. L'échelle qui en découle est reprise dans le Tableau 22 ci-après.

Echelle de complexité	Appellation	Définition : sont connus et définis ...
++	Très complexe	... implantation précise et orientation du bâtiment, type d'occupation et conditions hygrothermiques intérieures (systèmes de ventilation, chauffage, ... mis en place), systèmes constructifs et leurs ponts thermiques
0	Complexité intermédiaire	... implantation sur le territoire, type d'occupation du bâtiment et conditions hygrothermiques visées, système constructif
--	Peu complexe	... implantation grossière sur le territoire, type de bâtiment, hypothèses sur les conditions intérieures, type de système constructif

Tableau 22 : Définition de l'échelle de complexité

Temps

Le temps est compris comme le temps nécessaire à la modélisation du système mais aussi le temps nécessaire au calcul. Dans le cadre de cette analyse bien précise, la modélisation comprend la phase de conception du détail, la définition des hypothèses et éventuellement la modélisation sur ordinateur. Les hypothèses sont définies en phase esquisse. Chaque étape de projet qui suit commence par une validation de ces hypothèses et un affinement si nécessaire.

Le temps de calcul est le temps nécessaire pour faire les calculs manuels, le taux de condensat dans la méthode de Glaser par exemple, ou le temps nécessaire au logiciel pour donner les résultats. Il faut aussi inclure dans ce temps de calcul la manipulation des données à la sortie du logiciel. Ici, de manière générale et assez logique, c'est le temps de modélisation qui prend le pas sur le temps de calcul. L'échelle est définie dans le Tableau 23 ci-dessous.

Echelle de temps	Définition	Fourchette de temps
++	modélisation et calcul sont très longs	Plus d'une demi-journée
+	modélisation longue et calcul court	Moins d'une demi-journée
-	modélisation courte et calcul long	Moins de deux heures
--	modélisation et calcul sont très courts	Moins d'une heure

Tableau 23 : Définition de l'échelle de temps

Fiabilité

La notion de fiabilité est essentielle dans le dimensionnement. Il s'agit de la fiabilité du résultat dans le sens de sa précision. Si une méthode prédit un risque, alors est-ce que ce risque existe réellement ou pas. Une échelle de fiabilité a alors été définie dans le Tableau 24 ci-dessous. La notion de risque doit être maîtrisée ici en parallèle avec les hypothèses de calcul.

Echelle de fiabilité	Définition
++	le résultat est fiable : il y a ou pas de risque
+	le résultat est moins fiable : s'il y a risque, il est détecté mais peut conclure sur un risque qui n'existe pas
-	le résultat est mitigé : il peut y avoir un risque mais une étude plus fine est nécessaire pour le prouver
--	le résultat n'est pas fiable

Tableau 24 : Définition de l'échelle de fiabilité

2.1.2. Application

Par rapport aux méthodes initialement citées, il y a un affinement entre les calculs unidimensionnels et bidimensionnels. Pour la suite, les méthodes seront indicées 1D et 2D en fonction. La pratique des calculs au travers des analyses de cas a permis de se faire une opinion assez objective de celles-ci par rapport aux différentes échelles fixées. Le Tableau 25 ci-dessous reprend en synthèse ces observations.

Pour le $f_{RSi,1D}$, toutes les études de cas ont montré que le calcul du facteur de température superficielle unidimensionnel était rapide et efficace.

Le passage en deux dimensions de ce facteur, $f_{RSi,2D}$, complexifie les calculs puisqu'il faut faire une simulation numérique des éléments en deux dimensions. Ce constat a été fait grâce aux études de

cas sur les ponts thermiques dans le but de corrélérer les facteurs f_{RSI} et ψ . En général, les ponts thermiques et ce genre de modélisation n'apparaissent qu'à partir de l'avant projet.

Pour la méthode de Glaser, les conclusions ont été assez rapides après l'étude unidimensionnelle de parois composées en début de ce travail. Le calcul est assez efficace et relativement rapide. Mais c'est la seule méthode où notre échelle de fiabilité est différente puisqu'elle est sécuritaire et implique des marges importantes. Les résultats ne seront pas précis.

A l'aide de ces mêmes études de cas, les observations sur la méthode de simulation dynamique à une dimension, Delphin_{1D}, ont montré que la méthode est plus complexe par la définition des hypothèses de calcul. Elles peuvent cependant être simplifiées mais il n'y a pas beaucoup d'intérêt à cela. Puisque cela reviendrait à un calcul de type Glaser amélioré. Le temps de calcul du logiciel est très rapide pour ces simulations.

La dernière méthode est la plus fine, il s'agit de la méthode de simulation dynamique en 2D, Delphin_{2D}. La définition des hypothèses est sans réelle limite dans leur finesse. Cependant, il ne sera pas forcément nécessaire d'affiner autant les calculs. Il faut trouver un compromis entre modélisation et résultats voulus. Ces observations ont été faites dès le passage à l'étude en deux dimensions.

Méthode	Echelle de complexité	Echelle de temps	Echelle de fiabilité
$f_{RSI,1D}$	--	--	++
$f_{RSI,2D}$	0	+	++
Glaser	0	-	+
Delphin _{1D}	++	+	++
Delphin _{2D}	++	++	++

Tableau 25 : Evaluation des méthodes de dimensionnement du risque hygrothermique

Pour conclure sur ce tableau, la fiabilité n'est pas un réel problème dans ce travail. Il faudrait pousser beaucoup plus loin l'étude et regarder d'autres paramètres pour affiner cette échelle. Ce critère reste important dans un processus de conception, il est essentiel qu'il garde sa place ici.

2.1.3. Synthèse

Afin de traiter les données fournies ci-dessus, il faut croiser les différentes échelles pour chaque méthode. Pour ce faire, le choix a été de créer un coefficient qui permettrait de représenter dans le déroulement du processus, à quel instant doit apparaître quelle méthode. Il sera noté Process. Pour calculer ce coefficient, il faut définir des valeurs numériques pour les échelles qui sont pour le moment définies très arbitrairement par des + et des -. L'idée est de se dire qu'une méthode peu complexe et rapide mais fiable doit arriver dès l'esquisse alors que des méthodes calculatoires lourdes arriveront à la fin dans l'étude du projet. Les échelles définies ci avant ont été construites dans cette logique. Il est donc possible de leur attribuer des coefficients communs, repris dans le Tableau 26. Ces coefficients doivent être compris entre 0 et 1. Multipliés par 100, ils donnent des pourcentages. Comme l'évaluation n'est pas parfaite dans ce contexte, l'échelle variera linéairement entre 0,1 et 0,9 ici. Une valeur de 0 serait trop pénalisante et 1 ne représenterait pas la réalité du contexte. Ces valeurs sont tout à fait arbitraires, il serait possible d'aller beaucoup plus loin dans leur

évaluation selon des critères qui ne sont pas maîtrisés ici. Mais cette première approche est suffisante pour le résultat voulu.

Valeur dans l'échelle	Coefficient associé
++	0,9
+	0,7
0	0,5
-	0,3
--	0,1

Tableau 26 : Valeurs des coefficients associés aux échelles

Pour continuer la démarche, il faut ensuite remettre à chaque méthode les coefficients qui lui correspondent. Le coefficient Process final sera la multiplication des trois coefficients. La multiplication a été choisie pour obtenir un coefficient compris entre 0 et 1. 0 représente le début du processus et 1 la fin.

Il serait envisageable de pondérer les différentes échelles entre elles. Par exemple, de donner de l'importance au temps de calcul, lié à la rentabilité, pour un bureau d'étude par exemple. Ici, le choix a été fait de laisser la même importance aux trois coefficients. Le résultat de cette évaluation est donné dans le Tableau 27.

Cette notion de pondération mériterait d'être creusée dans de futures études. Elle permettrait de donner un outil aux bureaux d'études leurs permettant de tayloriser leur profil de projet et des moyens (méthodes, outils, ...) à mettre en œuvre en fonction de leur ressources, budget et enjeux.

Méthode	Echelle de complexité	Echelle de temps	Echelle de fiabilité	Coefficient Process
$f_{RSi,1D}$	0,1	0,1	0,9	0,009
$f_{RSi,2D}$	0,5	0,7	0,9	0,315
Glaser	0,5	0,3	0,7	0,105
Delphin _{1D}	0,9	0,7	0,9	0,567
Delphin _{2D}	0,9	0,9	0,9	0,729

Tableau 27 : Coefficient Process des différentes méthodes

Indépendamment de ces réflexions, le coefficient Process a été calculé pour les grandes étapes du projet. Il représente le déroulement du processus, comparable à une échelle de temps. De manière approximative, les grandes étapes sont fixées à partir des tranches d'honoraires généralement pratiquées par la loi MOP, (Loi MOP 2011). Il s'agit de la phase étude sans prise en compte du chantier. 10% du temps est consacré à l'esquisse, 40% à l'avant-projet et 50% au projet. En cumulant ce temps, cela donne respectivement des coefficients Process de 0,1, 0,5 et 1.

La Figure 35 reprend en synthèse tous les coefficients Process. Visuellement, la démarche prend tout son sens et paraît cohérente avec le résultat recherché. Ce schéma permet bien de comprendre à quel moment il faut faire intervenir telle ou telle méthode. Les réflexions qui ont pu être faites tout au long de cette étude ainsi que les différentes études de cas valident l'apparition des méthodes dans ce sens là. C'est tout à fait logique.

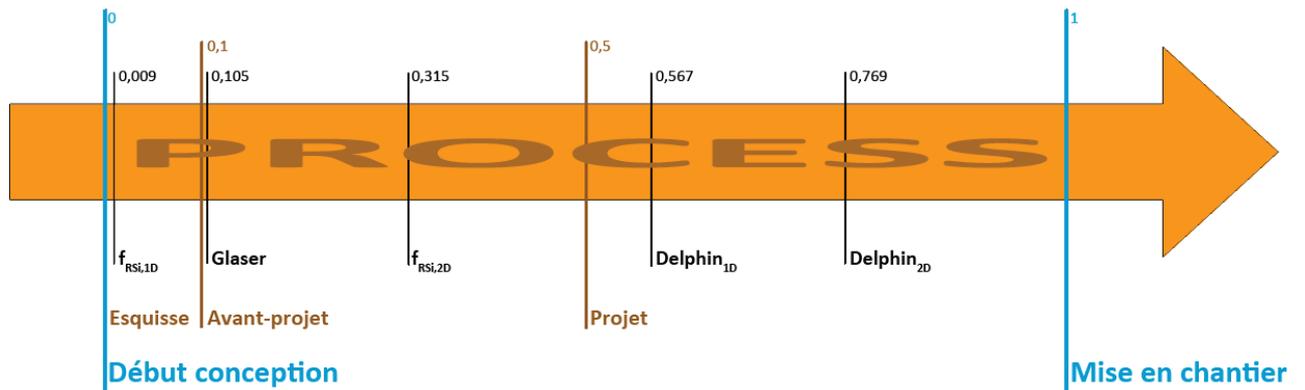


Figure 35 : Représentation du coefficient Process

Cette vue globale permet l'intégration des différentes méthodes de dimensionnement vis-à-vis du risque hygrothermique dans la démarche complète du projet. Mais cette évaluation est assez arbitraire.

Pour revenir à quelque chose de moins expérimental, un arbre d'aide à la décision utilisable dans un processus de conception des parois vis-à-vis de l'humidité a été conçu, Figure 36. Il synthétise toutes les observations qui ont été faites sur les méthodes et entre autre l'ordre dans lequel elles doivent être faites. Il apporte des informations de validation par rapport à la paroi. Par validation, est entendu la notion suivante : si la paroi valide les indicateurs définis dans ce rapport, il ne sera pas toujours nécessaire de pousser les études jusqu'au bout, évitant des frais inutiles.

Cet arbre d'aide à la décision est très simple dans sa conception pour élargir son application. Il peut tout à fait s'appliquer à l'échelle du projet complet ou uniquement sur une étape précise de celui-ci. En fonction de son utilisation, il pourra être alimenté par la définition des hypothèses, permettant ainsi une vue d'ensemble. En élargissant la réflexion, il pourrait se généraliser à différents types de dimensionnement, toujours dans l'optique de Taylorisation des profils de projet.

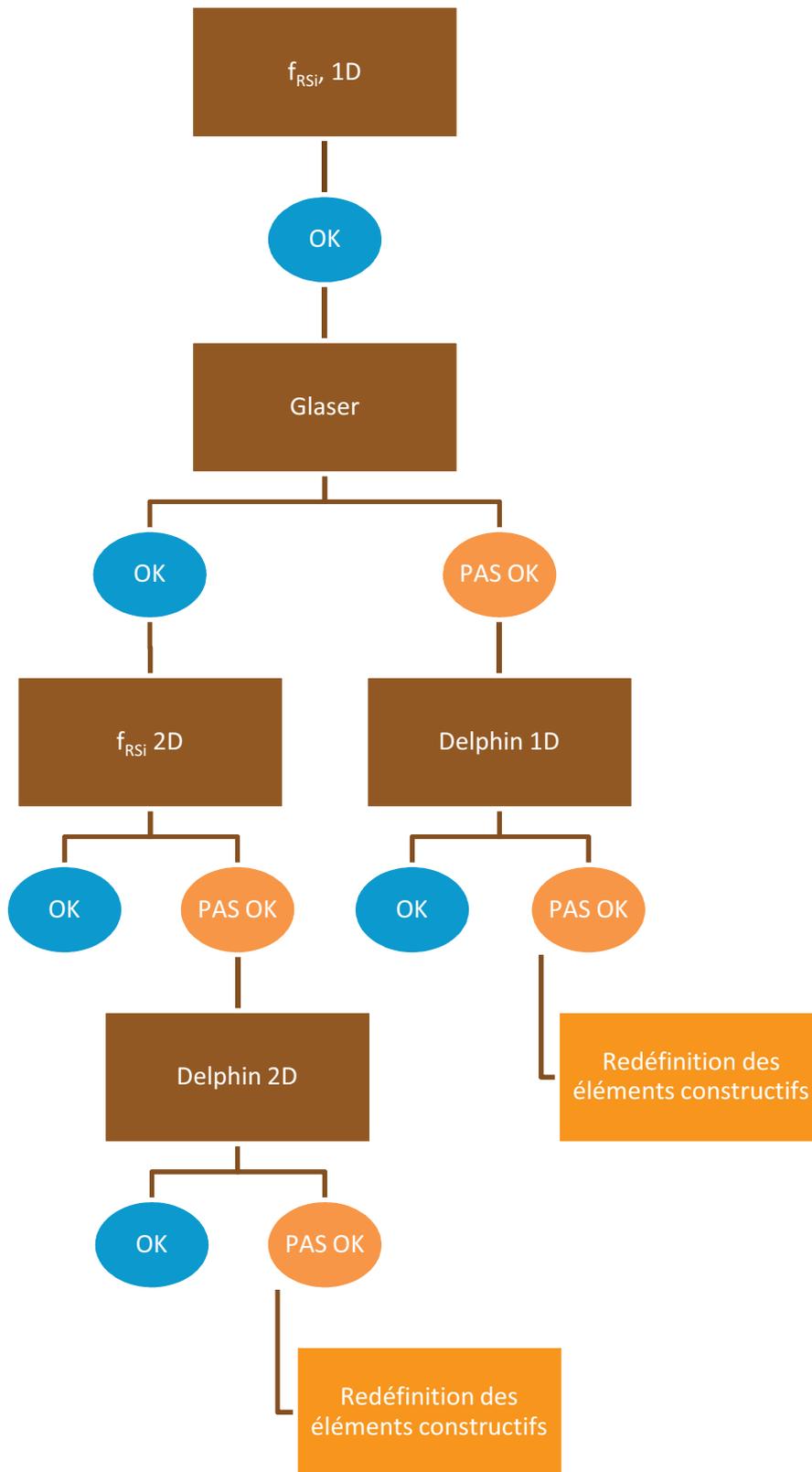


Figure 36 : Organigramme d'intégration dans la démarche de conception

2.2. Intégration de la dégradation thermique

Tout au long de ce rapport, la notion de dégradation de la résistance thermique a été abordée. C'est une réelle problématique. Elle doit être intégrée à la démarche de conception. En hiver, la paroi a tendance à se charger en eau, augmentant la conductivité thermique et dégradant l'efficacité thermique. L'hiver est la période la plus critique en termes de consommation d'énergie par rapport au chauffage principalement. Il est important d'intégrer cette notion au niveau du calcul thermique réglementé.

Les avis techniques relatifs aux isolants mesurent la conductivité thermique à 10°C pour un isolant stabilisé auparavant à l'équilibre hygrothermique 23°C/50% d'humidité relative. Il n'y a pas d'information sur la manière dont la température est diminuée. Si l'humidité absolue, la quantité d'eau, reste invariable, alors il y a dépassement de la saturation, ce qui est peu probable. Les logiciels de simulations dynamiques prennent les hypothèses suivantes : par défaut, les valeurs de références des matériaux sont données à une humidité relative à 80%. Delphin considère qu'à cette humidité relative, il n'y a pas de condensation capillaire, donc la fraction volumique est nulle. Au vu des courbes de sorption (cf notions de base, chapitre 1), cette hypothèse est acceptable.

Le calcul effectué en thermique pur prend en compte la conductivité thermique à sec du matériau. A savoir, celui donné par les avis techniques. En tenant compte de l'humidité dans les matériaux, l'étude a montré qu'il y avait des pertes en efficacité thermiques importantes. Le Tableau 28 reprend tous les cas analysés et les pertes qu'ils présentent. Les pertes constatées sur les différents cas étudiés sont en moyenne de 2 à 17%. Alors que le polyuréthane n'y réagit quasiment pas. Au minimum, les pertes sont d'environ 2%, du à l'humidité présente dans tous les matériaux composants la paroi, montrant que les pertes relatives à l'isolation se remarquent surtout sur les pertes maximum.

L'étude de cas sur la fibre de bois a montré que ce matériau était vraiment sensible à ce phénomène. Il s'agit d'un cas de matériau biosourcé, à base de fibres végétales ou animales. Ces matériaux ont des statuts particuliers dans les calculs réglementaires. Leur conductivité thermique est mesurée en tenant compte d'un certain taux d'humidité, (ACERMI 2013). Cette mesure permet de prendre en compte une dégradation hydrique de la conductivité thermique. C'est pourquoi il arrive que les matériaux biosourcés aient des performances moins importantes en calcul thermique.

Les préconisations sont donc les suivantes : intégrer une dégradation d'au moins 2% sur la résistance thermique pour les parois composées par une structure en béton. La dégradation dépend beaucoup de l'isolation mais aussi de sa mise en œuvre. Elle devrait suffire pour les matériaux ne possédant pas de conductivité liquide ni de diffusivité de vapeur d'eau. L'étude unidimensionnelle montre que pour la mise en place d'une isolation par l'extérieur, la dégradation sera de l'ordre des 5%. Pour une isolation par l'intérieur en laine minérale, avec la mise en place d'un pare vapeur, il faudra compter sur une perte de 10% environ.

Cas	$R_{th,stat}$	$R_{th,dyn}$			Pourcentage de pertes par rapport à $R_{th,stat}$		
		max	min	moyenne	min	max	moyenne
Etude 1D							
1 – Isolation par l'extérieur 15cm laine minérale	4,22	4,13	4,01	4,09	2,1	5	3,1
2 – Isolation par l'intérieur 15cm laine minérale	4,22	4,14	3,57	3,89	1,9	15,4	7,8
3 – Isolation par l'intérieur 25cm laine minérale	6,85	6,69	6,10	6,43	2,3	12	6,1
4 – Isolation par l'intérieur 15cm laine minérale+ pare vapeur	4,22	4,11	3,84	4,01	2,6	9	5
5 – Isolation mixte 10cm intérieur / 5cm extérieur	4,22	4,13	3,81	4,01	2,1	9	5
6 – Isolation mixte 7,5cm intérieur / 7,5cm extérieur	4,22	4,06	3,90	3,99	3,8	7,6	5,5
7 – Isolation mixte 5cm intérieur / 10cm extérieur	4,22	4,14	4,02	4,09	1,9	4,7	3,1
Etude 2D							
1 – Isolation par l'intérieur 5cm laine minérale sur plancher intermédiaire	1,59	1,57	1,14	1,39	1,3	28,3	12,6
2 – Isolation par l'intérieur 10cm laine minérale sur plancher intermédiaire	2,91	2,85	2,33	2,63	2,1	19,9	9,6
3 – Isolation par l'intérieur 15cm laine minérale sur plancher intermédiaire	4,22	4,14	3,57	3,89	1,9	15,4	7,8
4 – Isolation par l'intérieur 10cm fibre de bois sur plancher intermédiaire	2,91	2,62	2,23	2,41	10	23,4	17,2
5 – Isolation par l'intérieur 10cm polyuréthane sur plancher intermédiaire	2,91	2,85	2,85	2,85	2,1	2,1	2,1

Tableau 28 : Comparaison des résistances thermiques

CONCLUSION

Le but de ce mémoire était l'analyse des phénomènes physiques de nature thermo-hygrique à la surface et au sein de parois et des risques qu'ils engendrent. Cette étude montre qu'il existe des méthodes de dimensionnement couplant ces transferts. Ces méthodes sont sûres et complémentaires. Au travers d'indicateurs, il est possible de prédire ces risques avec plus ou moins de marge.

Se pose encore les questions des conséquences des moisissures au sein de parois. Pour les matériaux putrescibles, la conclusion des dégradations a été étudiée. Il faudrait pousser les études sur les autres matériaux pour voir si cela pourrait engendrer des dégradations, diminuant leur durabilité. Mais aussi étudier si les transferts des moisissures peuvent arriver en surface, compromettant la santé des occupants.

Les systèmes constructifs des bâtiments à haute performance énergétique viennent vers des solutions dites moins « classiques » et plus sujettes aux risques hygrothermiques. L'emploi de matériaux biosourcés est intéressant vis-à-vis du bilan carbone mais ce sont des matériaux fragiles et sensibles au dimensionnement (hétérogénéité, absorption d'eau, ...). Mais ces solutions ne sont pas encore généralisées dans la construction et ce mémoire a montré que l'étude hygrothermique ne devrait pas être négligée pour autant.

Cette prise en compte des risques hygrothermique et surtout ses conséquences devrait être étudié de manière plus globale : quel impact ont ces études sur les performances énergétiques, le confort, le coût global ?

L'humidité a été observée d'un point de vue négatif dans toute cette analyse. Mais certaines propriétés telles que la chaleur latente sont à exploitées pour le confort des habitants. En effet, elle participe à la régulation de l'ambiance intérieure. Des études sont en cours sur l'inertie hygrique des matériaux tels que la terre ou le béton de chanvre par exemple. C'est un point de vue tout à fait intéressant et à exploiter.

Pour finir, la synthèse des différentes méthodes est reprise par un arbre d'aide à la décision. Il pourrait être transposé au processus d'ingénierie. Cette démarche d'intégration du dimensionnement dans la conception peut être systématisée. Pour ce faire, il faut avancer sur l'affinement des différents critères à prendre en compte, leurs échelles respectives et leurs pondérations. Le coût en particulier est un réel enjeu qui n'a pas été étudié ici. Pourtant il mériterait une attention spécifique pour les différents bureaux d'études, ayant un réel impact sur les études.

NOMENCLATURE

A	coefficient d'absorption d'eau	$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s}^{1/2})$	p_{sat}	pression de vapeur saturante	Pa
C_{ep}	coefficient de consommation d'énergie primaire	$\text{kWh}/(\text{m}^2.\text{an})$	p_v	pression partielle de vapeur	Pa
c_m	capacité thermique massique des matériaux secs	$\text{J}/(\text{kg.K})$	q	densité de flux de chaleur	W/m^2
c_l	capacité thermique massique de l'eau liquide	$\text{J}/(\text{kg.K})$	q_{lat}	densité de flux de chaleur latente	W/m^2
D_k	coefficient de diffusion moléculaire de Knüdsen	m^2/s	q_{sens}	densité de flux de chaleur sensible	W/m^2
D_v	coefficient de diffusion moléculaire	m^2/s	R	constante des gaz parfaits	$\text{J}/(\text{mol.K})$
D_w	coefficient de transport capillaire ou diffusivité hydrique	m^2/s	R_D	résistance à la diffusion de vapeur d'eau	$\text{m}^2.\text{s.Pa}/\text{kg}$
E_{sol}	densité totale du flux du rayonnement solaire incident	W/m^2	R_{se}	résistance superficielle extérieure	$\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$
e	épaisseur du matériau	m	R_{si}	résistance superficielle intérieure	$\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$
f_{RSi}	facteur de température superficielle intérieure		R_{th}	résistance thermique	$\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$
g_k	densité de flux de vapeur selon Knüdsen	$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$	R_w	résistance à l'humidité, coefficient d'échange	m/s
g_l	densité de flux de liquide	$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$	r	rayon du pore	m
g_p	densité de flux d'humidité de l'eau provenant des précipitations	$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$	s	pression de succion ou succion	Pa
g_v	densité de flux de vapeur	$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s})$	S_d	épaisseur d'air équivalente	m
H	enthalpie massique	J/m^3	T	température	K ou °C
h	coefficient d'échange thermique surfacique	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	T_a	température de l'air	K ou °C
h_c	coefficient d'échange convectif	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	T_{eq}	température équivalente	K ou °C
h_e	chaleur latente d'évaporation	J/kg	T_r	température radiante moyenne	K ou °C
h_m	coefficient d'échange convectif massique	m/s	T_{surf}	température de surface	K ou °C
h_r	coefficient d'échange radiatif	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	t	temps	S
K_l	perméabilité liquide ou conductivité liquide	$\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$	U	coefficient de transmission thermique	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$
k_{rain}	exposition à la pluie	-	U_{bat}	coefficient de déperdition du bâtiment (RT2005)	$\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$
l _{pm}	libre parcours moyen	m	u	teneur en eau massique	kg/kg
M	masse molaire	kg/mol	V	volume	m^3
m	masse	kg	W_p	perméance	$\text{kg}/(\text{m}^2.\text{s.Pa})$
p	pression	Pa	w	teneur en eau en masse par volume	kg/m^3
p_c	pression capillaire	Pa	w_c	quantité de condensat	kg/m^3
p_{cond}	pression de condensation	Pa			

Lettres grecques

α_{sw}	coefficient d'absorption	-	λ	conductivité thermique	W/(m.K)
α_{albedo} ou α_{sol}	coefficient d'albedo, absorptivité du rayonnement solaire	-	μ	facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	-
δ_0	perméabilité à la vapeur d'eau de l'air	kg/(m.s.Pa)	σ_s	constante de Stefan-Boltzmann	W/(m ² .K ⁴)
δ_p	perméabilité à la vapeur d'eau du matériau	kg/(m.s.Pa)	v	humidité absolue	kg/m ³
ϵ	émissivité de grande longueur d'onde	-	ρ	masse volumique	kg/m ³
θ	porosité	-	Ψ	teneur en eau volumique, fraction volumique	m ³ /m ³
φ	humidité relative	%	ψ	coefficient de déperditions dues à un pont thermique linéaire	W/(m.K)

Indices

0	air ambiant	max	maximum
1D	unidimensionnel	min	minimum
2D	bidimensionnel	s	état sec
a	air	sat	valeur à la saturation
bât	bâtiment	se	surface extérieure
dyn	dynamique	si	surface intérieure
ext	extérieur	stat	statique
int	intérieur	surf	surface
interf	interface	tot	total
l	liquide	v	vapeur
m	matériau	w ou e	eau

LISTES : FIGURES, TABLEAUX, GRAPHIQUES ET EQUATIONS

Figures

Figure 1 : Poids relatifs (en % nombre) des désordres répartis selon les dysfonctionnements et l'année d'apparition - Extrait de (AQC 2012)	9
Figure 2 : Coût relatif de désordre (coût réparation en % coût construction) des désordres répartis selon les dysfonctionnements et l'année d'apparition - Extrait de (AQC 2012)	10
Figure 3 : Répartition par manifestation des désordres (en % de l'effectif) selon le type d'ouvrage – Extrait de (AQC 2012)	10
Figure 4 : Part des logements concernés pour chaque difficulté recensée - Extrait de (CHESNEL 2004)	11
Figure 5 : Diagramme de l'air humide – Extrait (STI 2013) - Annotations en couleur ajoutées par l'auteur	19
Figure 6 : Isothermes de sorption - Extrait de (H. M. KÜNZEL 1995) et (M. WOLOSZYN 2010)	21
Figure 7 : Exemple d'isothermes de sorption et désorption - Extrait de (JANNOT, 2008)	21
Figure 8 : Perméabilité à la vapeur d'eau - Extrait (CSTB, ABELÉ, et al. 2009)	22
Figure 9 : Perméance à la vapeur d'eau - Extrait (CSTB, ABELÉ, et al. 2009)	23
Figure 10 : Epaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur - Extrait (CSTB, ABELÉ, et al. 2009)	24
Figure 11 : Teneur en humidité hygroscopique – Extrait (Architecture et Climat 2013)	26
Figure 12 : Effet de la température (blanc) et de l'humidité (noir) et de leurs directions – Extrait (KÜNZEL H. , 2003)	29
Figure 13 : Profils de température - Comparaison entre deux maçonneries	34
Figure 14: Variation de la classe d'humidité en fonction de la température extérieure - Extrait norme (NF EN ISO 13788 s.d.)	42
Figure 15 : Illustration du risque de condensation superficielle et de formation de moisissures– Extrait (STI 2013) - Annotations en couleur ajoutées par l'auteur	43
Figure 16 : Illustration schématique des flux de température	45
Figure 17 : Illustration schématique - Exemple de comportement du facteur de température superficielle	46
Figure 18 : Exemple de paroi composée - Transfert de flux de vapeur d'eau en bleu avec accumulation sur une interface	47
Figure 19 : Exemple de graphique de diffusion de vapeur sans condensation interne – Extrait norme (NF EN ISO 13788 s.d.)	49
Figure 20 : Exemple de graphique de diffusion de vapeur avec condensation interne à une interface entre deux matériaux - Extrait norme (NF EN ISO 13788 s.d.)	50
Figure 21 : Schéma - Courbes de rétention d'eau - Extrait (DAÏAN 2010)	60
Figure 22 : Comparaison de deux maillages	61
Figure 23 : Exemples de maillages d'éléments de 0,1m de large avec des coefficients d'étirement respectivement de 115, 125 et 150	61
Figure 24 : Paroi composée modélisée sous Delphin pour validation du pas de temps	65
Figure 25 : Cas 1 - Illustration	68
Figure 26 : Cas 2 - Illustration	69
Figure 27 : Cas 3 - Illustration	71
Figure 28 : Cas 4 - Illustration	73
Figure 29 : Isolation mixte - Illustration de l'incrémentat	75
Figure 30 : Modélisation du pont thermique	80
Figure 31 : Modélisation sous Delphin du pont thermique	80
Figure 32 : Pont thermique - Plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur	92
Figure 33 : Pont thermique - Plancher haut en isolation par l'extérieur	92
Figure 34 : Pont thermique - Plancher bas en isolation par l'extérieur	93
Figure 35 : Représentation du coefficient Process	105
Figure 36 : Organigramme d'intégration dans la démarche de conception	106

Tableaux

Tableau 1 : Risque de formation de moisissures - Extrait (SEDLBAUER et KRUS 2003)- Traduit par l'auteur	12
Tableau 2 : Liste des mécanismes de transport de chaleur et d'humidité, leurs causes et potentiels de transport - Extrait (H. M. KÜNZEL 1995), traduit par l'auteur	30
Tableau 3 : Propriétés des matériaux	33
Tableau 4 : Synthèse des indicateurs	39
Tableau 5 : Comparatif des méthodes de calcul	40
Tableau 6 : Classe d'hygrométries intérieures - Extrait norme (NF EN ISO 13788 s.d.)	41
Tableau 7 : Coefficients de transfert de chaleur en surface intérieure et épaisseur équivalente pour la diffusion de vapeur dans la couche limite - Extrait norme (NF EN 15026 s.d.)	53
Tableau 8 : Comparaison des différents outils de calcul	55
Tableau 9 : Etude comparative - Propriétés des matériaux	59
Tableau 10 : Etude comparative - Coefficients	59
Tableau 11 : Définition des maillages pour essais	62
Tableau 12: Définition des pas de temps pour essais	66
Tableau 13 : Méthode de Glaser sur l'isolation mixte - Variations de la répartition de l'isolant dans la composition de paroi	75
Tableau 14 : Comparatif des résultats du risque de condensation interne - OK = pas de risque détecté	78
Tableau 15 : Propriétés des isolants	86
Tableau 16 : Comparatif des résultats de l'isolation par l'intérieur sur plancher intermédiaire - OK = pas de risque détecté - NV = non validé, risque	90
Tableau 17 : Conductivité thermique des isolants pour l'étude des ponts thermiques	91
Tableau 18 : Variantes de plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur	92
Tableau 19 : Variantes de plancher haut en isolation par l'extérieur	92
Tableau 20 : Variantes de plancher bas en isolation par l'extérieur	93
Tableau 21 : Comparatif calcul du condensat statique et dynamique	97
Tableau 22 : Définition de l'échelle de complexité	101
Tableau 23 : Définition de l'échelle de temps	102
Tableau 24 : Définition de l'échelle de fiabilité	102
Tableau 25 : Evaluation des méthodes de dimensionnement du risque hygrothermique	103
Tableau 26 : Valeurs des coefficients associés aux échelles	104
Tableau 27 : Coefficient Process des différentes méthodes	104
Tableau 28 : Comparaison des résistances thermiques	108

Graphiques

Graphique 1 : Quantité de condensat pour les différents maillages	63
Graphique 2 : Quantité de condensat pour les différents maillages - Zoom entre le jour 150 et le jour 170 sur 4 maillages	63
Graphique 3 : Humidité relative en surface - Influence de l'heure de début de calcul	66
Graphique 4 : Humidité relative en surface en fonction du pas de temps de calcul – Zoom entre les jours 165 et 175 pour des pas de temps grossiers	67
Graphique 5 : Humidité relative en surface en fonction du pas de temps de calcul - Zoom entre les jours 165 et 167 pour plusieurs calculs par jour	67
Graphique 6 : Teneur en eau totale - Comparaison des parois des cas 1 et 2	70
Graphique 7 : Quantité de condensat - Cas 3 : Isolation par l'intérieur 25cm	72
Graphique 8 : Teneur en eau totale – Comparaison des parois des cas 2 et 3	72
Graphique 9 : Teneur en eau totale – Comparaison des parois des cas 2 et 4	74

Graphique 10 : Teneur en eau totale - Comparaison de la paroi simple et de la paroi avec pont thermique pour 10cm d'isolation par l'intérieur	82
Graphique 11 : Résistance thermique - Comparaison entre la tranche basse et haute du mur pour 10cm d'isolant	83
Graphique 12 : Humidité relative à l'interface entre le béton et l'isolant - Comparaison entre la tranche basse et haute du mur pour 10cm d'isolant	83
Graphique 13 : Humidité relative en surface - Zoom sur une année du 1er janvier (jour 93) au 31 décembre 2000 (jour 458) – Comparaison entre la tranche basse et haute du mur pour 10cm d'isolant	84
Graphique 14 : Teneur en eau totale - Comparaison en fonction de l'épaisseur d'isolant	85
Graphique 15 : Humidité relative à l'interface entre isolant et béton - Cas du polyuréthane calculé sur 5ans	87
Graphique 16 : Teneur en eau totale - Comparaison des différents types d'isolant	87
Graphique 17 : Humidité relative à l'interface entre le béton et l'isolant - Calcul sur 20 pour une isolation par l'intérieur en polyuréthane	88
Graphique 18 : Teneur en eau totale - Calcul sur 20 pour une isolation par l'intérieur en polyuréthane	88
Graphique 19 : f_{RSi} en fonction de ψ (W/(m.K)) pour les deux variantes de température	93
Graphique 20 : f_{RSi} en fonction de ψ (W/(m.K)) par type de configuration pour la variante à 19°C intérieur	94
Graphique 21 : f_{RSi} en fonction de L_i pour la variante à 19°C intérieur	95

Equations

$p_{sat}(T) = 610,5e^{\left(\frac{17,269T}{237,3+T}\right)} \text{ pour } T \geq 0^\circ C \quad [1.1]$	$p_{sat}(T) = 610,5e^{\left(\frac{21,875T}{265,5+T}\right)} \text{ pour } T < 0^\circ C \quad [1.2]$
$v = \frac{m_v}{V} \quad [2]$	$\varphi = 100 \cdot \frac{v}{v_{sat}} \quad [3.1]$
$\varphi = 100 \cdot \frac{p_v}{p_{sat}} \quad [3.2]$	$\theta = \frac{V_{vides}}{V_{tot}} \quad [4]$
$u = \frac{m_e}{m_s} \quad [5.1]$	$w = \rho_s u \quad [5.2]$
$\Psi = \frac{\rho_s}{\rho_w} u \quad [5.3]$	$s = p_c - p_o \quad [6.1]$
$s = \rho_l \frac{RT}{M_v} \ln \varphi \quad [6.2]$	$W_p = \frac{\delta_p}{e} \quad [7.1]$
$R_D = \frac{1}{W_p} = \frac{e}{\delta_p} \quad [7.2]$	$\mu = \frac{\delta_o}{\delta_p} \quad [8]$
$\delta_o = 2 \cdot 10^{-7} \frac{T^{0,81}}{p_o} \quad [9]$	$S_d = \mu e \quad [10.1]$
$S_d = \delta_o R_D \quad [10.2]$	$K_l = D_w \frac{\partial w}{\partial s} \quad [11]$
$g_v = -D_v \nabla p_v \quad [12]$	$D_v = \frac{1}{3} l p m \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad [13]$
$g_k = -D_k \nabla p_v \quad [14.1]$	$D_k = \frac{2}{3} r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad [14.2]$
$g_v = -\delta_p \nabla p_v \quad [15.1]$	$g_v = -\frac{\delta_o}{\mu} \nabla p_v \quad [15.2]$
$g_l = -K_l \nabla p_l \quad [16.1]$	$p_c = p_l - p_o \quad [16.2]$
$g_l = -K_l \nabla s \quad [16.3]$	$K_l = D_w \frac{\partial w}{\partial s} \quad [16.4]$

$g_l = -D_w \nabla w$ [16.5]	$\vec{g}_Q = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)$ [17.1]
$q_{lat} = h_e g_v$ [17.2]	$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(h_e \nabla g_v)$ [17.3]
$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(g_l + g_v)$ [17.4]	$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla(K_l \nabla s + \delta_p \nabla p_v)$ $= \nabla\left(K_l \frac{\partial s}{\partial w} \nabla w + \delta_p \nabla p_v\right)$ [17.5]
$g_v = h_m[(\rho_v)_{frontière} - (\rho_v)_{ambiance}]$ [18.1]	$q = h_c(T_{frontière} - T_{ambiance})$ [18.2]
$h_m = h_c \frac{D_{v0}}{\lambda_{ambient}}$ [18.3]	$p_i = p_e + 1,1 \cdot \Delta p$ [19.1]
$v_i = v_e + 1,1 \cdot \Delta v$ [19.2]	$f_{RSi} = \frac{T_{Si} - T_e}{T_i - T_e}$ [20.1]
$f_{RSi} = \frac{R - R_{Si}}{R}$ [20.2]	$p_{sat}(T_{Si, min}) = \frac{p_i}{0,8}$ [21]
$g_v = \delta_0 \frac{\Delta p_v}{S_{d, tot}}$ [22.1]	$S_{d, tot} = \sum_{j=1}^N S_{d, j}$ [23.1]
$q = \lambda \frac{\Delta T}{e} = \frac{\Delta T}{R_{th}}$ [22.2]	$T_i = T_{ext} + \frac{R_{th, i}}{R_{th, tot}}(T_{int} - T_{ext})$ [22.3]
$R_{th, i} = R_{se} + \sum_{j=1}^i R_{th, j}$ [23.2]	$w_c = \delta_0 \left(\frac{p_{v, int} - p_{cond}}{S_{d, tot} - S_{d, cond}} - \frac{p_{cond} - p_{v, ext}}{S_{d, cond}} \right)$ [24]
$(c_m \rho_m + c_w w) \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial(q_{sens} + q_{lat})}{\partial x}$ [25.1]	$q_{sens} = h(T_{eq} - T_{surf})$ [25.2]
$h = h_c + h_r$ [25.3]	$T_{eq} = T_a + \frac{1}{h}(E_{sol} \alpha_{sol} + (T_r - T_a) h_r)$ [25.4]
$g_l = \frac{\Delta s}{R_w}$ [25.5]	$g_v = \frac{\delta_0}{S_d}(p_{v, a} - p_{v, s})$ [25.6]
$g_{l, max} = K_l \frac{\partial s}{\partial x}$ [25.7]	$g_l = \min(g_p; g_{l, max})$ [25.8]
$h_{c, se} = 4 + 4v$ [26.1]	$h_{r, se} = \varepsilon \sigma_s 4 \bar{T}^3$ [26.2]
$S_{d, se} = \frac{1}{67 + 90v}$ [26.3]	$T_{int}(t) = 21 + 2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} t + \pi\right) + \sin\left(2\pi t - \frac{\pi}{2}\right)$ [27]
$\lambda(\psi) = 0,6\Psi_l + \lambda_s$ [28]	

BIBLIOGRAPHIE

"RAGE". *Rapport - Retours d'expériences dans les bâtiments à basse consommation & risques de non-qualité*. France: Programme d'accompagnement des professionnels "Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012" (RAGE), 2012.

ABELÉ Charlotte, avec la collaboration de ABRAHAM Bernard, FONTAN José, GILLIOT Stéphane, POMPÉO Claude, QUENARD Daniel, SALAGNAC Jean-Luc. *Guide technique, Transferts d'humidité à travers les parois, Évaluer les risques de condensation*. France: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 2009.

ACERMI. *Cahier Technique 1, Détermination de la conductivité thermique*. Paris: Association pour la certification des matériaux isolants, CSTB - LNE, 2013.

AFNOR. <http://www.afnor.org>. 2013. (accès le 04 15, 2013).

AQC. *Sycodés 2012, Les indicateurs d'évolution de la qualité des constructions*. Paris: Agence Qualité Construction, 2012.

Architecture et Climat. <http://www.energieplus-lesite.be>. 2013. (accès le 04 10, 2013).

Article 4 de la loi Grenelle 1. Code Civil Français - LOI n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en oeuvre du Grenelle de l'environnement (1).

BS 5250:2002. Code of practice for control of condensation in buildings, British Standards.

CCHS. <http://www.cchst.ca>. 2006. (accès le 04 23, 2013).

CHESNEL, Hélène. *La qualité des logements, L'humidité est le défaut le plus fréquent*. Nord-Pas-de-Calais: INSEE, 2004.

COURGEY Samuel, MOYA Jean-Pierre. *Manuel pratique sur les différents critères de choix des matériaux d'isolation thermique dans la réhabilitation du bâti existant*. France: Agence Nationale de l'Habitat (Anah), 2012.

COURGEY, Samuel, et Jean-Pierre MOYA. *Manuel pratique sur les différents critères de choix des matériaux d'isolation thermique dans la réhabilitation du bâti existant*. France: Agence Nationale de l'Habitat (Anah), 2012.

CSTB. *Guide technique spécialisé pour la constitution d'un dossier de demande d'Avis Technique : Isolants à base de fibres végétales ou animales - Produits isolants destinés à l'isolation thermique par l'intérieur*. Commission chargée de formuler des Avis Techniques; d'isolation, Groupe spécialisé n°20 - Produits et procédés spéciaux, e-Cahiers du CSTB 3713, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 2012.

CSTB, et al. *Guide technique, Transferts d'humidité à travers les parois, Évaluer les risques de condensation*. France: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 2009.

DAÏAN, Jean-François. *Equilibre et transferts en milieux poreux*. Grenoble: Plateforme HAL - Centre pour la communication scientifique directe CCSD, 2010.

Décision de la cour administrative d'appel de Paris. 92PA00907 92PA01033 (Cour administrative d'appel de Paris, 1e chambre - Mentionné dans les tables du recueil Lebon, 7 octobre 1993).

Décision de la cour d'appel de Douai. (Cour d'appel de Douai, 1re chambre, 24 mai 2004).

Décret du 19 avril 2007, Belgique. Décret-cadre modifiant le Code wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine en vue de promouvoir la performance énergétique des bâtiments - CWATUPE.

Décret du 26 octobre 2010, France. Code Civil Français - Décret n°2010-1269 du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions.

DIN 4108-3. Allemagne: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Deutsches Institut für Normung, Juli 2001.

EVARD, Arnaud, Aline BRANDERS, et André DE HERDE. *Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en brique, Guide d'aide à la conception*. Louvain : Architecture et Climat - Service Public de Wallonie : DGO4 - Département de l'énergie et du bâtiment durable, 2010.

HAUGLUSTAINE, Jean-Marie, Francy SIMON, Catherine BALTUS, et Sophie LIESSE. *La conception globale de l'enveloppe et l'énergie*. Belgique: Université de Liège - Université Catholique de Louvain - Ministère de la Région Wallonne, 2006.

<http://reef.cstb.fr>. 2013. (accès le 05 22, 2013).

JANNOT, Yves. *Isothermes de sorption : modèles et détermination*. France: Cours de transferts thermique, Laboratoire d'énergétique et de mécanique théorique et appliquée (LEMETA), 2008.

KRUS, Martin. *Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials, Theoretical Principles and New Test Methods*. Stuttgart (Allemagne): Fraunhofer-Institute für Bauphysik, 1996.

KÜNZEL, Hartwig M. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Stuttgart (Allemagne): Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.

KÜNZEL, Hartwig. *Pare-vapeurs pour la protection de l'enveloppe des bâtiments contre un excès d'humidité*. Holzkirchen, Allemagne: Fraunhofer-Institut Bauphysik, 2003.

Loi MOP. *Guide à l'intention des maîtres d'ouvrages publics pour la négociation des rémunérations de maîtrise d'oeuvre*. Paris: Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques, 2011.

NERVETTI, Giovanni, et Franco SOMA. *La verifica termoigrometrica delle pareti*. Italie: Hoepli, 1982.

NF EN 15026. Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments - Evaluation du transfert d'humidité par simulation numérique, AFNOR.

NF EN ISO 10211. Ponts thermiques dans les bâtiments - Flux thermiques et températures superficielles, AFNOR.

NF EN ISO 13788. Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments, AFNOR.

pro clima. *Savoir 2013/14, Economiser de l'énergie - Eviter les dégâts au bâtiment - Vivre dans un habitat sain*. Allemagne: MOLL bauökologische Produkte GmbH, 2013.

ROULET, Claude-Alain. *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments - 2e édition mise à jour et complétée*. Lausanne (Suisse): Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2010.

SEDLBAUER, Klaus, et Martin KRUS. *Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht*. Allemagne: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2003.

SEDLBAUER, Klaus, KRUS, Martin. *Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht*. Allemagne: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 2003.

SIA180. *Projet de norme - Protection thermique, humidité et climat intérieur dans les bâtiments*. Zurich (Suisse): Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2012.

STI, CERPET -. <https://www.cerpet.adc.education.fr>. 2013. (accès le 03 05, 2013).

UNFCCC. <http://unfccc.int>. 2013. (accès le 04 23, 2013).

WOLOSZYN, monika. *Modélisation hygro-thermo-aérauliquedes bâtiments multizones, Proposition d'une stratégie de résolution du système couplé*. Lyon: Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Ecole doctorale de l'INSA, 1999.

WOLOSZYN, Monika. *Transferts d'humidité dans les bâtiments*. Lyon: Cours, Université Claude Bernard, Lyon 1, 2010.

1.	Hypothèses générales	120
1.1.	Calcul de $f_{RSi, min}$	120
1.2.	Propriétés des matériaux	121
1.2.1.	<i>Courbes de rétention d'eau</i>	121
1.2.2.	<i>Conductivité liquide, Kl</i>	123
1.2.3.	<i>Diffusivité de la vapeur d'eau Dv</i>	124
1.3.	Validation du maillage	125
1.4.	Temps	126
1.4.1.	<i>Influence de l'heure de début de calcul</i>	126
1.4.2.	<i>Influence du pas de temps</i>	127
2.	Etudes de cas	129
2.1.	Etude 1D : parois composées	129
2.1.1.	<i>Méthodes statiques</i>	129
2.1.2.	<i>Cas 1 : Isolation par l'extérieur (15cm)</i>	130
2.1.3.	<i>Cas 2 : Isolation par l'intérieur (15cm)</i>	132
2.1.4.	<i>Cas 3 : isolation par l'intérieur (25cm)</i>	133
2.1.5.	<i>Cas 4 : isolation par l'intérieur (15cm) et pare vapeur</i>	135
2.1.6.	<i>Isolation mixte</i>	136
a.	Méthode de Glaser à Uccle	136
b.	Méthode de Glaser à Uccle et température intérieure en moyenne inférieure de 1°C	137
c.	Cas 5 : Isolation mixte - 10cm intérieur / 5cm extérieur	137
d.	Cas 6 : Isolation mixte – 7,5cm intérieur / 7,5cm extérieur	139
e.	Cas 7 : Isolation mixte - 5cm intérieur / 10cm extérieur	141
2.2.	Etude 2D : Ponts thermiques	143
2.2.1.	<i>Plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur</i>	143
a.	Méthodes statiques	143
b.	Cas initial	144
c.	Effet du pont thermique sur les propriétés de la paroi	146
d.	Au niveau du pont thermique	147
2.2.2.	<i>Etude paramétrique</i>	148
a.	Variation de l'épaisseur d'isolant	148
b.	Variation du type d'isolant	151
2.2.3.	<i>Généralisation : Moisissures et ponts thermiques</i>	154

1. Hypothèses générales

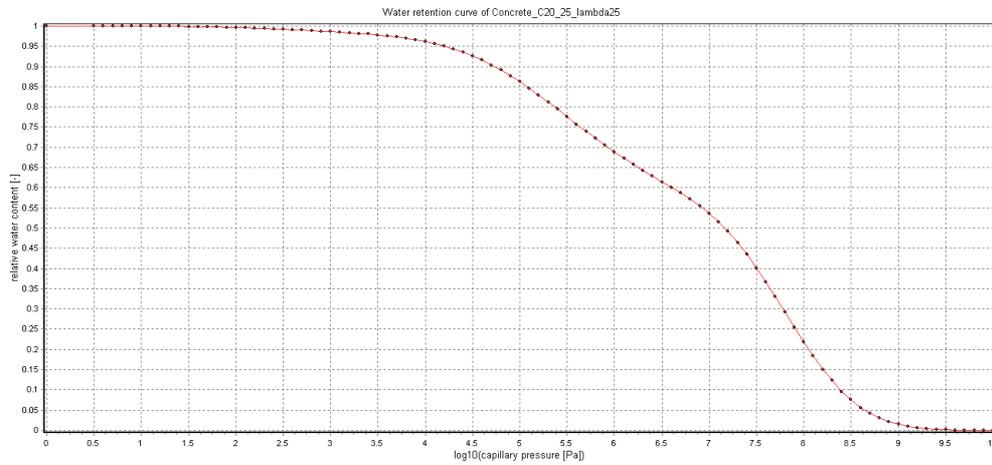
1.1. Calcul de $f_{RSI,min}$

Mois	Température moyenne extérieure	HR extérieure	Logements - cuisine										$f_{RSI,min}$ calculé	$f_{RSI,min}$ accepté				
			$\Delta(p)$	pi	psat(Tsi)	Tsi,min	Ti	HR intérieure	psat (Te)	pe								
1	3,8	81	873	1612	2015	17,6	20,5	66,9	804	652	873	1612	2015	17,6	20,5	66,9	0,828	0,828
2	5,0	73	809	1531	1914	16,8	19,6	67,1	873	642	809	1531	1914	16,8	19,6	67,1	0,808	0,808
3	9,5	65	567	1396	1745	15,4	19,1	63,1	1187	773	567	1396	1745	15,4	19,1	63,1	0,611	0,611
4	11,6	63	453	1358	1698	14,9	19,1	61,6	1367	860	453	1358	1698	14,9	19,1	61,6	0,445	0,445
5	17,1	62	156	1379	1724	15,2	19,6	60,6	1951	1208	156	1379	1724	15,2	19,6	60,6	-0,793	0,000
6	20,8	58	0	1411	1764	15,5	20,4	58,8	2449	1411	0	1411	1764	15,5	20,4	58,8	0,000	0,000
7	22,3	58	0	1544	1930	16,9	21,5	60,4	2684	1544	0	1544	1930	16,9	21,5	60,4	0,000	0,000
8	22,6	59	0	1627	2034	17,8	22,4	60,2	2738	1627	0	1627	2034	17,8	22,4	60,2	0,000	0,000
9	17,6	67	132	1499	1874	16,5	22,9	53,7	2007	1354	132	1499	1874	16,5	22,9	53,7	-0,203	0,000
10	13,8	75	335	1559	1948	17,1	22,9	55,8	1577	1191	335	1559	1948	17,1	22,9	55,8	0,361	0,361
11	7,3	81	688	1583	1979	17,3	22,4	58,4	1019	826	688	1583	1979	17,3	22,4	58,4	0,665	0,665
12	4,8	80	823	1591	1989	17,4	21,5	62,0	858	687	823	1591	1989	17,4	21,5	62,0	0,755	0,755
																$f_{RSI,min}$	0,828	

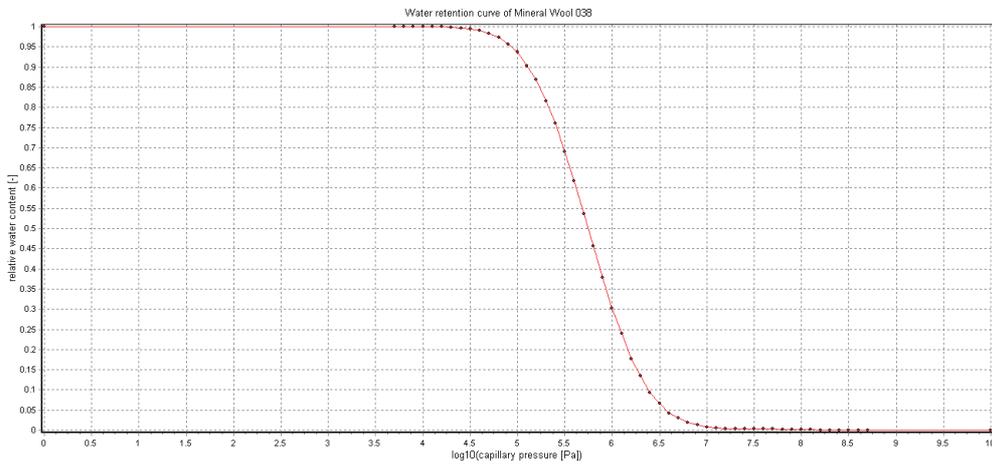
1.2. Propriétés des matériaux

1.2.1. Courbes de rétention d'eau

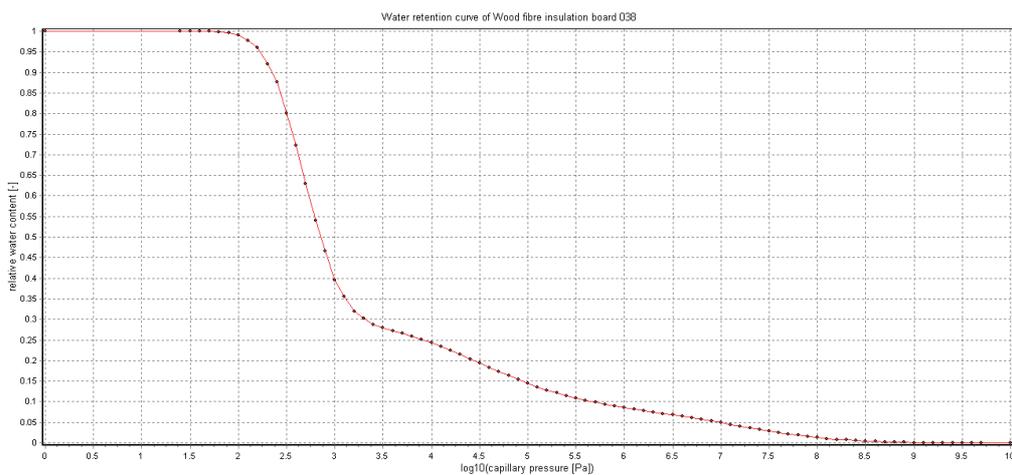
Béton



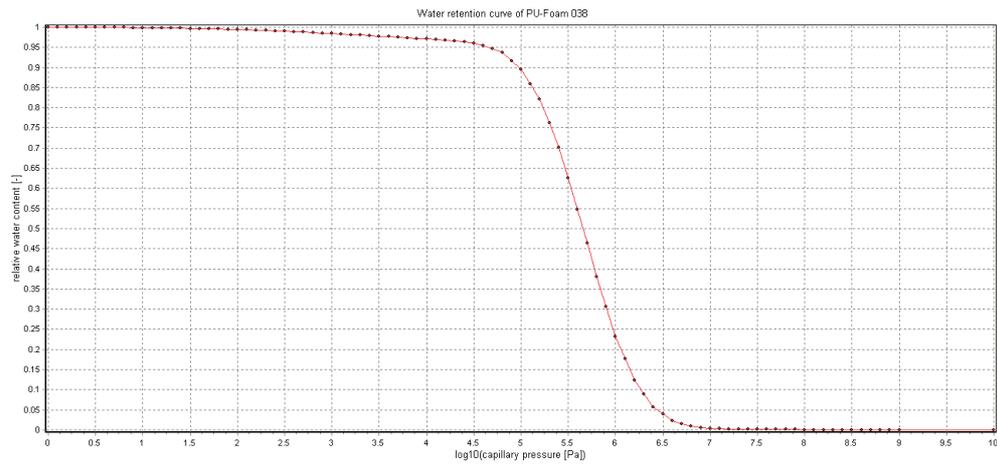
Laine minérale



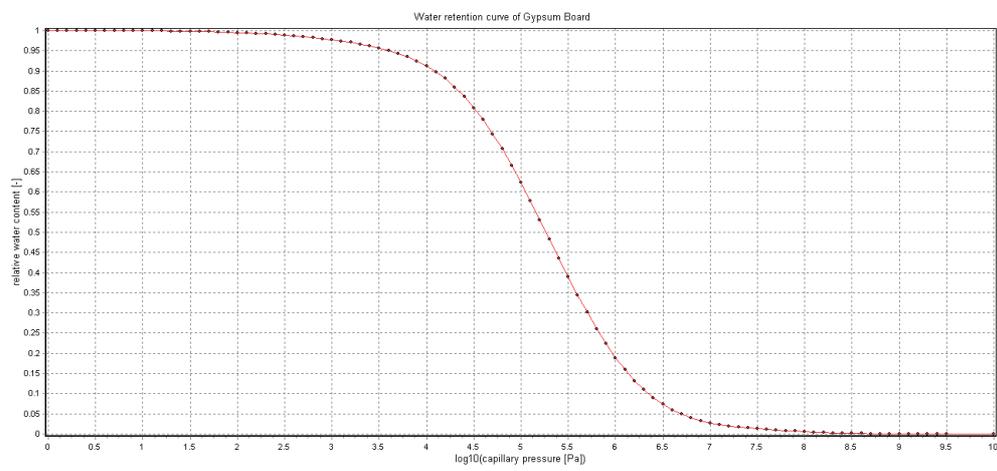
Fibre de bois



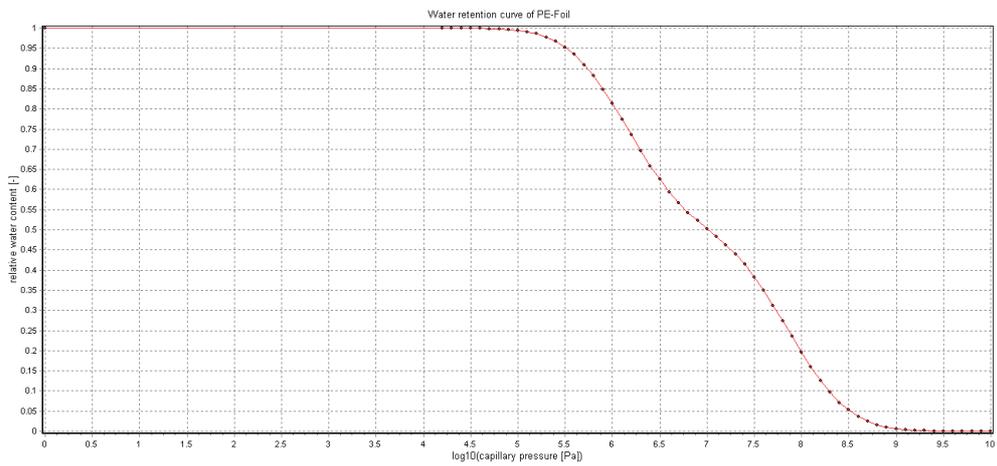
Polyuréthane



Plâtre

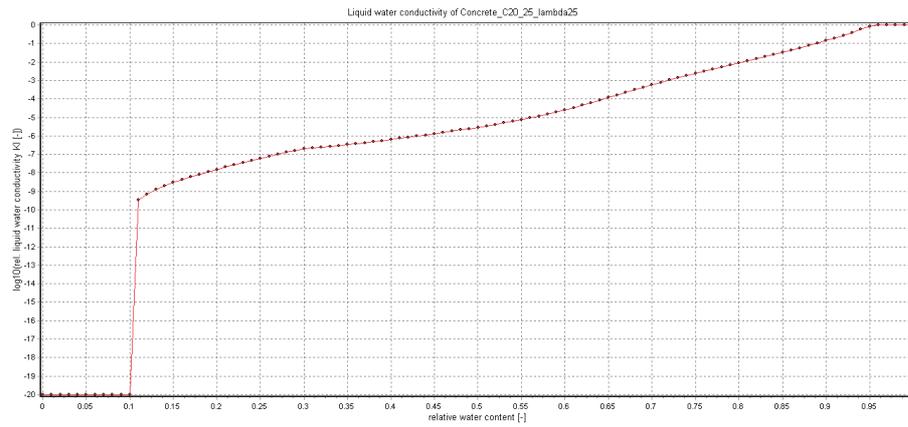


Pare vapeur

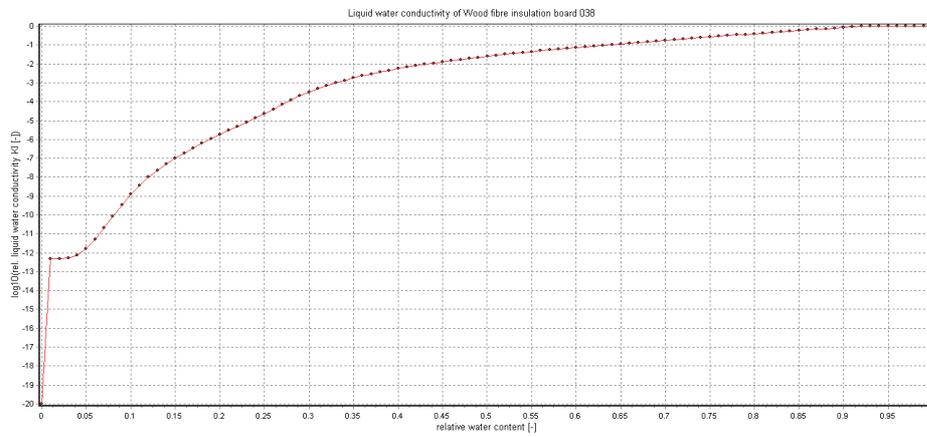


1.2.2. Conductivité liquide, KI

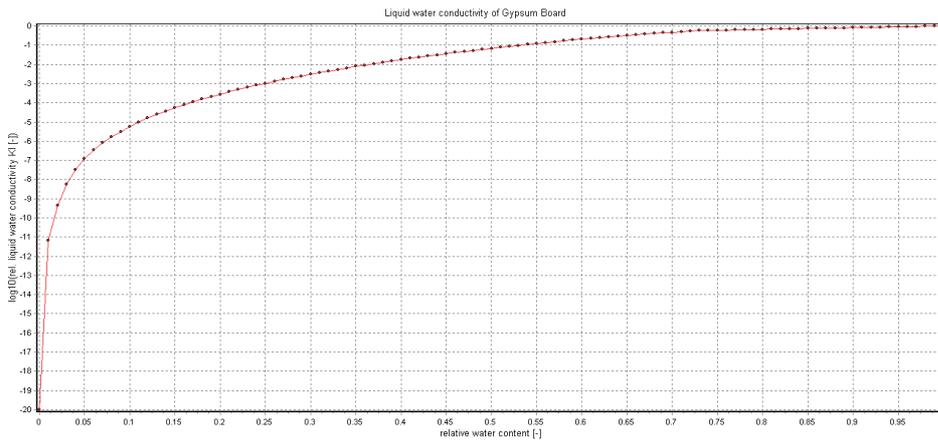
Béton



Fibre de bois

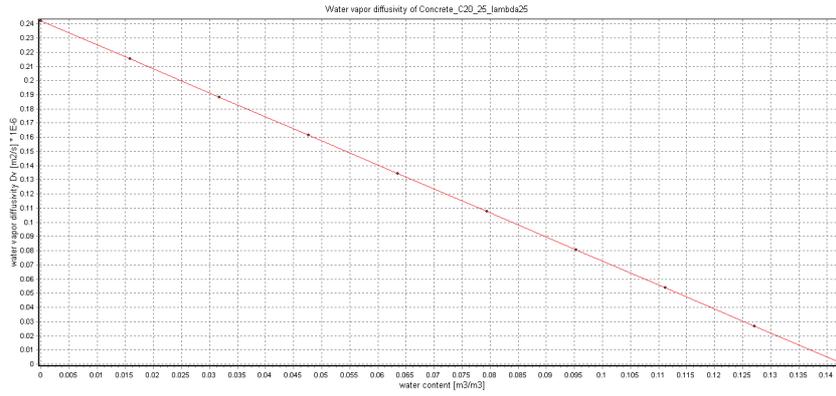


Plâtre

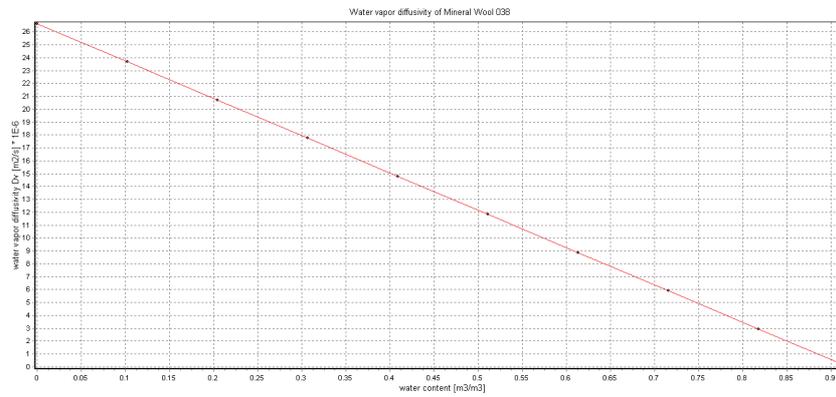


1.2.3. Diffusivité de la vapeur d'eau D_v

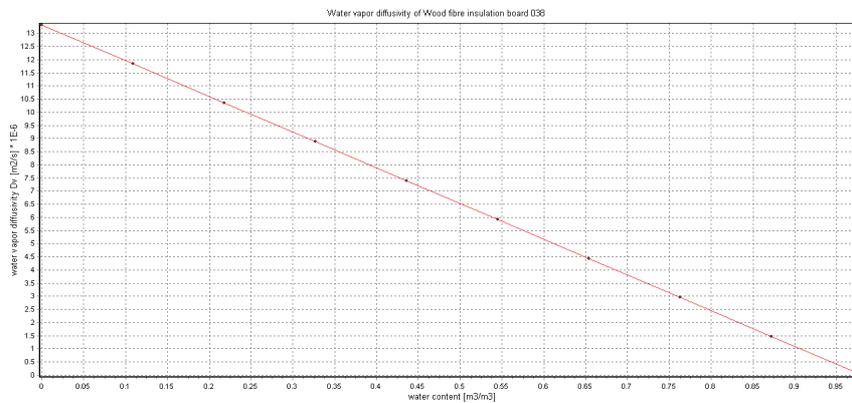
Béton



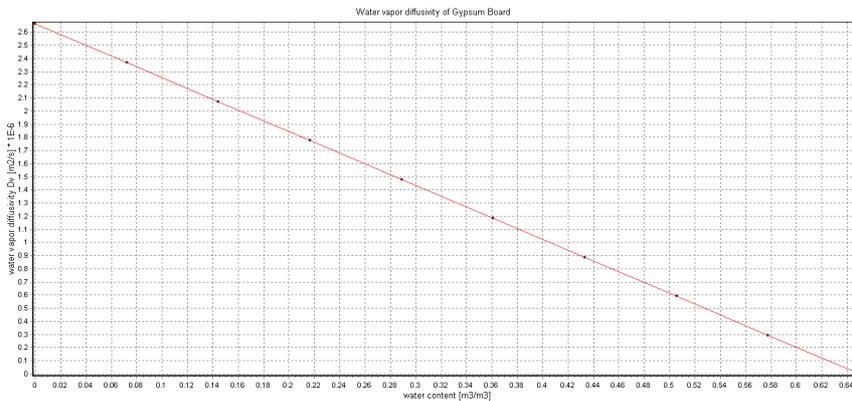
Laine minérale



Fibre de bois

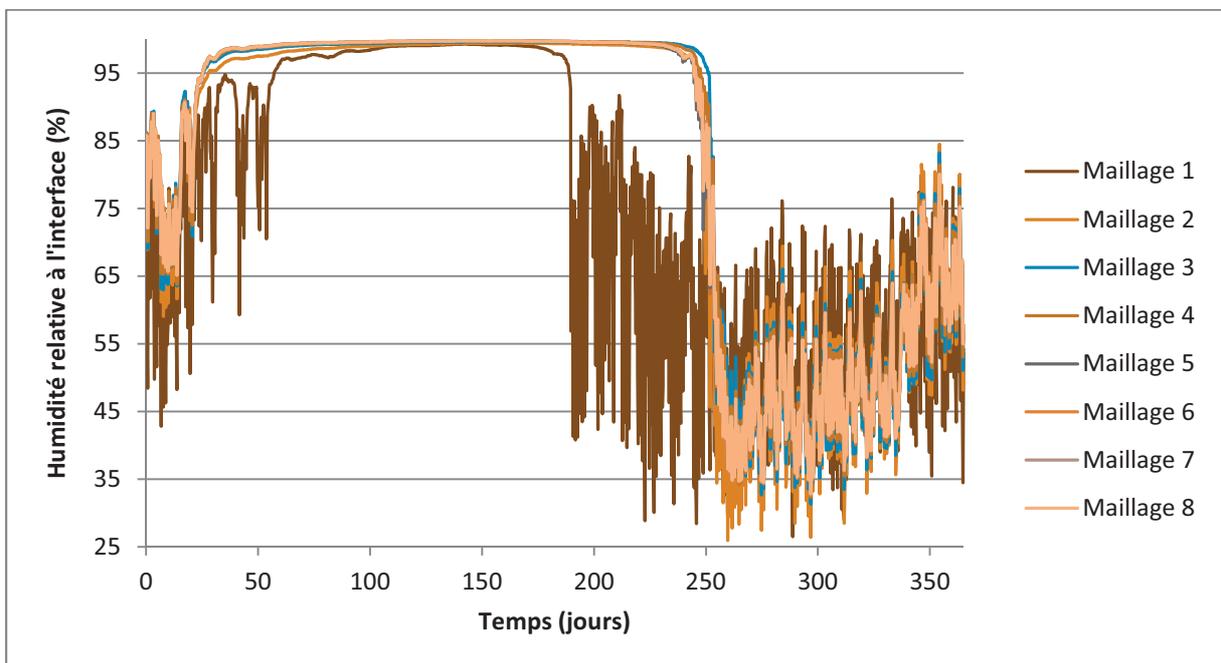
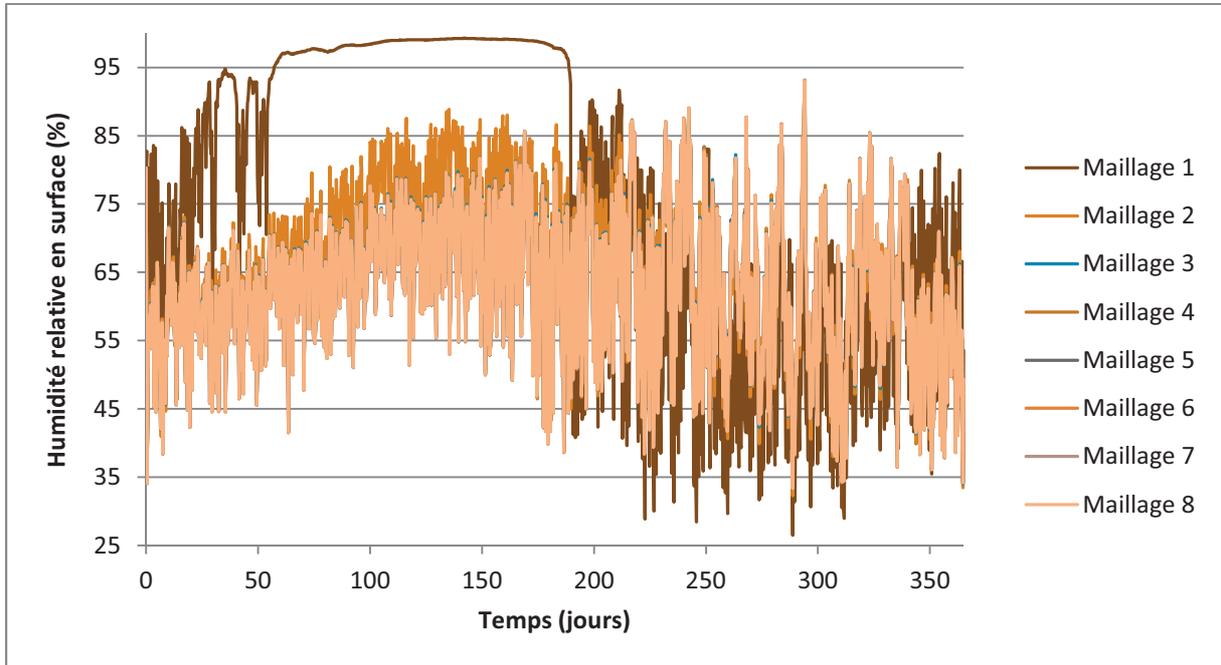


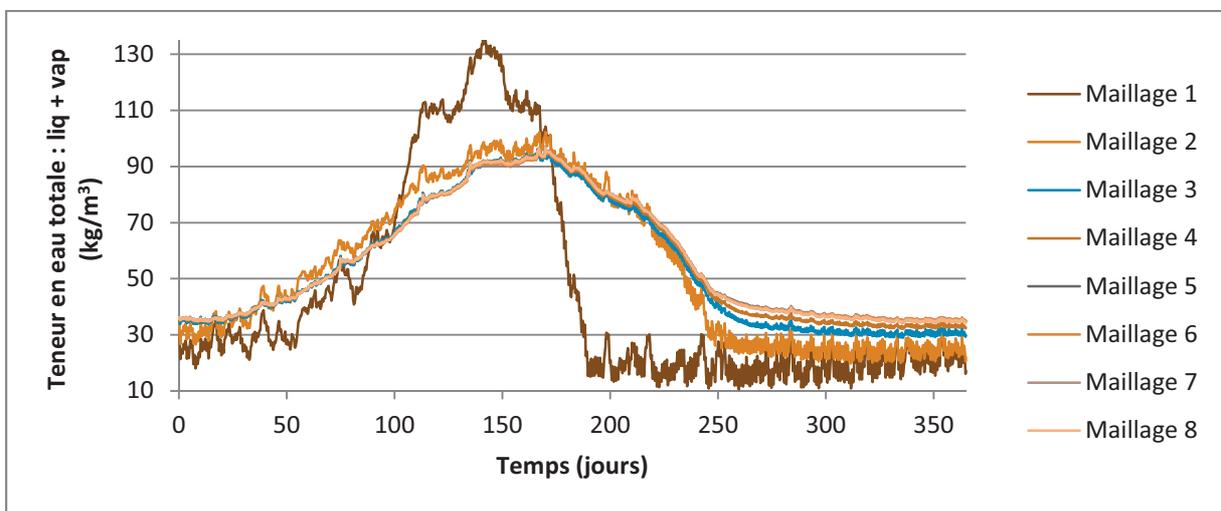
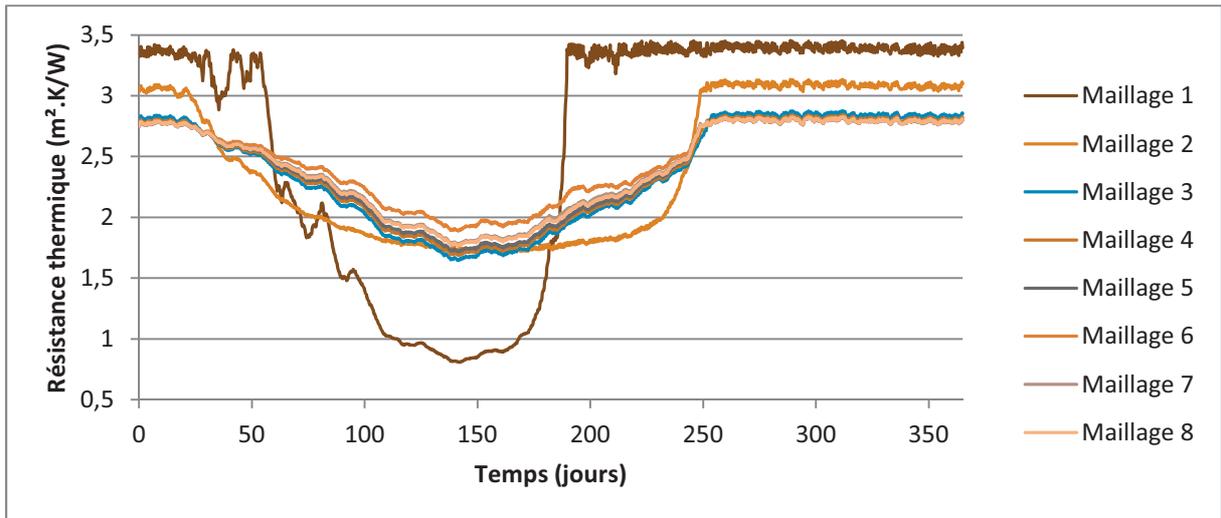
Plâtre



1.3. Validation du maillage

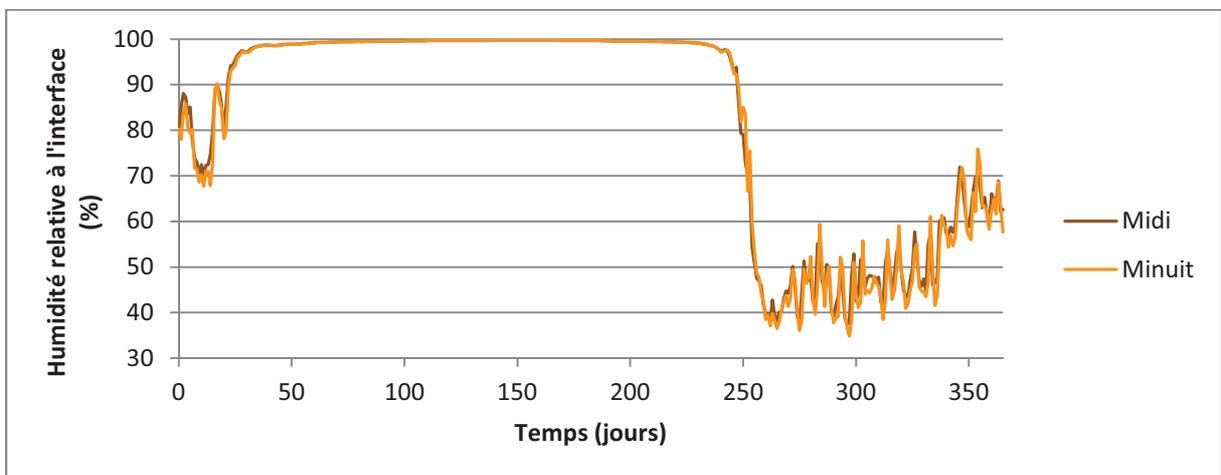
Etude d'une paroi en béton (15cm) et isolée par l'intérieur (10cm de laine minérale)

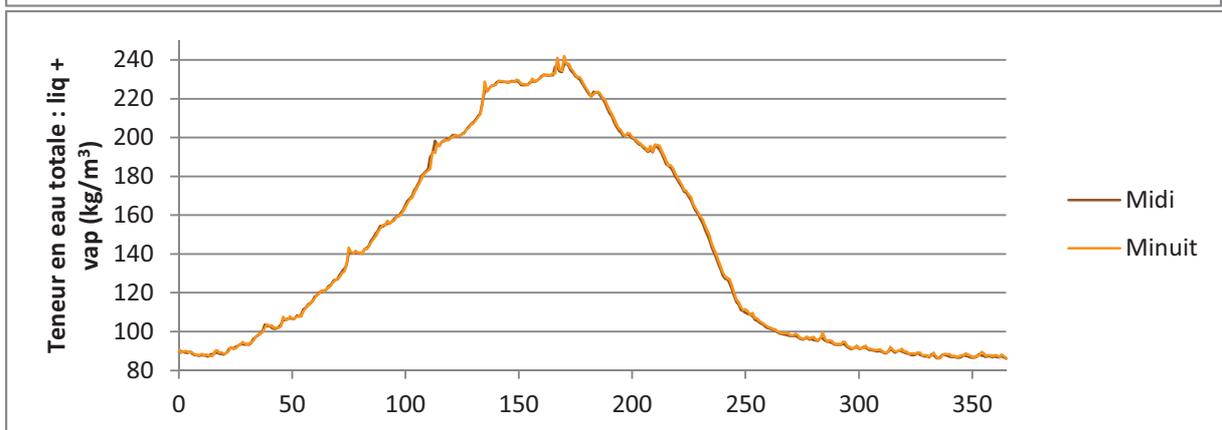
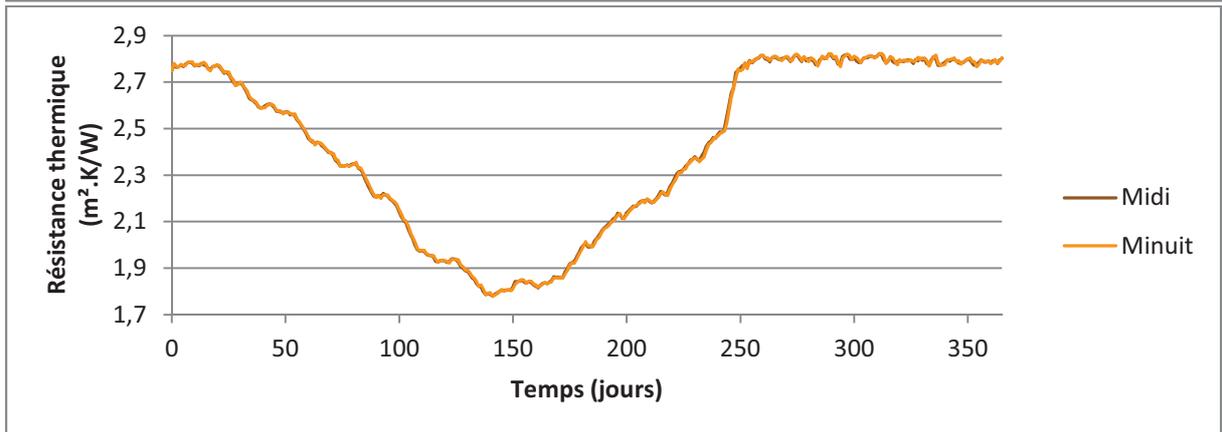
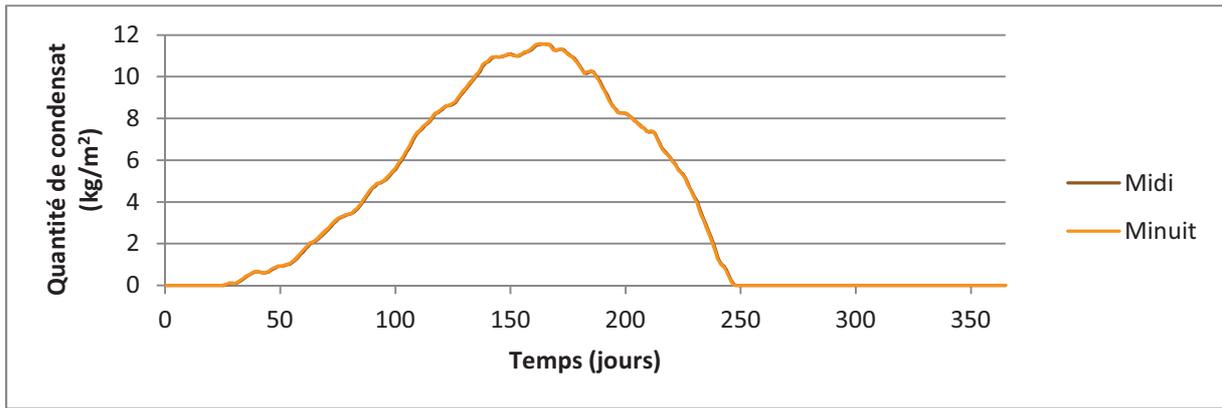




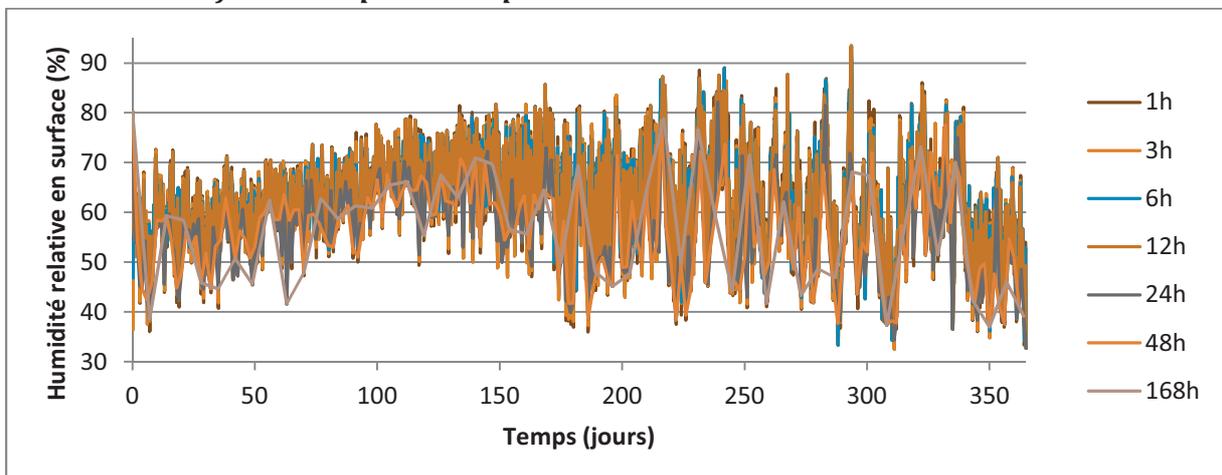
1.4. Temps

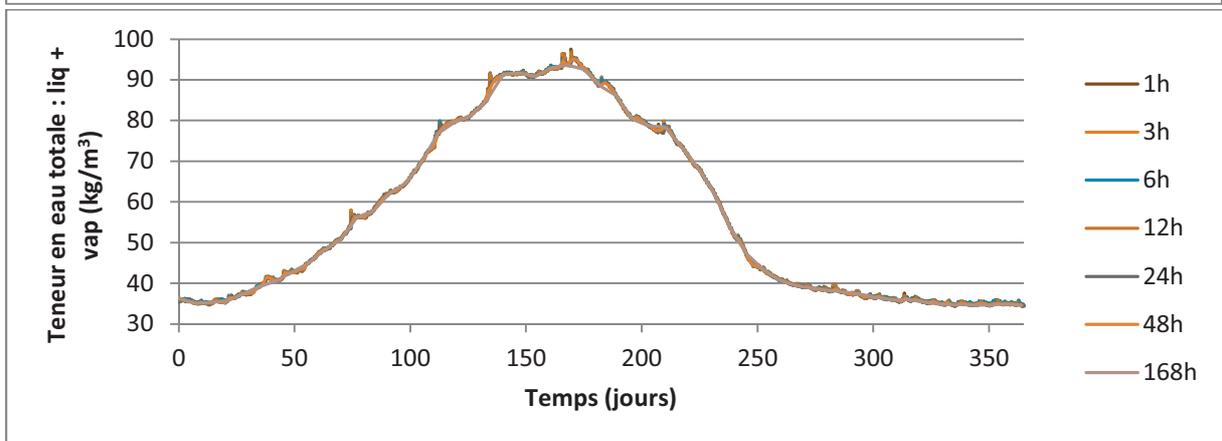
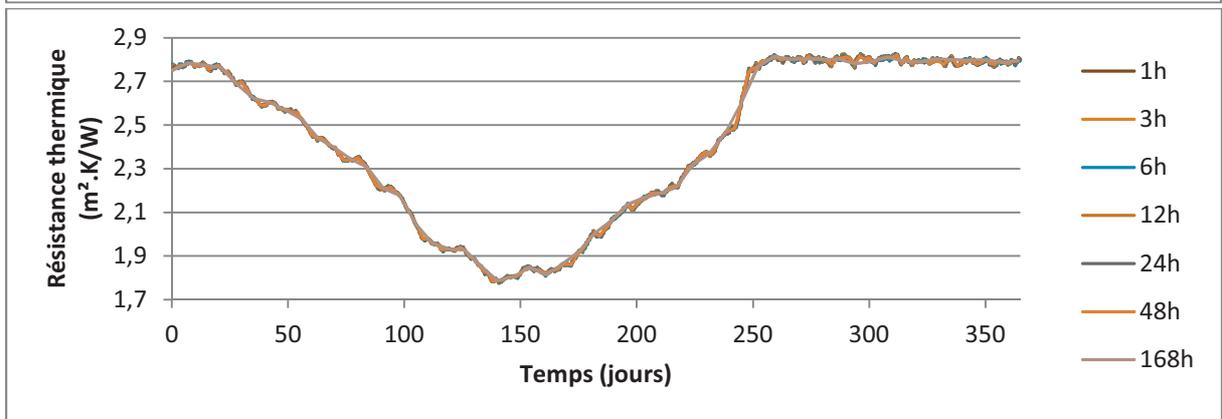
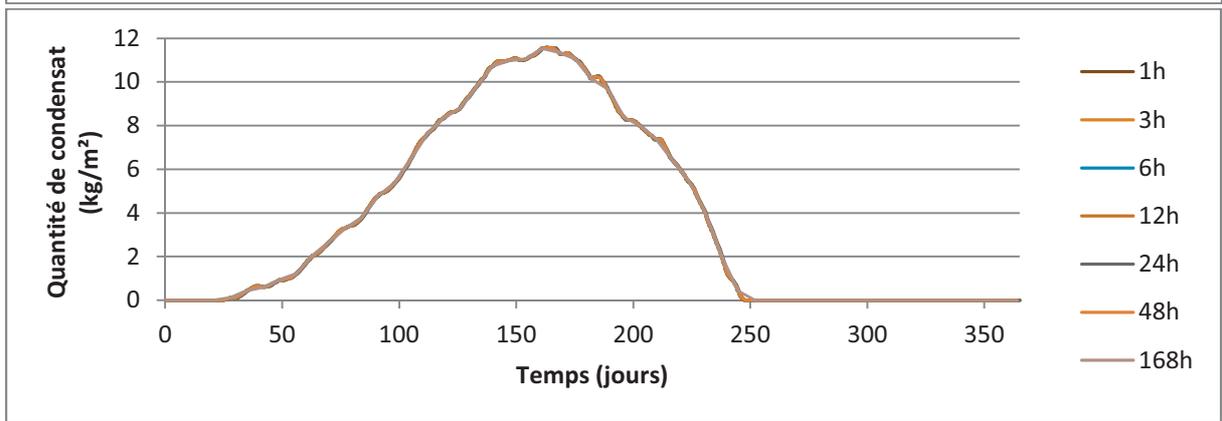
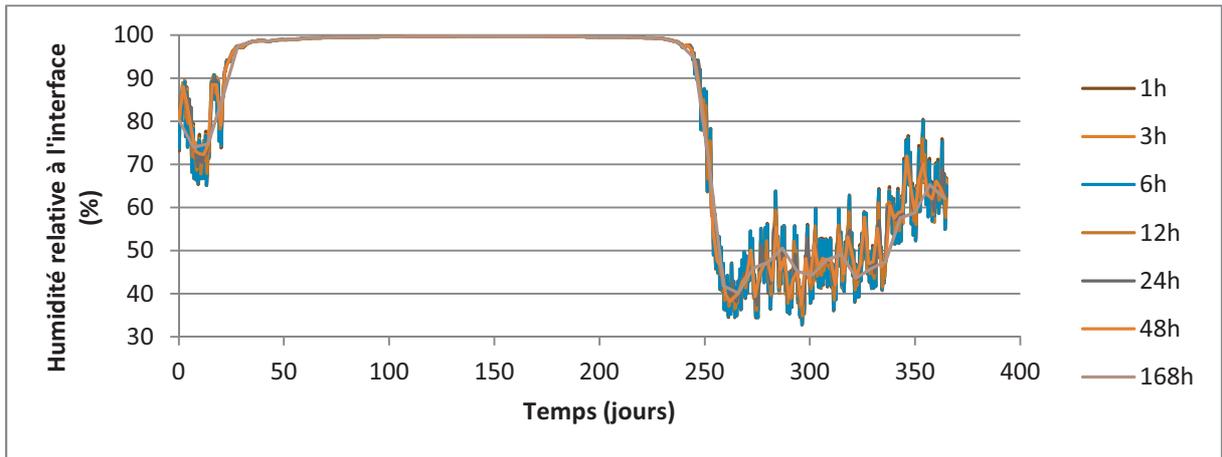
1.4.1. Influence de l'heure de début de calcul





1.4.2. Influence du pas de temps





2. Etudes de cas

2.1. Etude 1D : parois composées

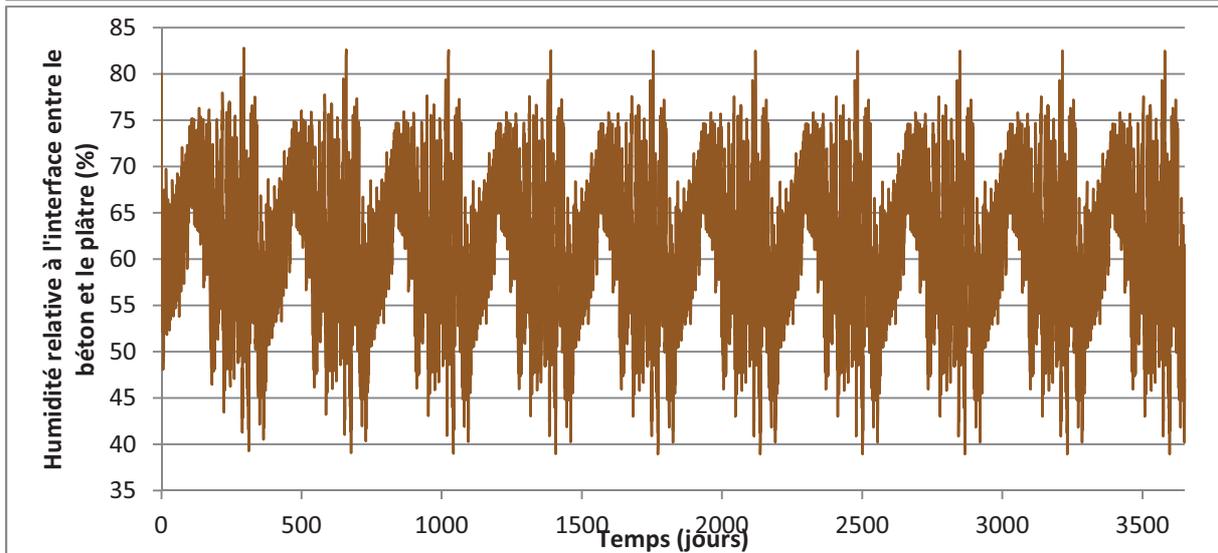
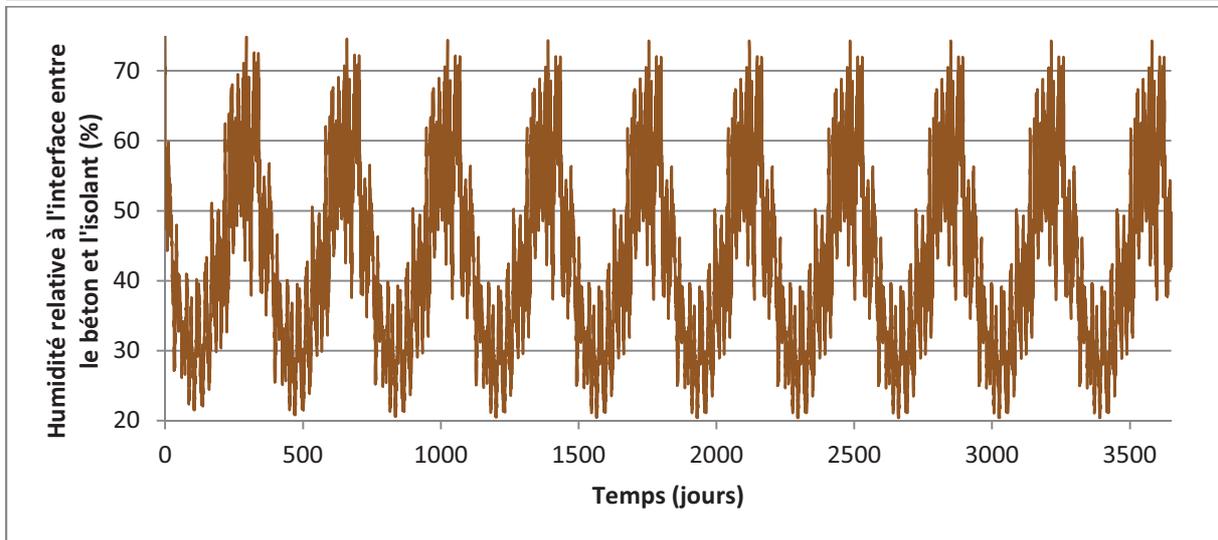
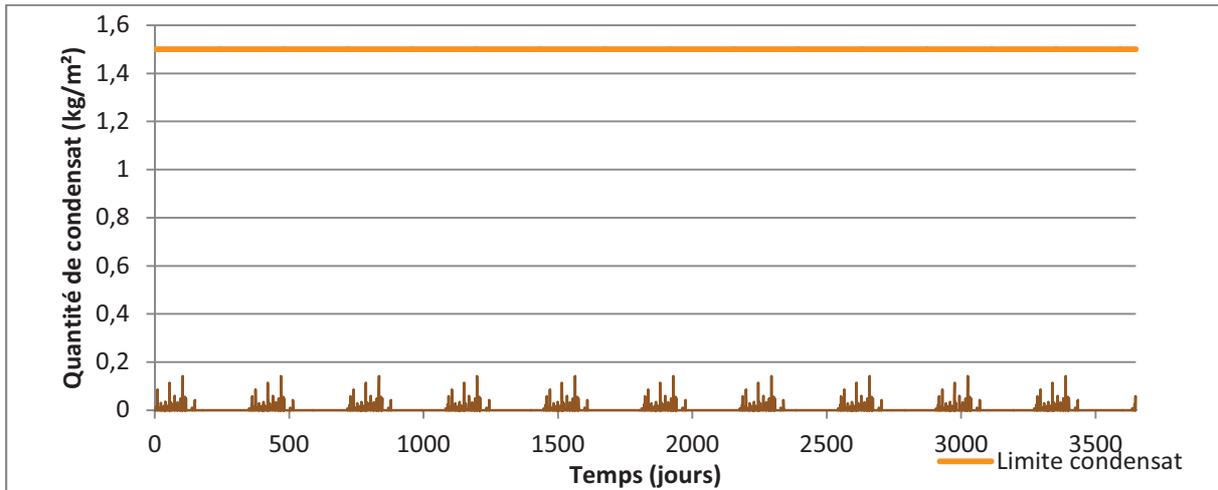
2.1.1. Méthodes statiques

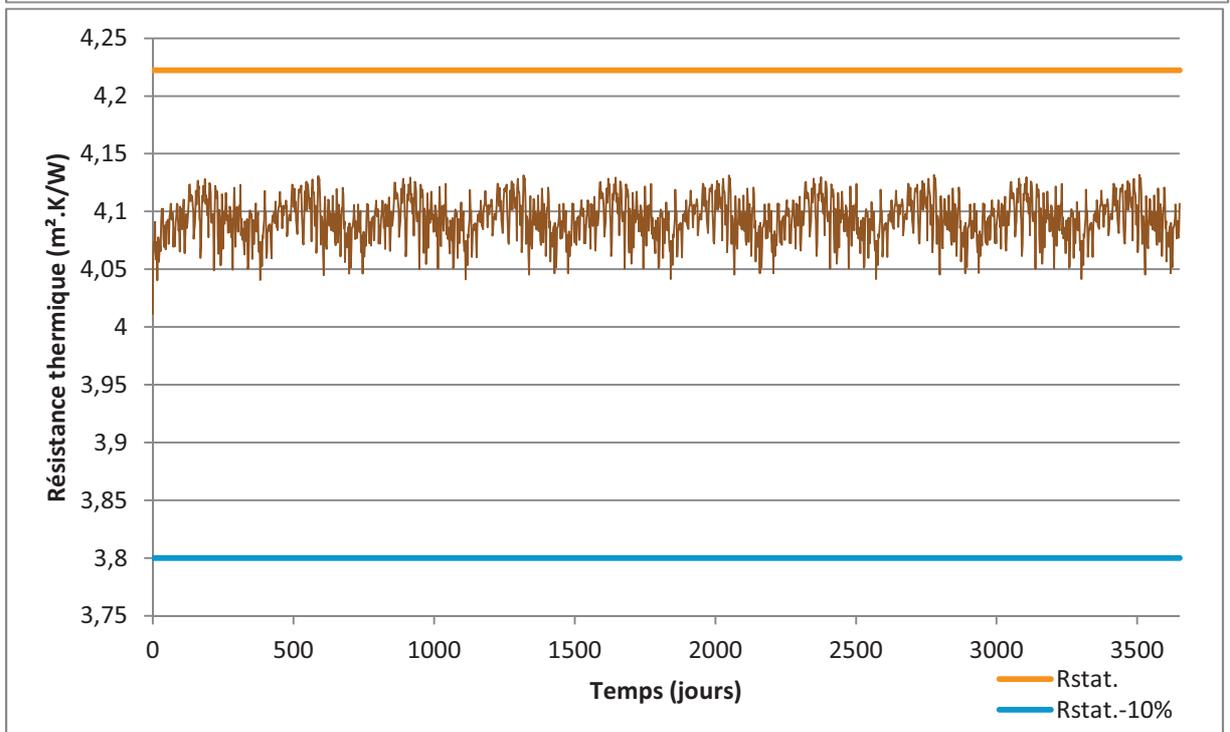
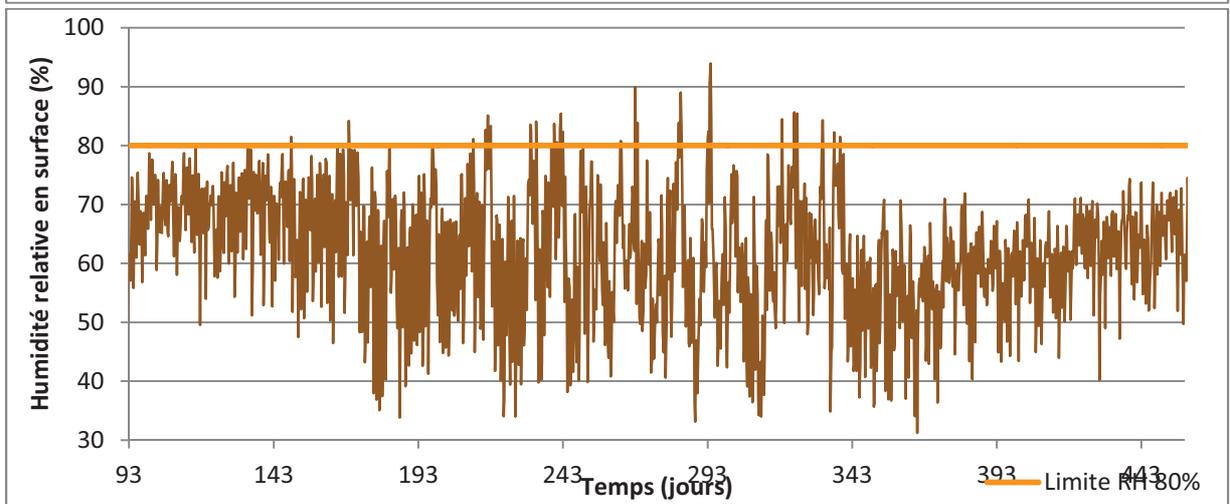
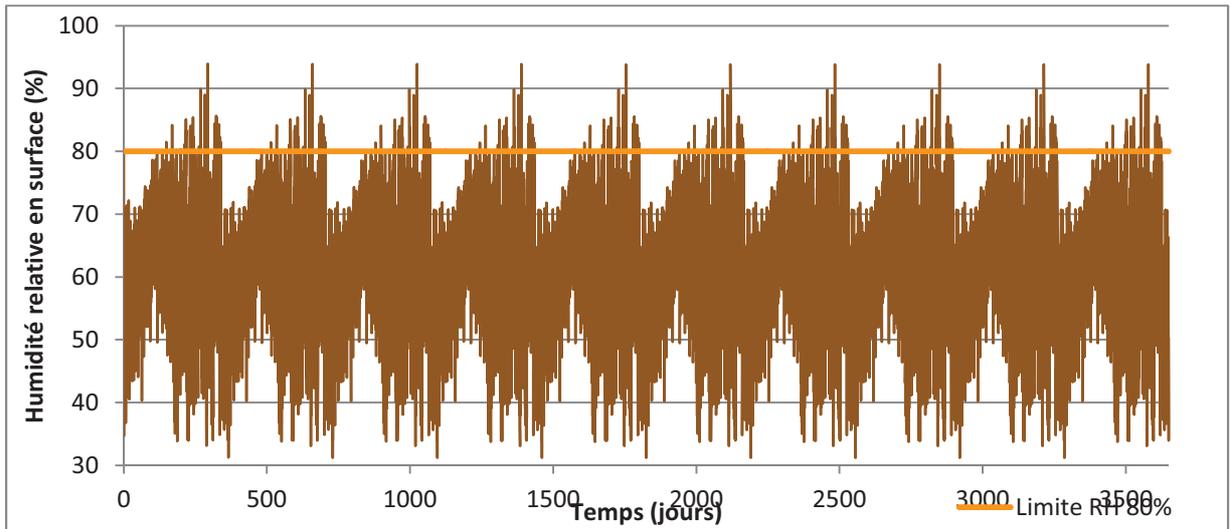
		Risque de formation de moisissures sur la paroi côté intérieur				Risque de condensation interne				
		$f_{RSi,lim}$	R_{paroi} (m ² .K/W)	$f_{RSi,paroi}$	Moissures superficielle sur la paroi	Max de condensat (kg/m ²)	Début de condensation	Mois de fin d'évaporation des condensats	Limite max de condensat (kg/m ²)	Condensation interne
1	Isolation par l'ext 15cm	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	0,00	-	-	-	Pas de risque
2	Isolation par l'int 15cm	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	9,19	Nov.	Août	1,5	Risque
3	Isolation par l'int 25cm	0,828	6,85	0,981	Pas de risque	5,98	Nov.	Août	2,5	Risque
4	Isolation par l'int 15cm + pare vapeur	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	0,00	-	-	-	Pas de risque

Isolation mixte

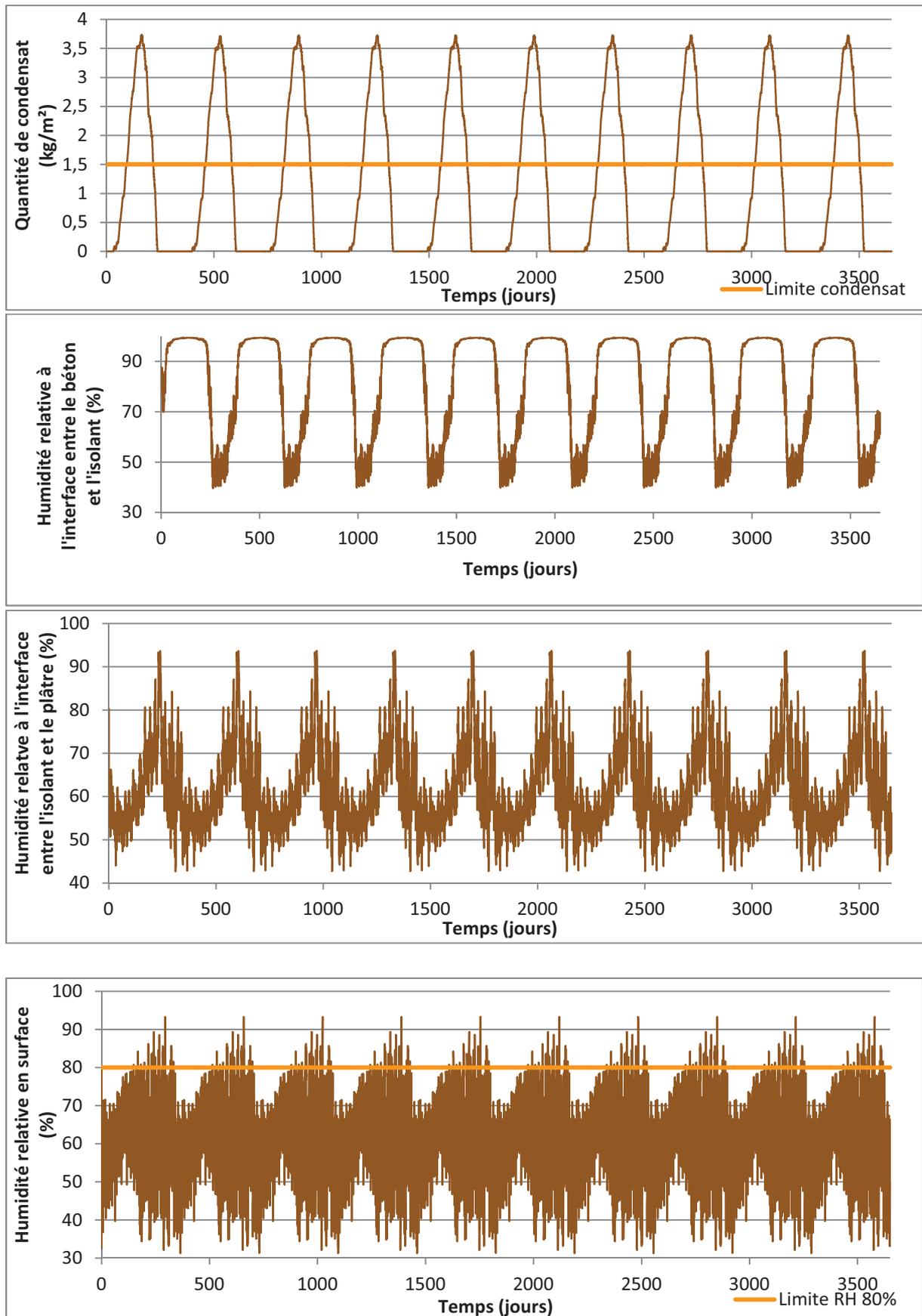
			Risque de formation de moisissures				Risque de condensation interne					
			$f_{RSi,lim}$	R_{paroi} (m ² .K/W)	$f_{RSi,paroi}$	Moissures superficielle sur la paroi	Max de condensat (kg/m ²)	Lieu	Limite de condensat (kg/m ²)	Mois de début de condensation	Mois de fin d'évaporation des condensats	Condensation interne
1	15	0	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	9,19	Isolation int	1,50	Nov.	Aout	Risque
6	10	5	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	4,00	Isolation int	1,00	Nov.	Juin	Risque
8	7,5	7,5	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	1,37	Isolation int	0,75	Déc.	Avril	Risque
11	5	10	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	0,00					
16	0	15	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	0,00					

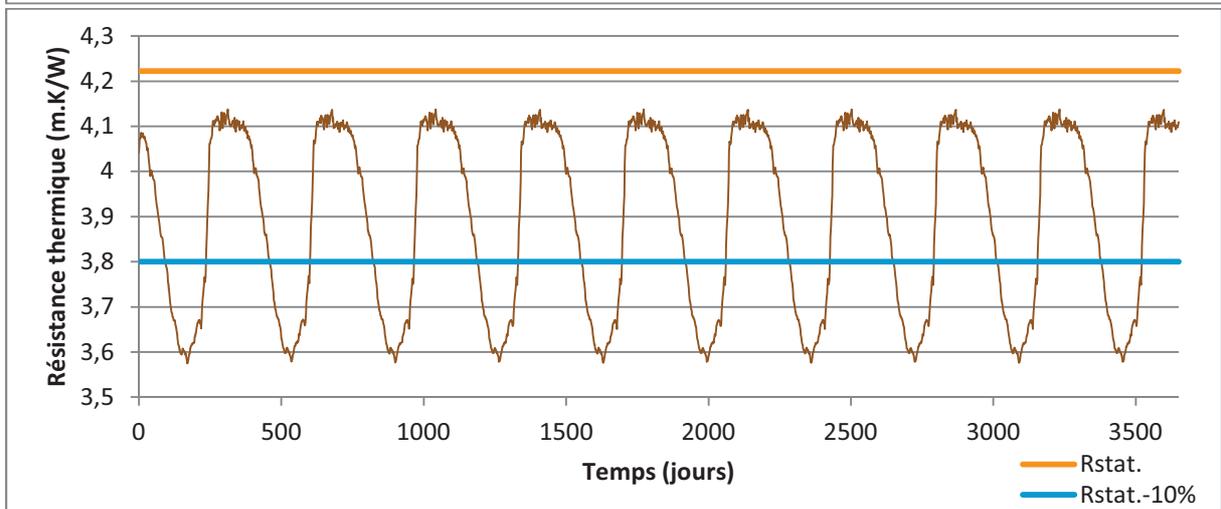
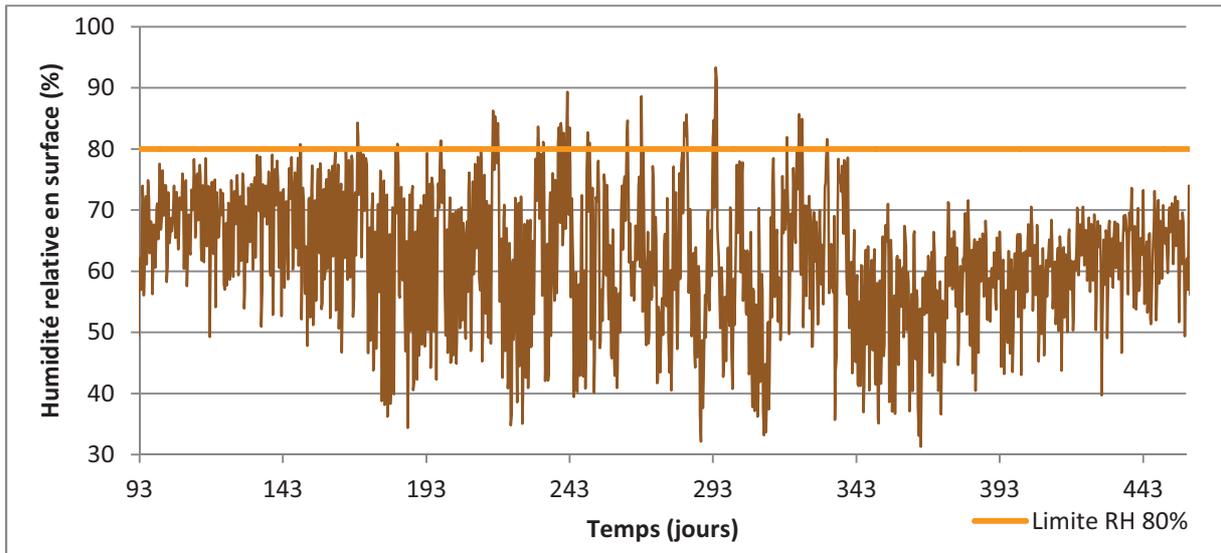
2.1.2. Cas 1 : Isolation par l'extérieur (15cm)



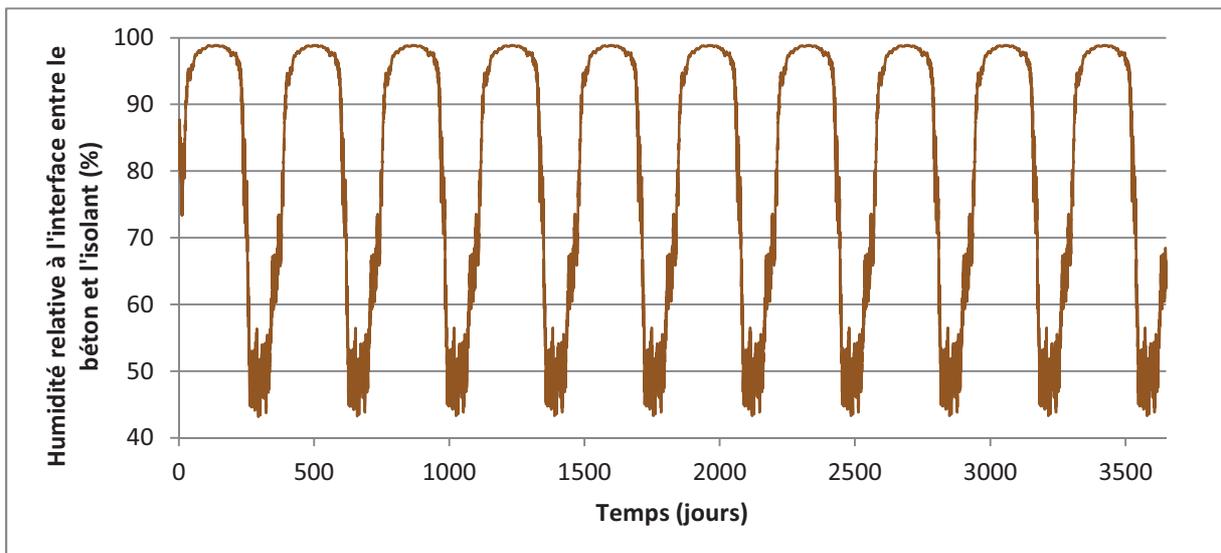


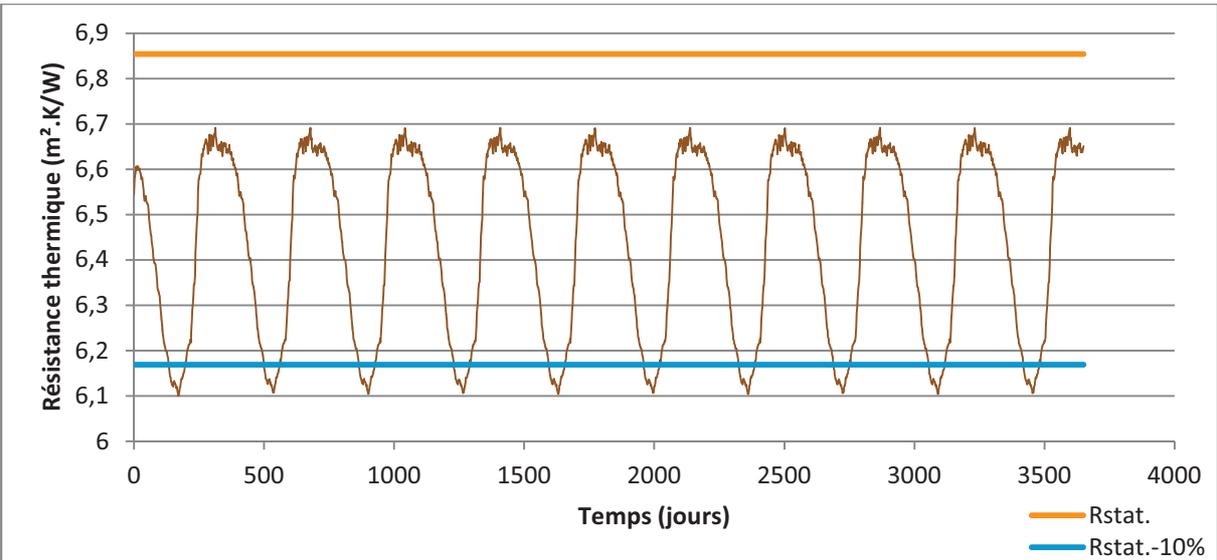
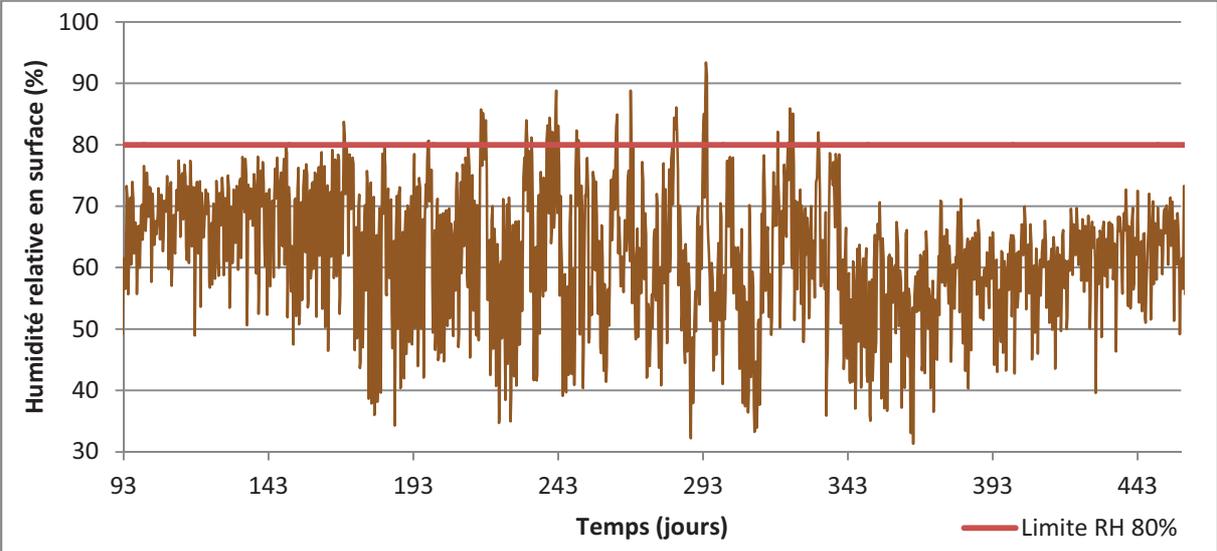
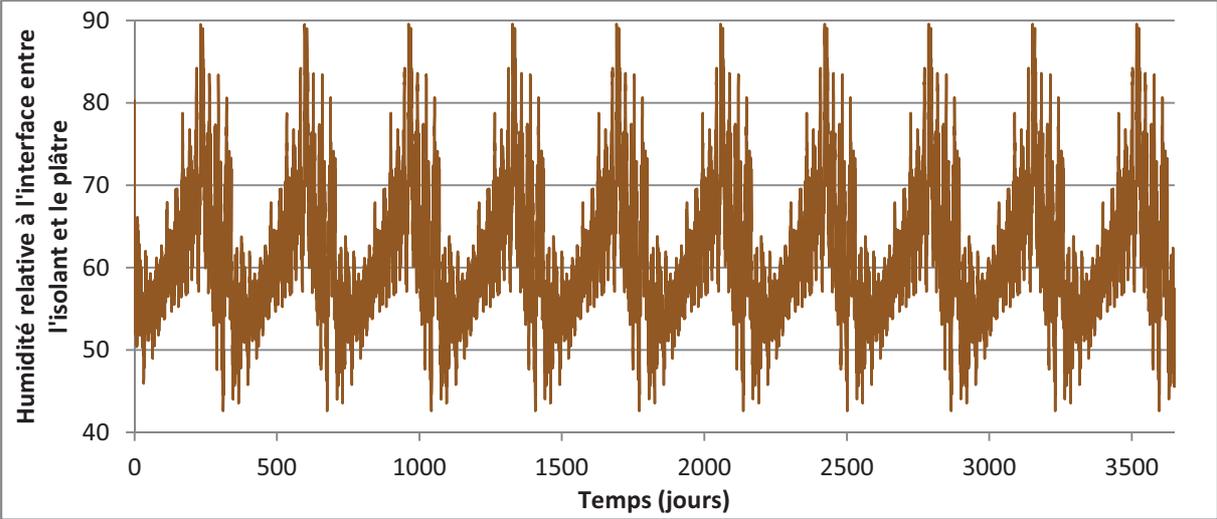
2.1.3. Cas 2 : Isolation par l'intérieur (15cm)



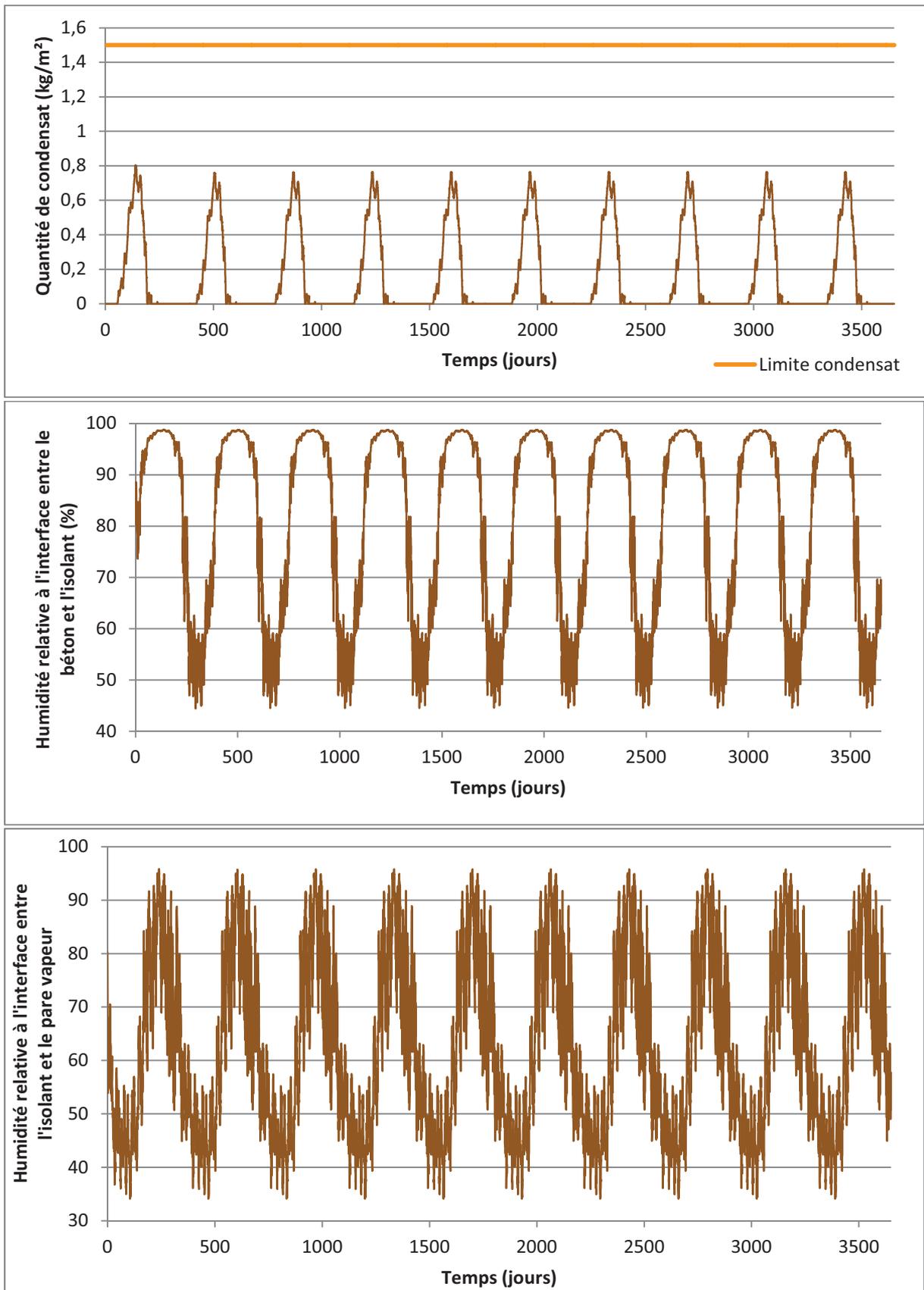


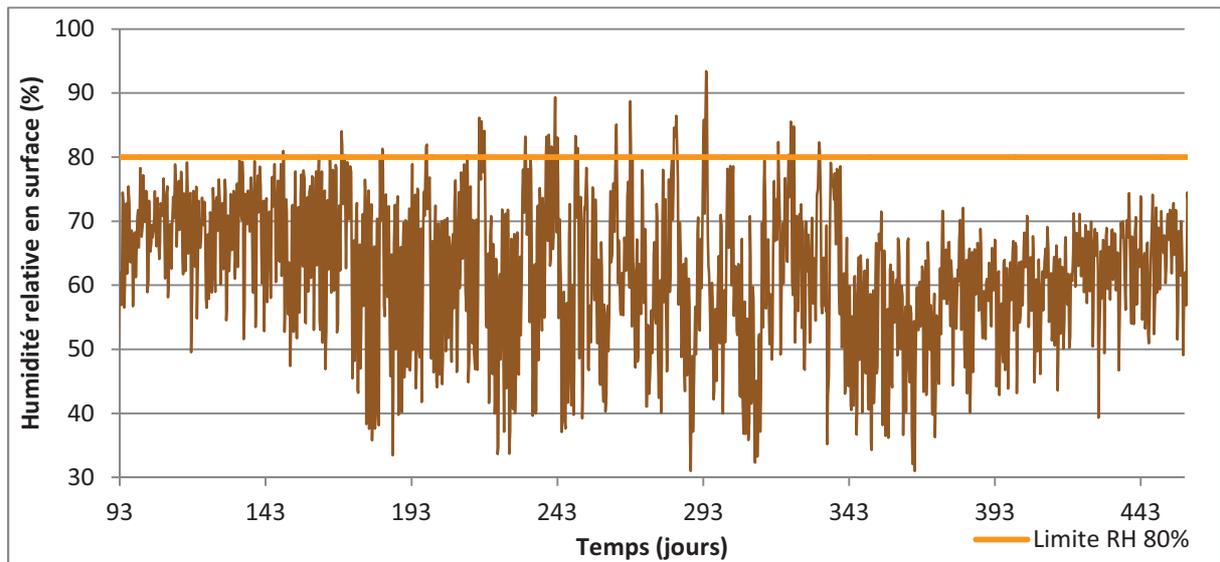
2.1.4. Cas 3 : isolation par l'intérieur (25cm)





2.1.5. Cas 4 : isolation par l'intérieur (15cm) et pare vapeur





2.1.6. Isolation mixte

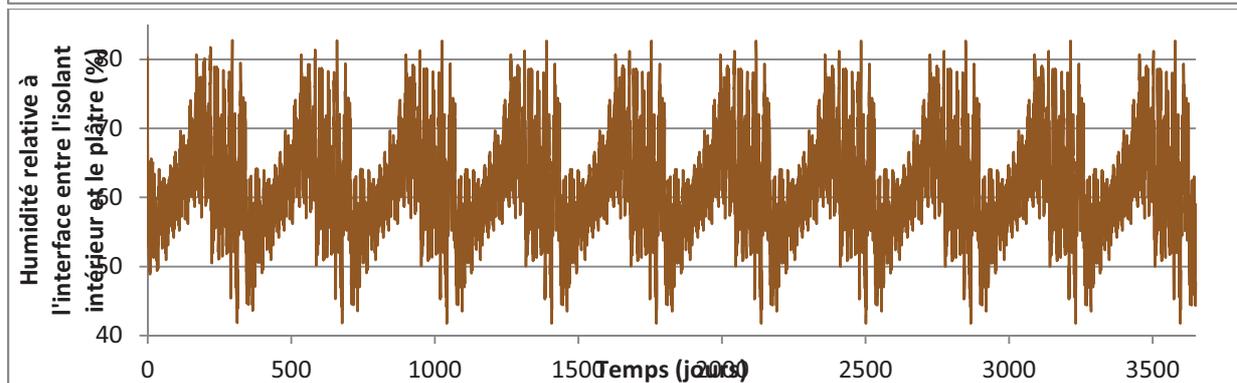
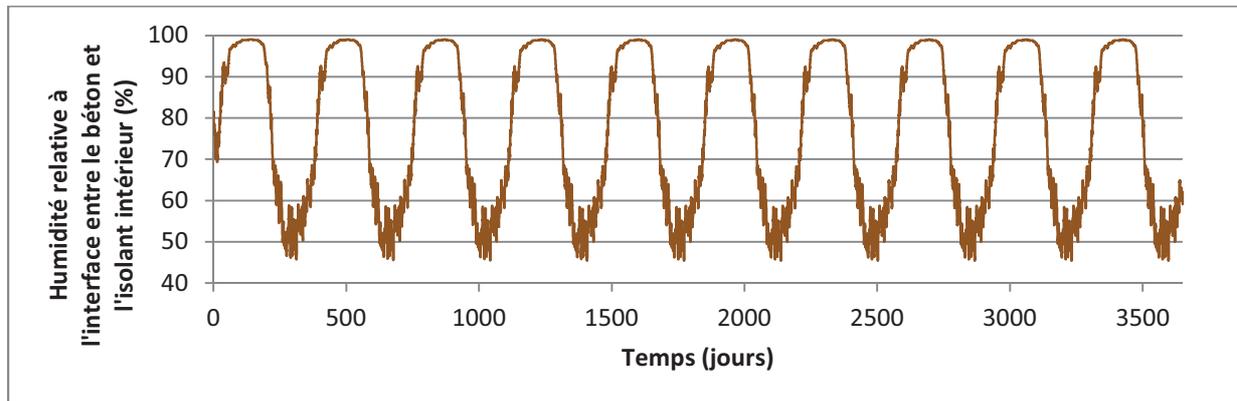
a. Méthode de Glaser à Uccle

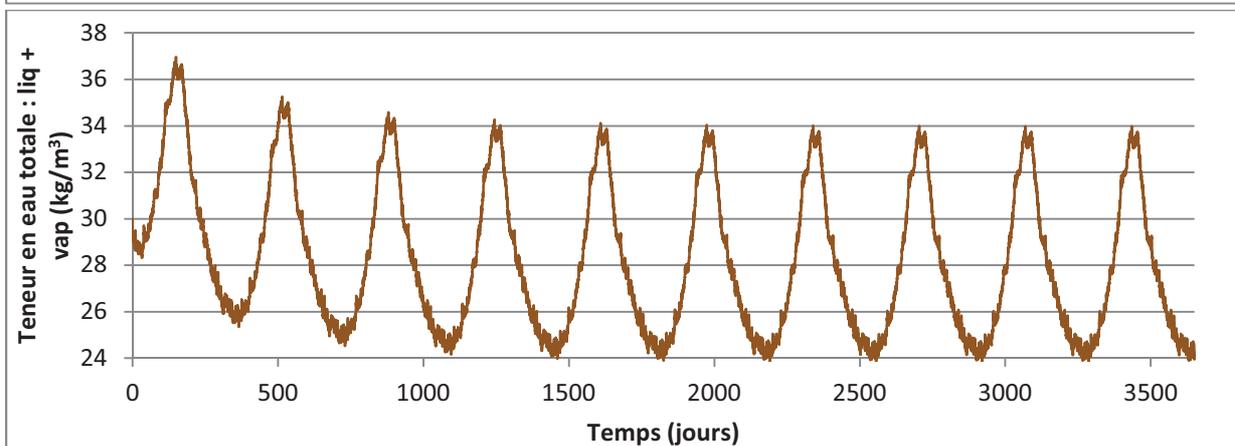
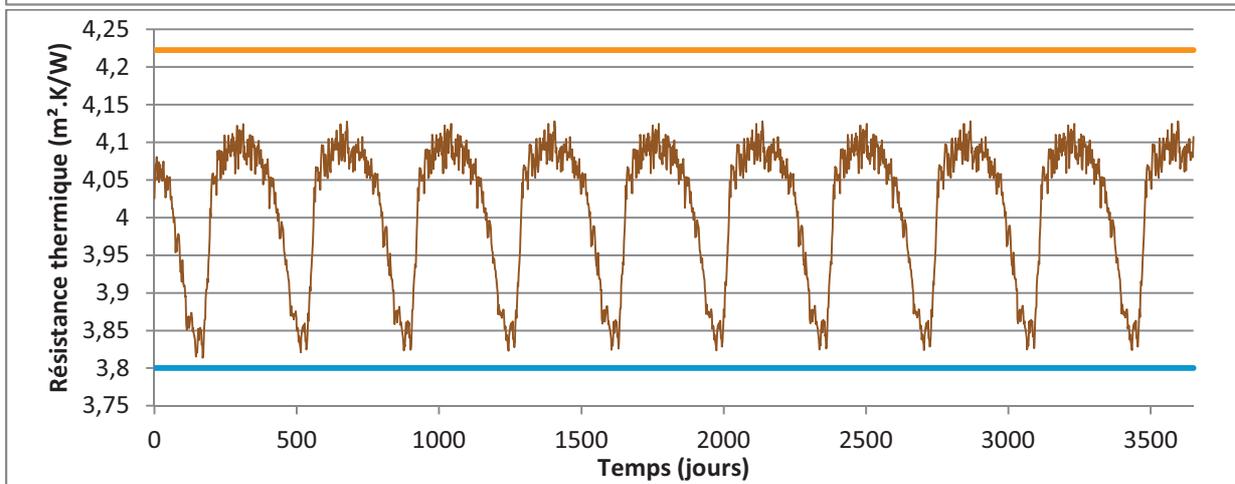
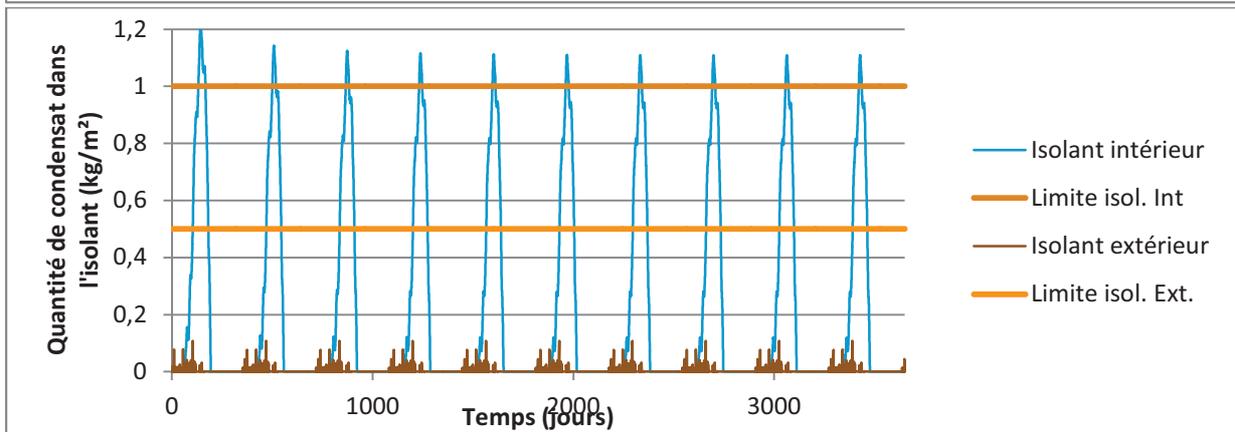
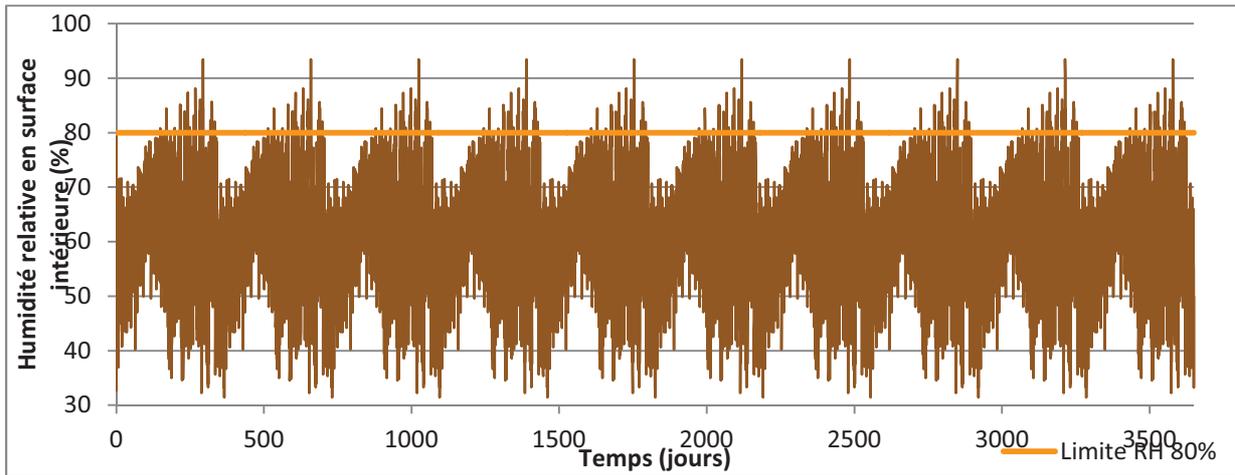
Epaisseur d'isolation (cm)		Risque ?	Condensat		
Côté intérieur	Côté extérieur		Maximum accumulé (kg/m ²)	Début de condensation	Fin d'évaporation
15	0	Oui	12,7	Octobre	-
14	1	Oui	11,2	Octobre	-
13	2	Oui	9,8	Octobre	-
12	3	Oui	8,3	Octobre	-
11	4	Oui	7,0	Novembre	Septembre
10	5	Oui	5,7	Novembre	Août
9	6	Oui	4,3	Novembre	Juillet
8	7	Oui	2,9	Novembre	Juin
7,5	7,5	Oui	2,1	Décembre	Mai
7	8	Oui	1,6	Décembre	Mai
6	9	Oui	0,52	Décembre	Avril
5	10	Non	-	-	-
4	11	Non	-	-	-
3	12	Non	-	-	-
2	13	Non	-	-	-
1	14	Non	-	-	-
0	15	Non	-	-	-

b. Méthode de Glaser à Uccle et température intérieure en moyenne inférieure de 1°C

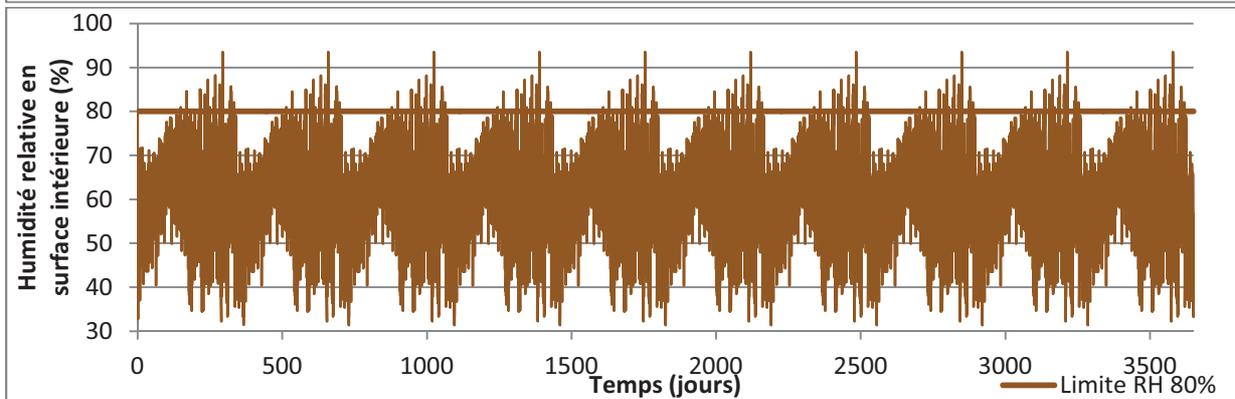
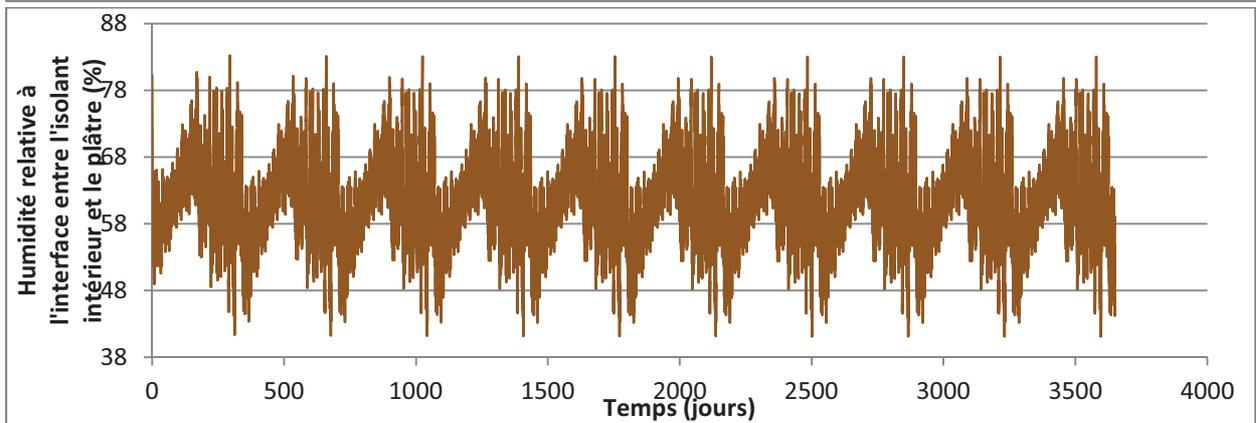
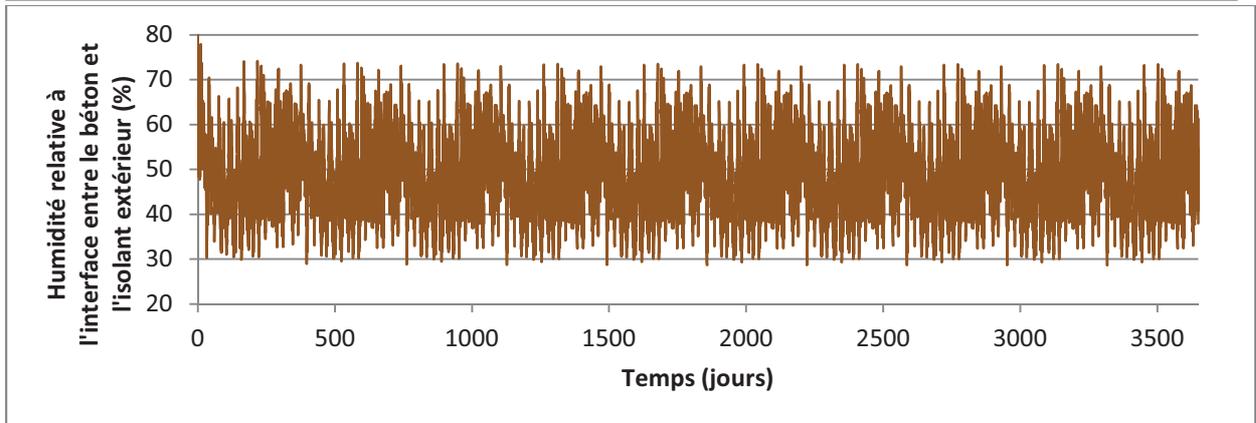
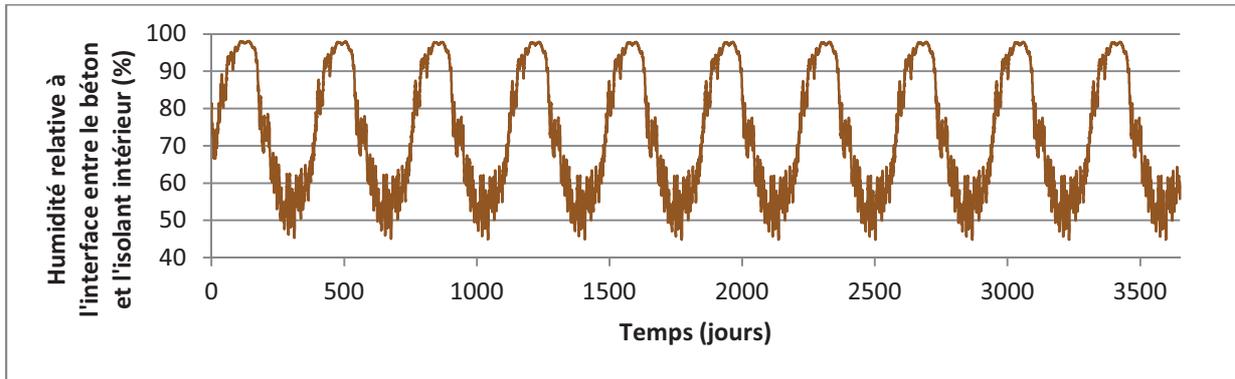
Epaisseur d'isolation (cm)		Risque ?	Condensat		
Côté intérieur	Côté extérieur		Maximum accumulé (kg/m ²)	Début de condensation	Fin d'évaporation
15	0	Oui	13,2	Octobre	-
14	1	Oui	12	Octobre	-
13	2	Oui	10,5	Octobre	-
12	3	Oui	9,1	Octobre	-
11	4	Oui	7,7	Octobre	-
10	5	Oui	6,5	Novembre	Août
9	6	Oui	5,1	Novembre	Juillet
8	7	Oui	3,7	Novembre	Juillet
7,5	7,5	Oui	3,0	Novembre	Juin
7	8	Oui	2,3	Décembre	Juin
6	9	Oui	1,2	Décembre	Mai
5	10	Non	0,17	Janvier	Mars
4	11	Non	-	-	-
3	12	Non	-	-	-
2	13	Non	-	-	-
1	14	Non	-	-	-
0	15	Non	-	-	-

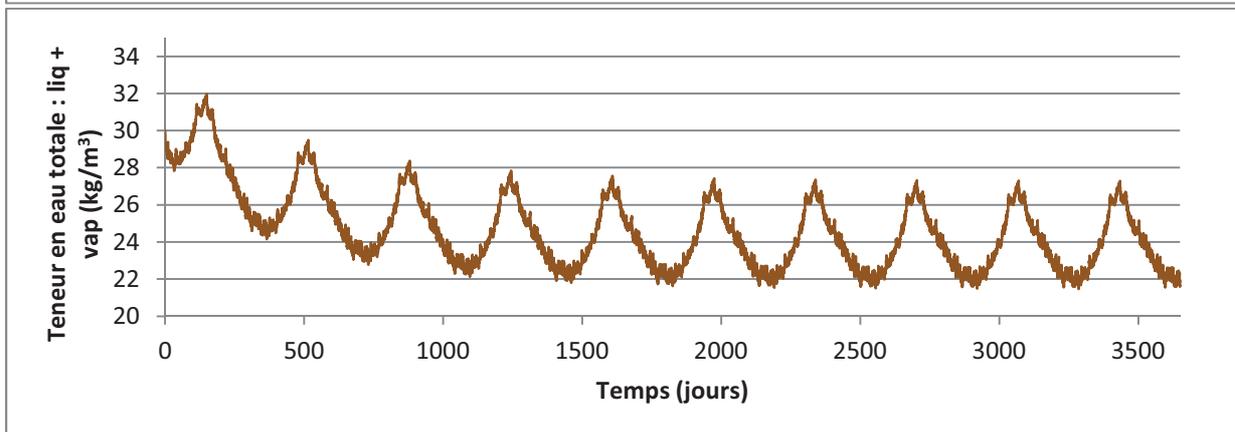
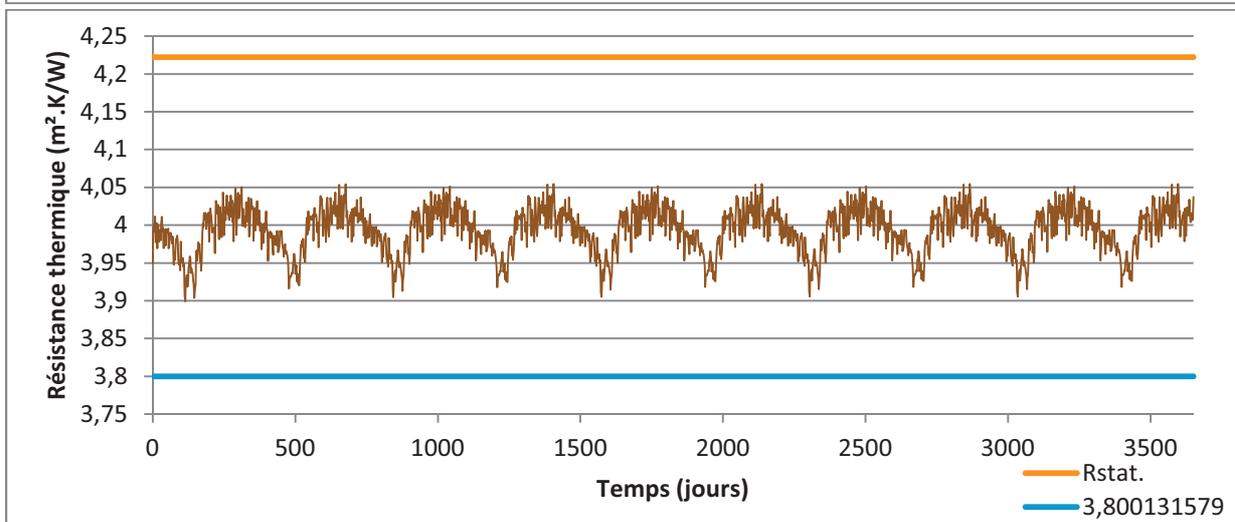
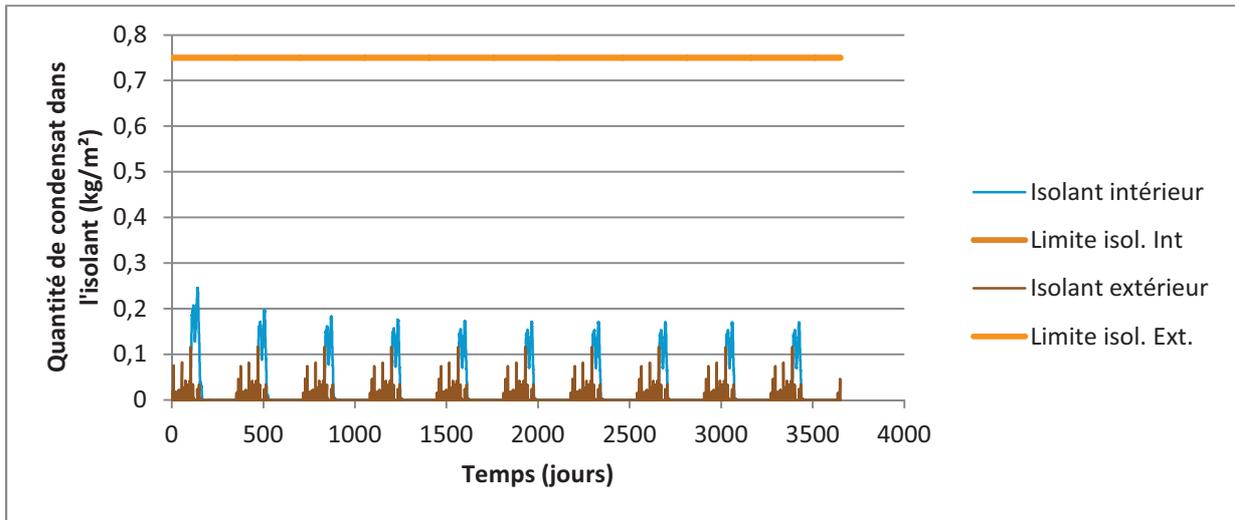
c. Cas 5: Isolation mixte - 10cm intérieur / 5cm extérieur



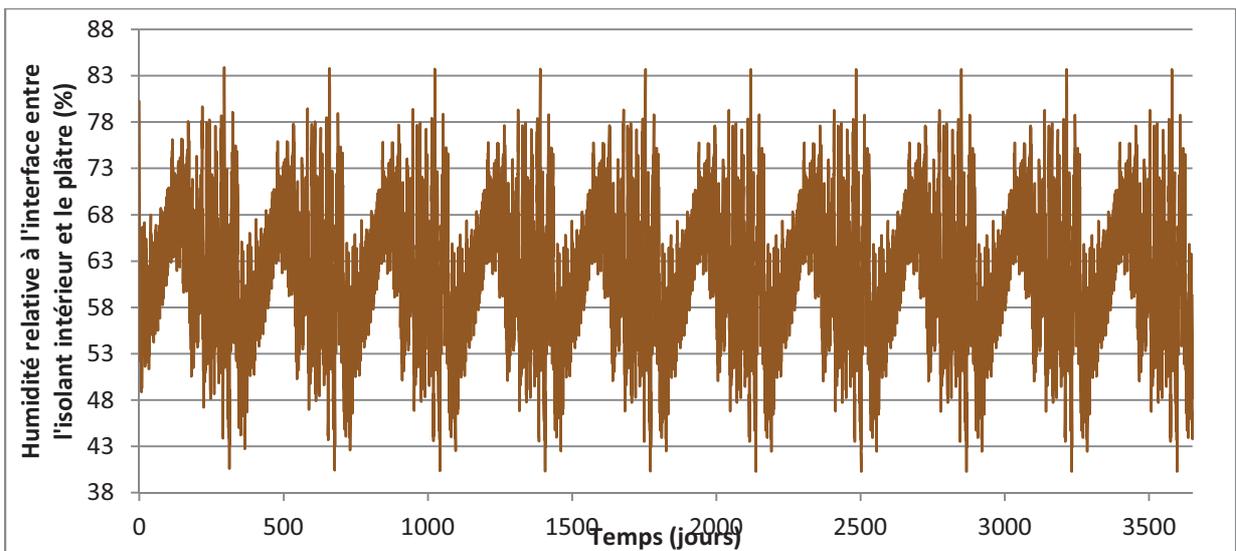
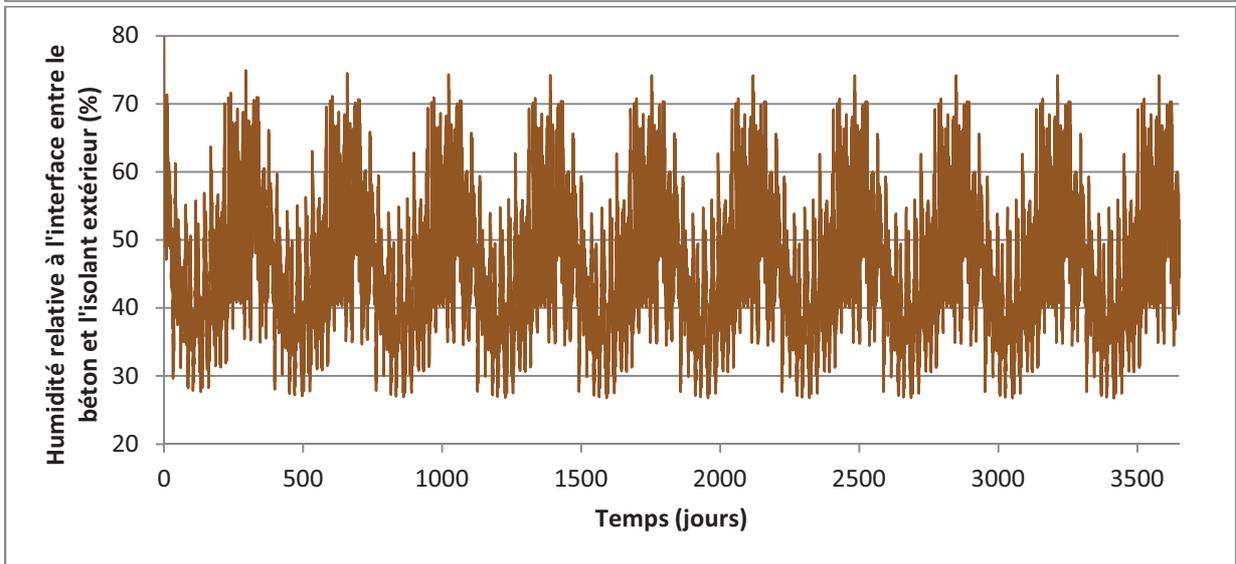
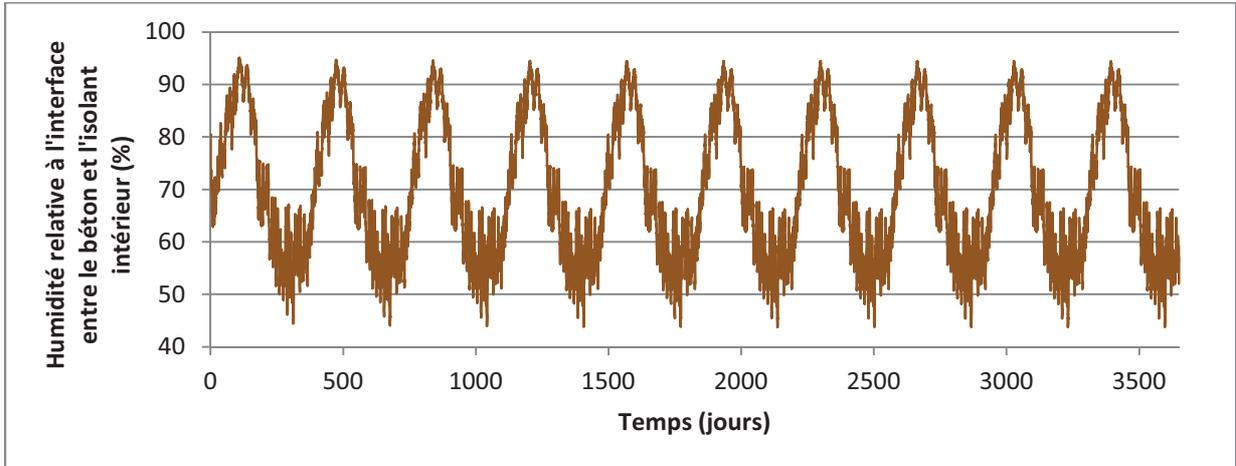


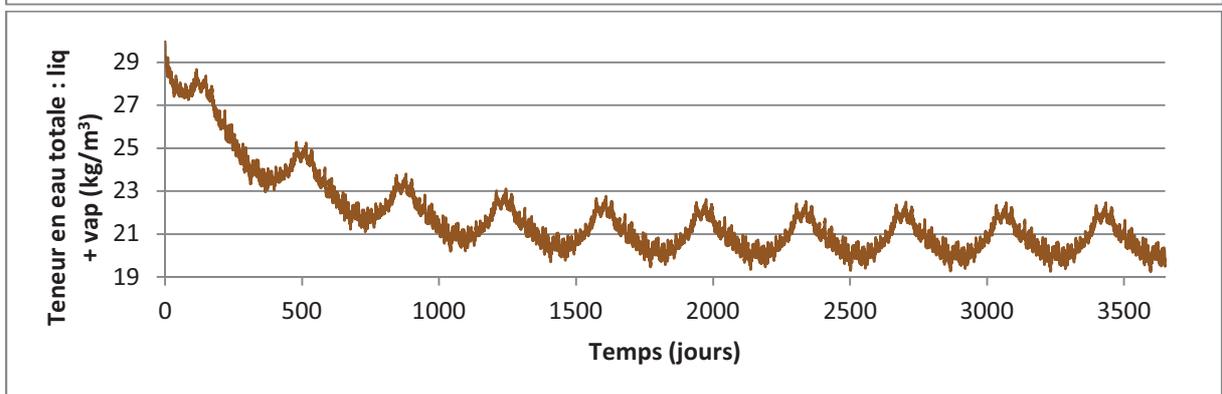
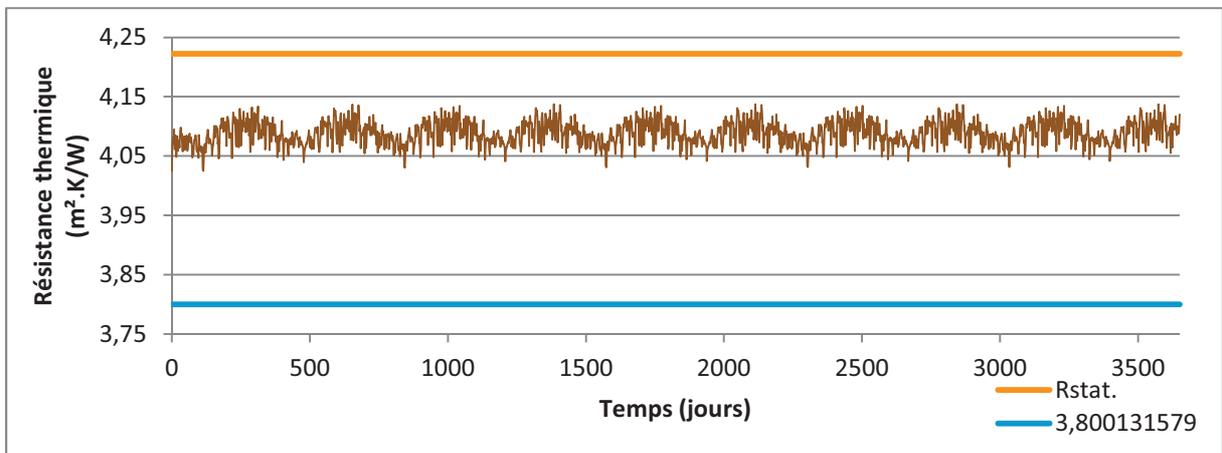
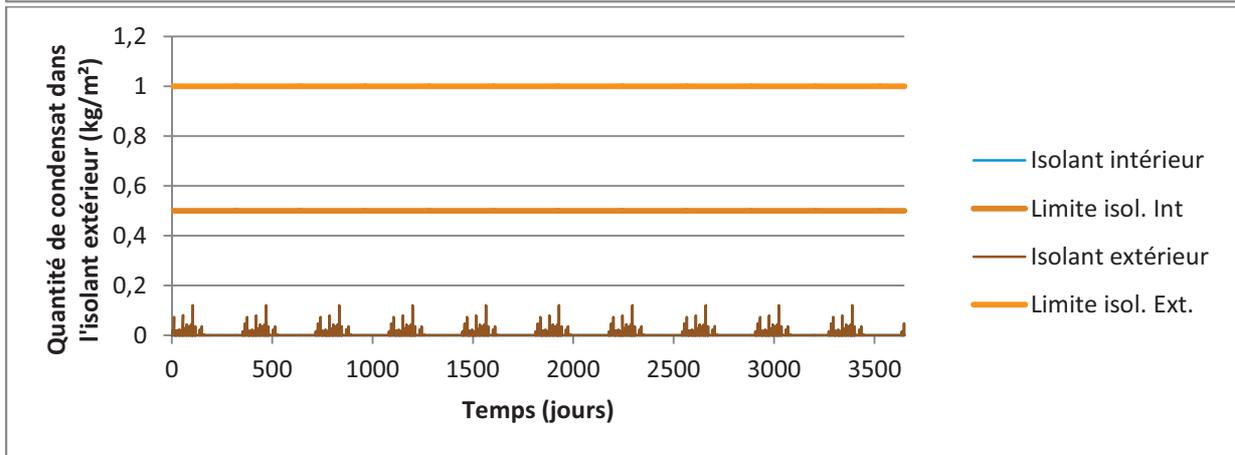
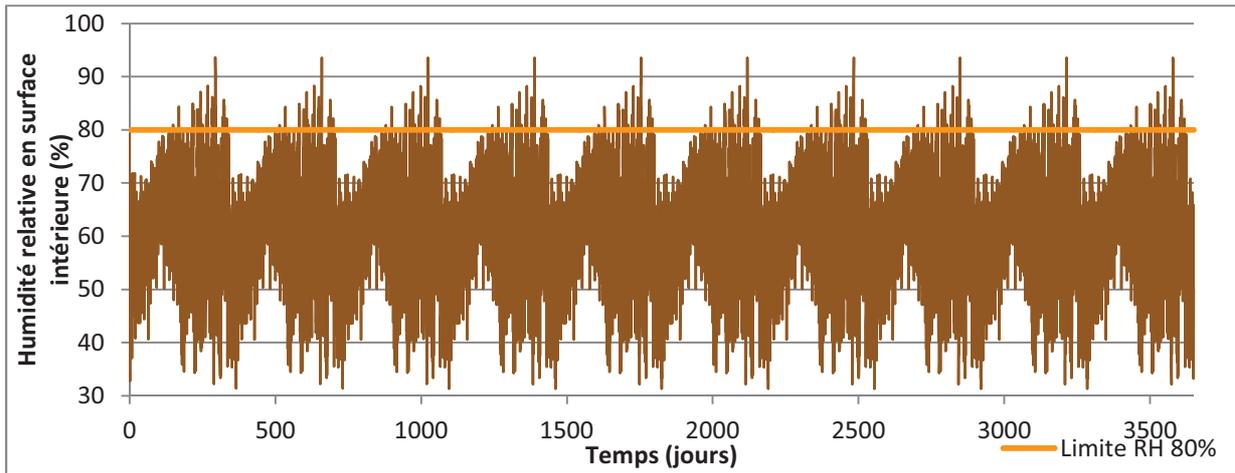
d. Cas 6 : Isolation mixte - 7,5cm intérieur / 7,5cm extérieur





e. Cas 7 : Isolation mixte - 5cm intérieur / 10cm extérieur





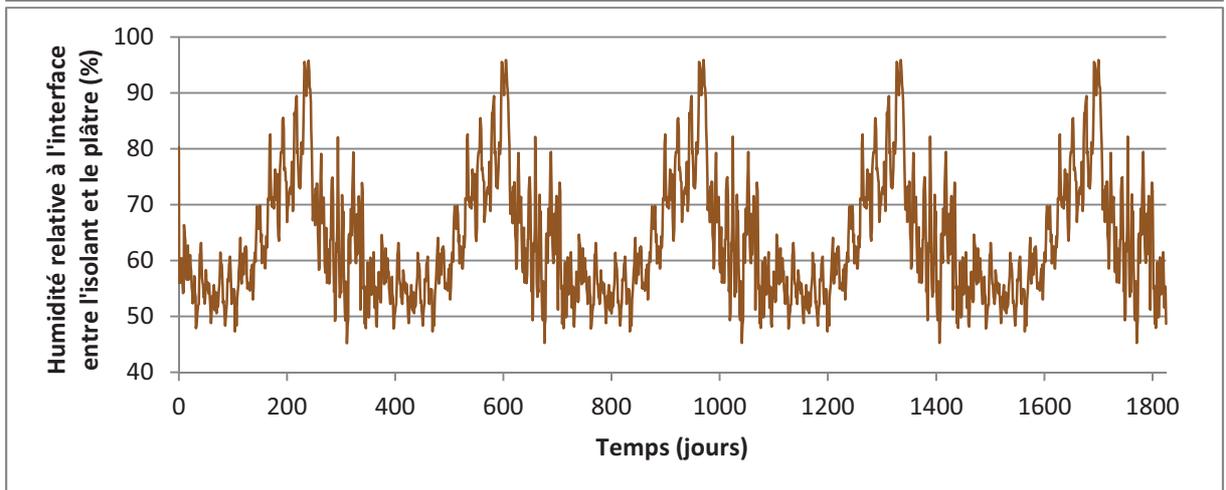
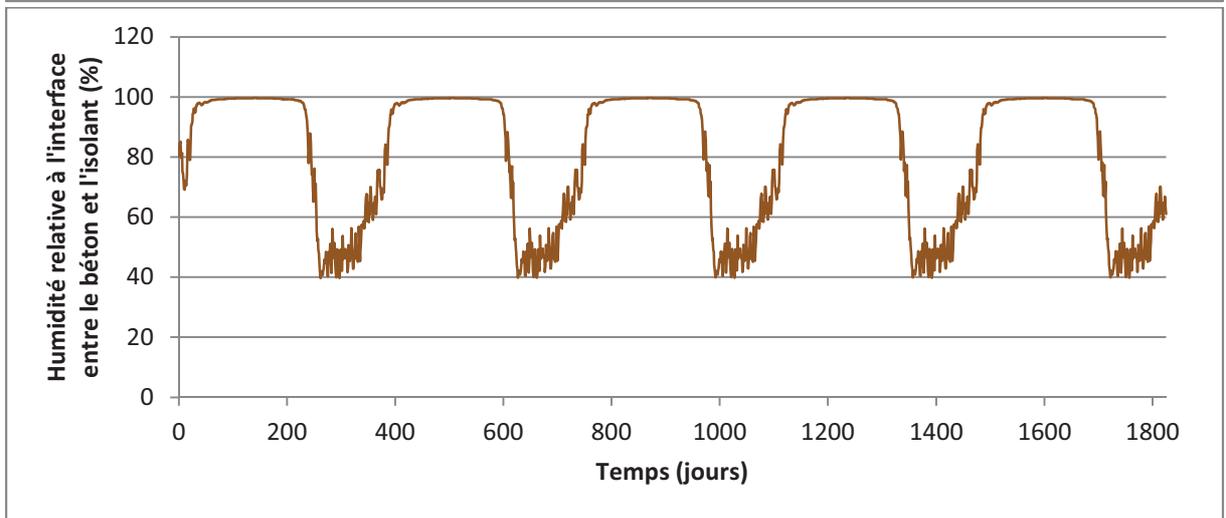
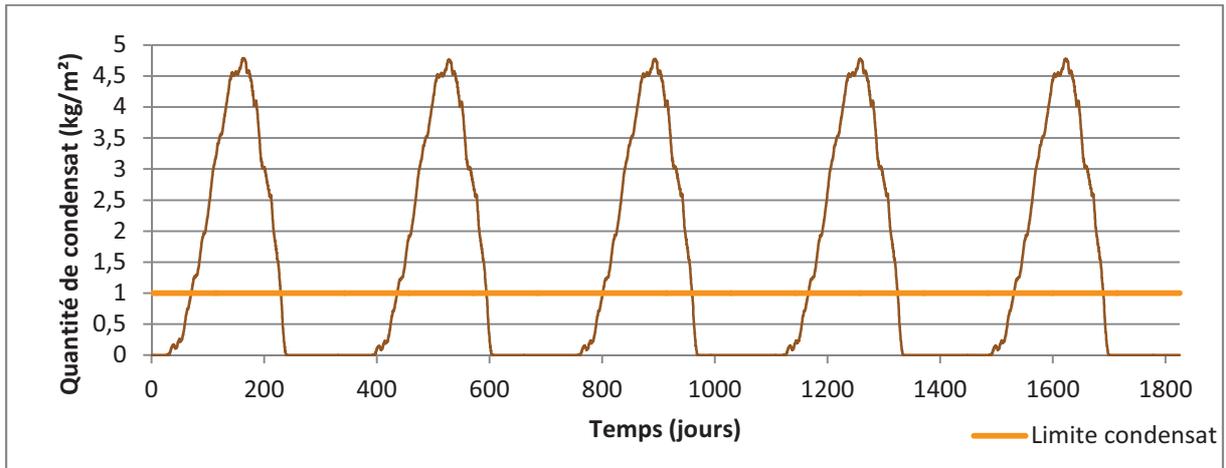
2.2. Etude 2D : Ponts thermiques

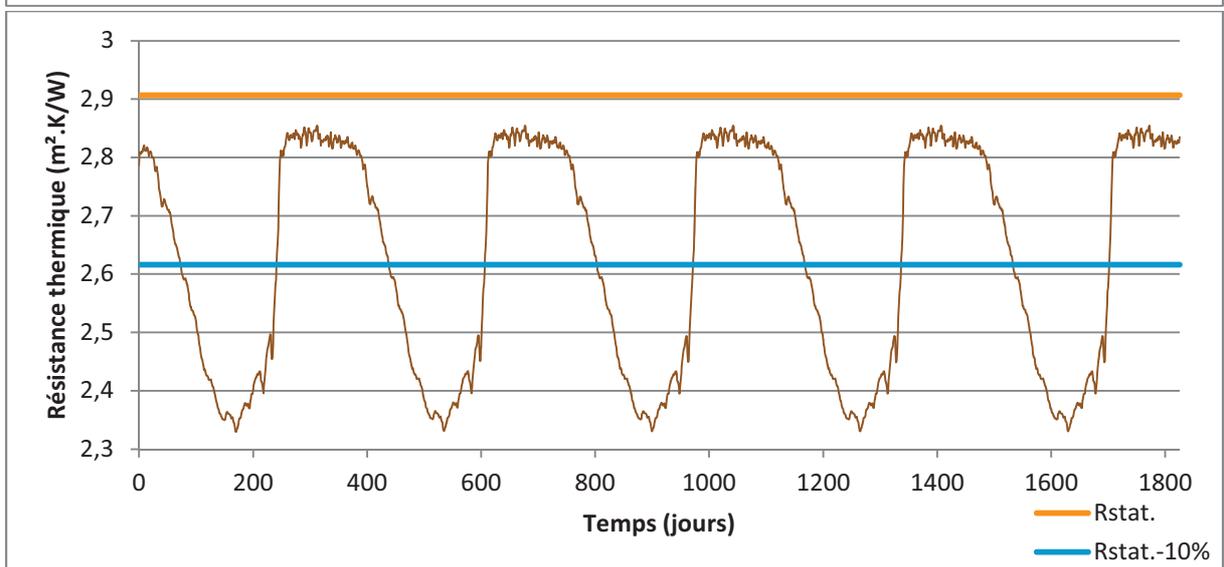
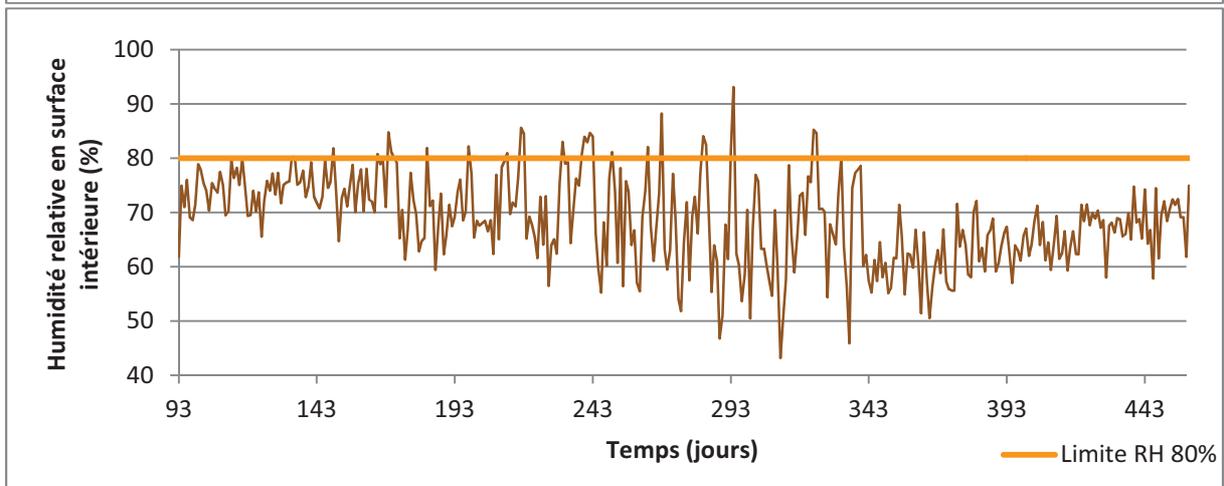
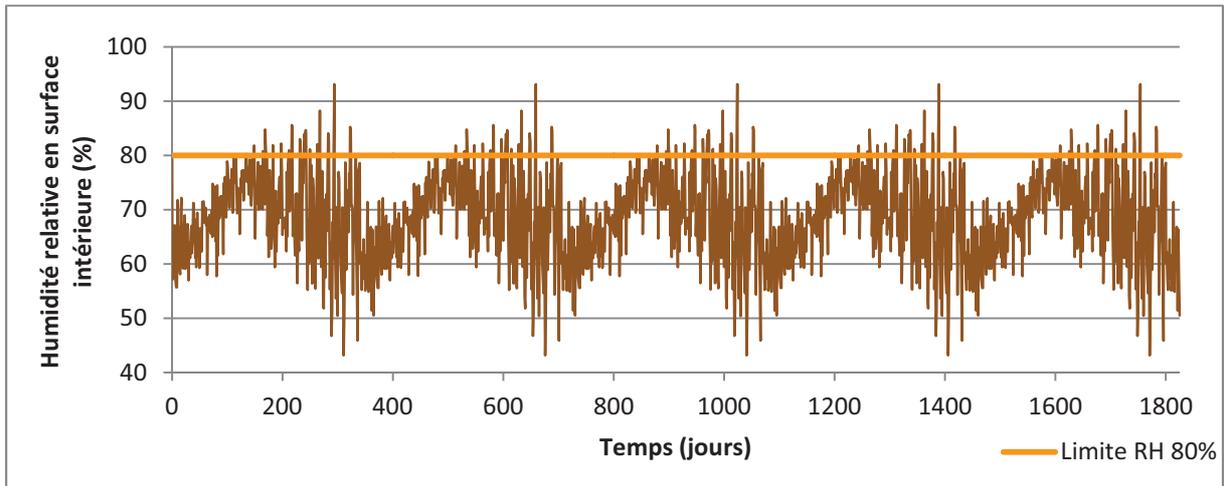
2.2.1. Plancher intermédiaire en isolation par l'intérieur

a. Méthodes statiques

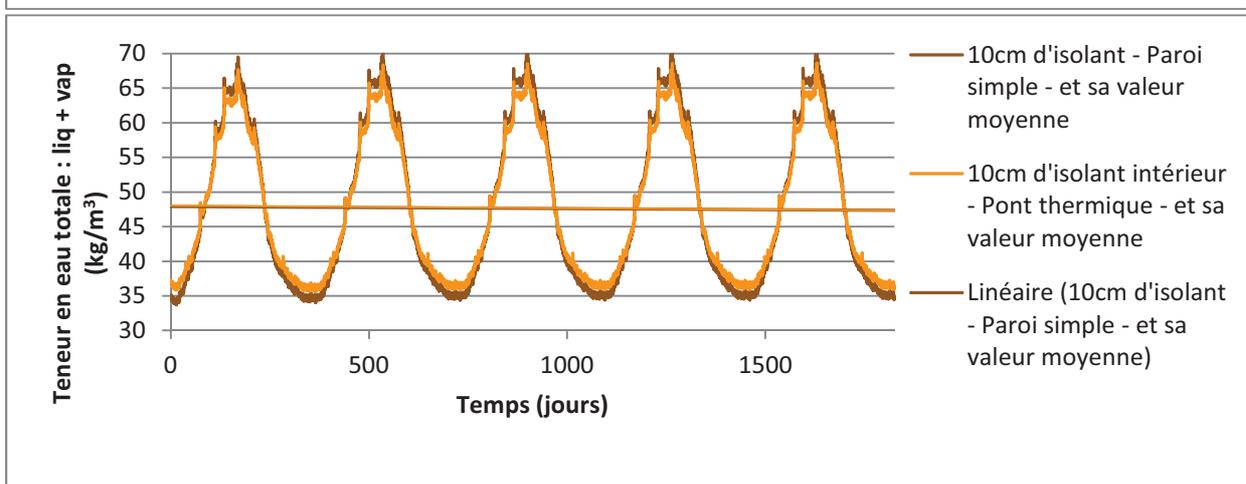
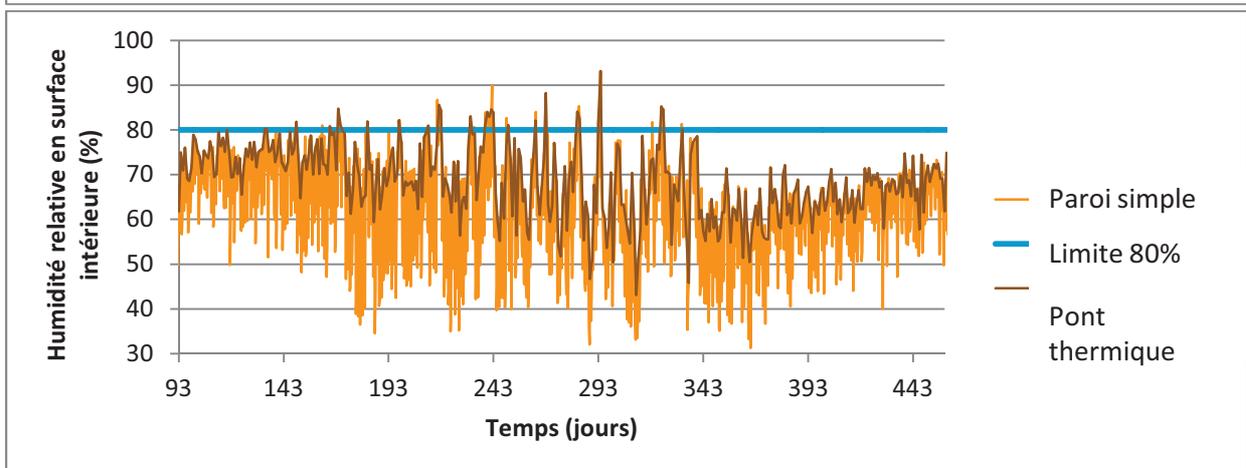
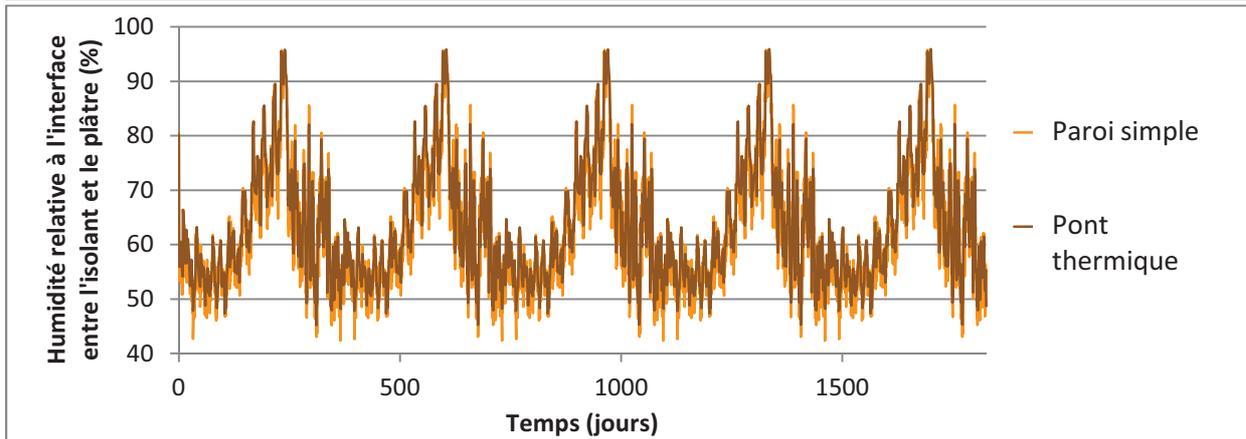
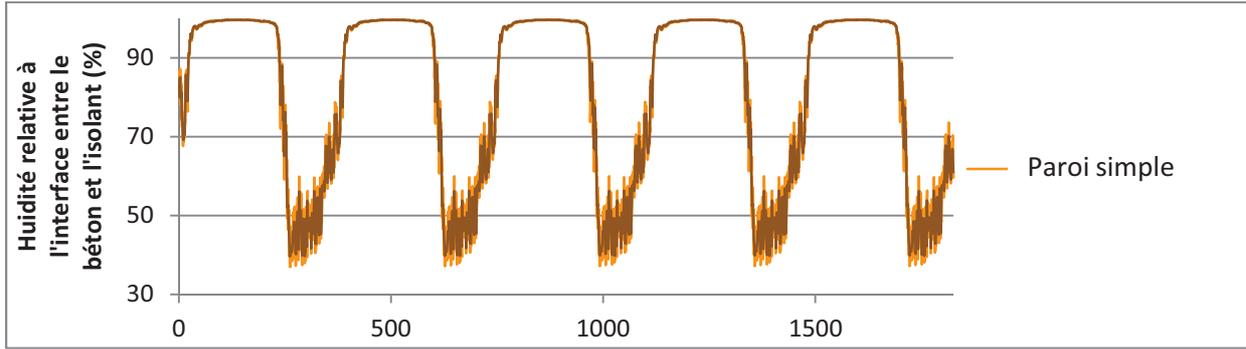
	$f_{Rsi,lim}$	Risque de formation de moisissures sur la paroi côté intérieur			Risque de formation de moisissures sur le pont thermique		Risque de condensation interne					
		R_{paroi} (m ² .K/W)	$f_{Rsi,paroi}$	Moississures superficielles sur la paroi	$T_{si,p-th}$	$f_{Rsi,p-th}$	Moississures superficielles sur le pont thermique	Max de condensat (kg/m ²)	Début de condensation	Mois de fin d'évaporation des condensats	Limite max de condensat vis-à-vis de l'isolant (kg/m ²)	Condensation interne
5 Isolation par l'int 5cm	0,828	1,59	0,918	Pas de risque	12,8	0,539	Risque	11,76	Nov.	Août	0,5	Risque
6 Isolation par l'int 10cm	0,828	2,91	0,955	Pas de risque	13,7	0,593	Risque	10,74	Nov.	Août	1	Risque
7 Isolation par l'int 15cm	0,828	4,22	0,969	Pas de risque	14,4	0,635	Risque	9,19	Nov.	Août	1,5	Risque
8 Isolation par l'int 10cm FB	0,828	2,91	0,955	Pas de risque	13,7	0,593	Risque	0,00	Nov.	Nov.	1	Risque
9 Isolation par l'int 10cm PU	0,828	2,91	0,955	Pas de risque	13,7	0,593	Risque	0,00	Nov.	Juin	1	Pas de risque

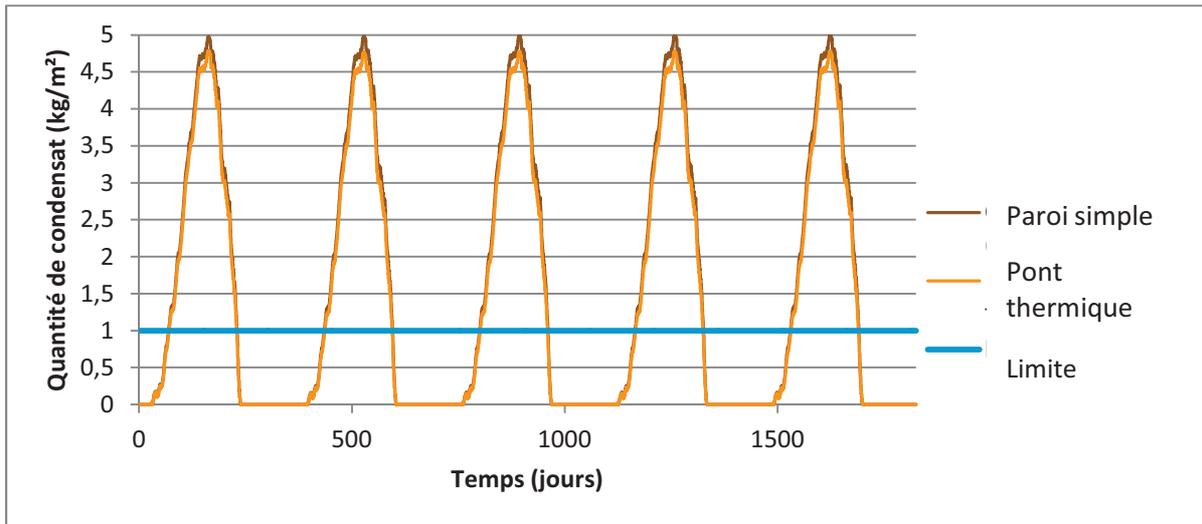
b. Cas initial



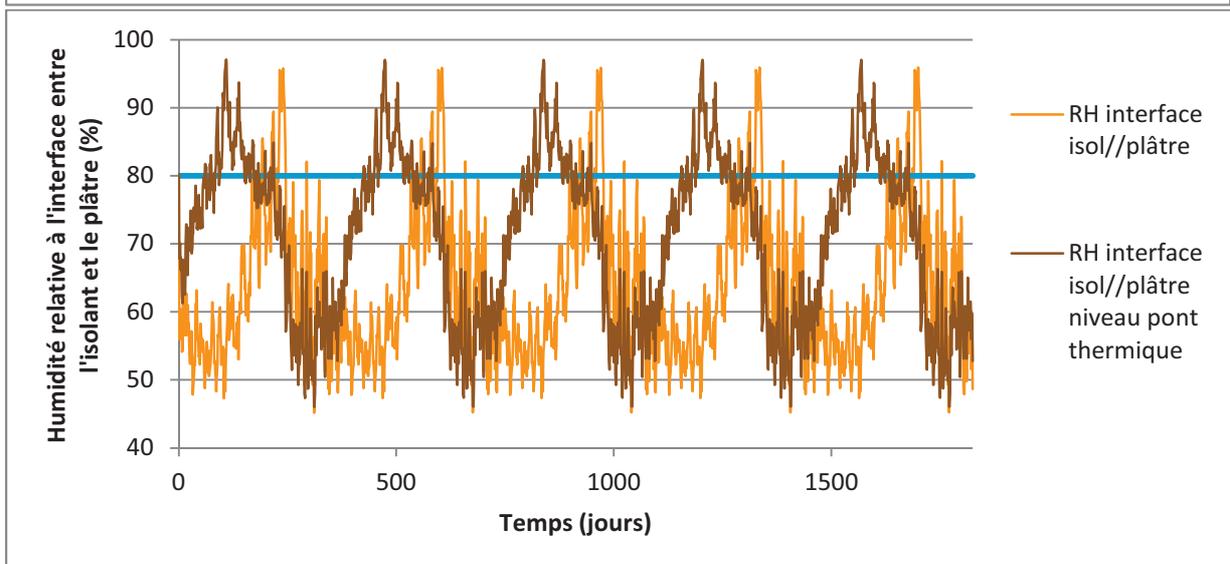
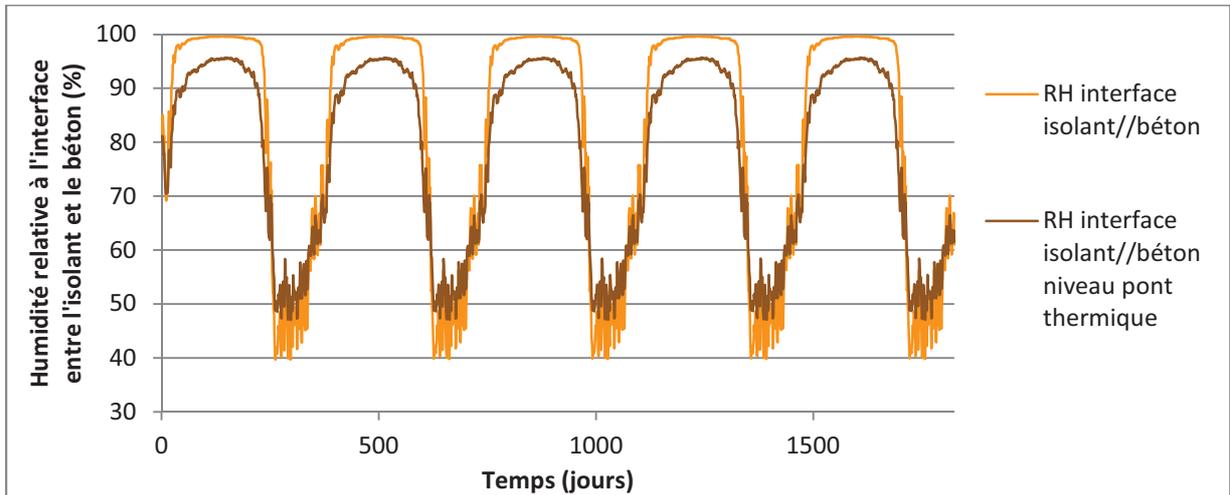


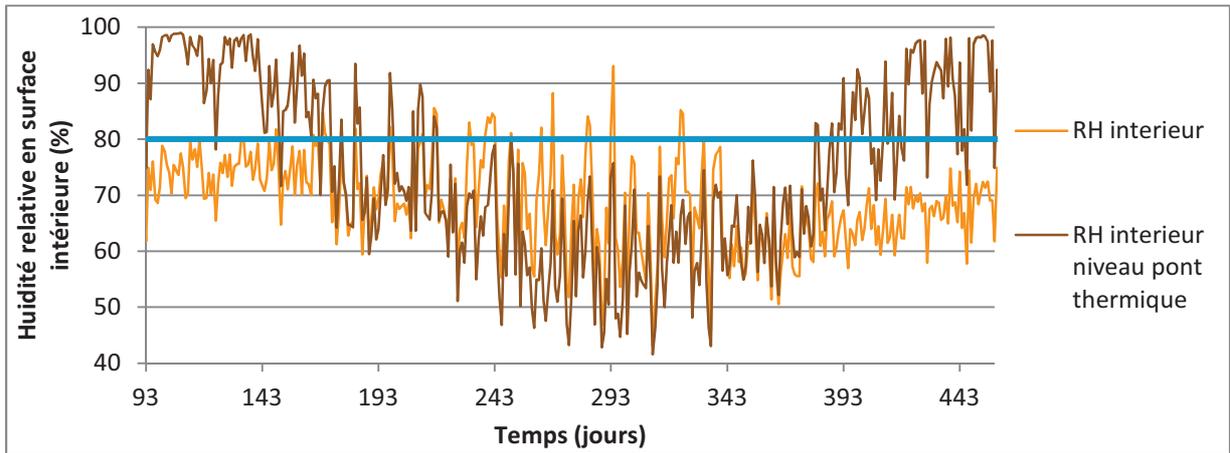
c. Effet du pont thermique sur les propriétés de la paroi





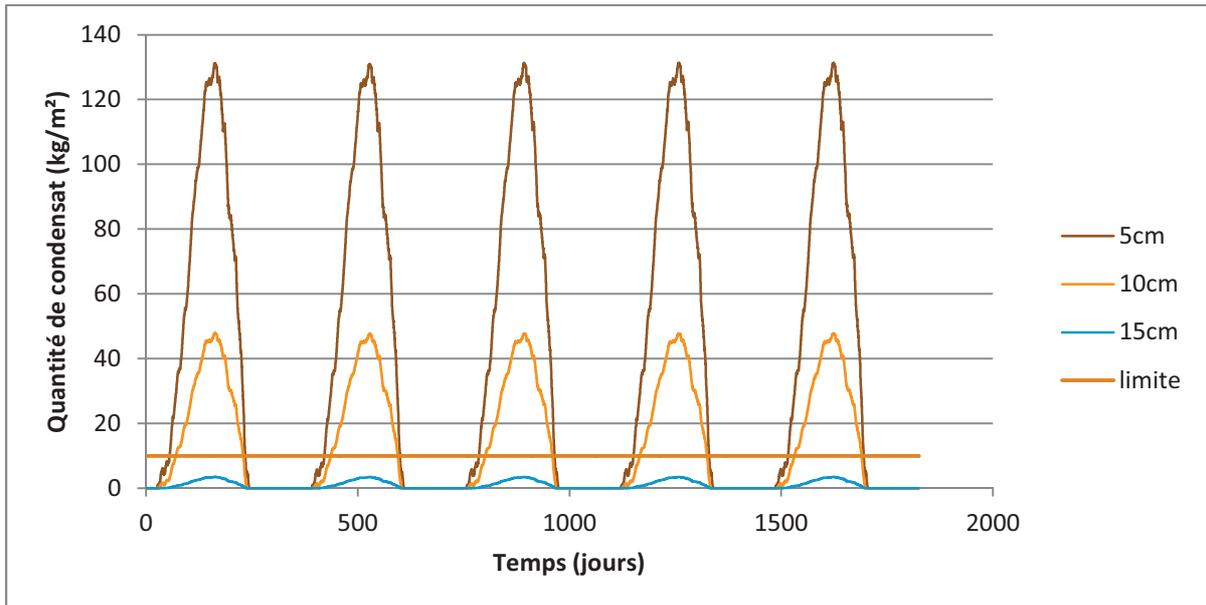
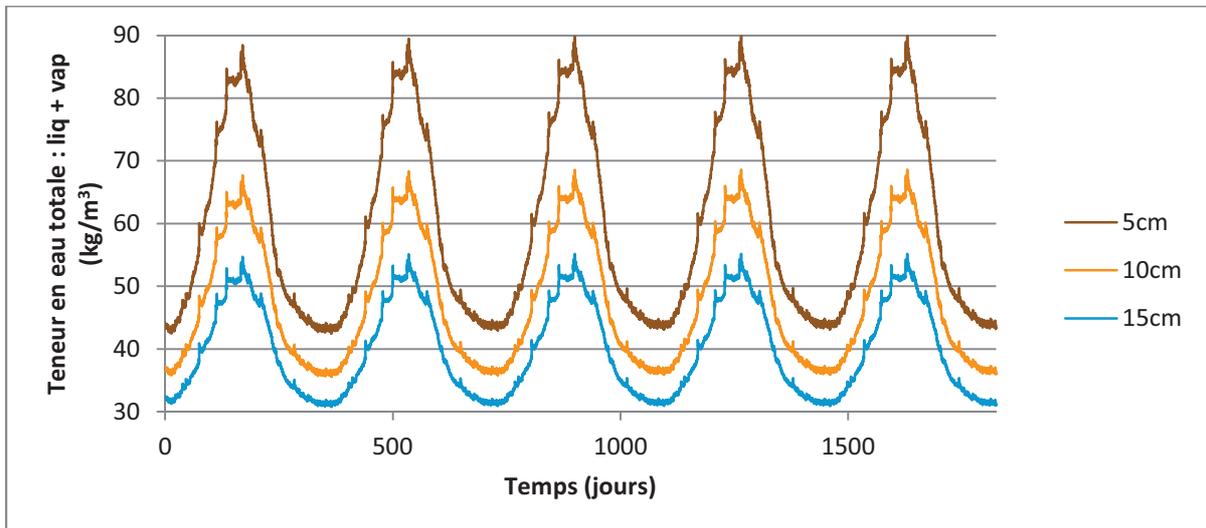
d. Au niveau du pont thermique



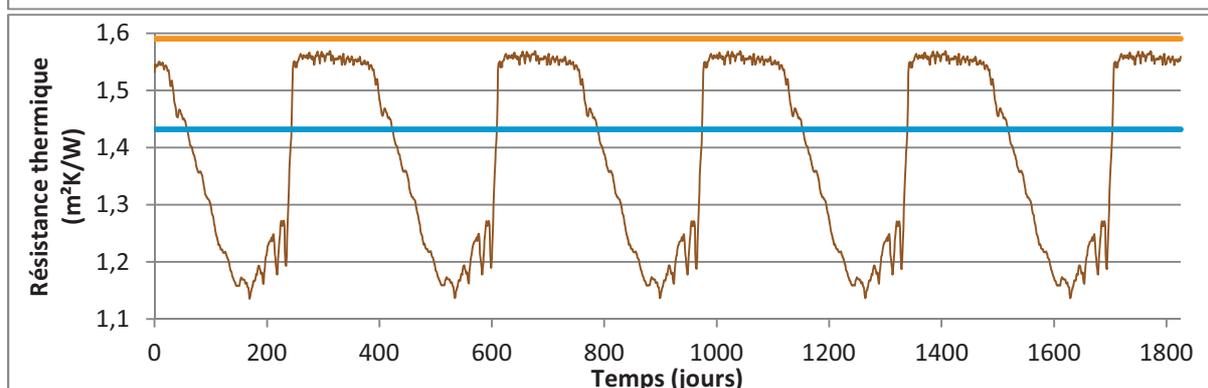
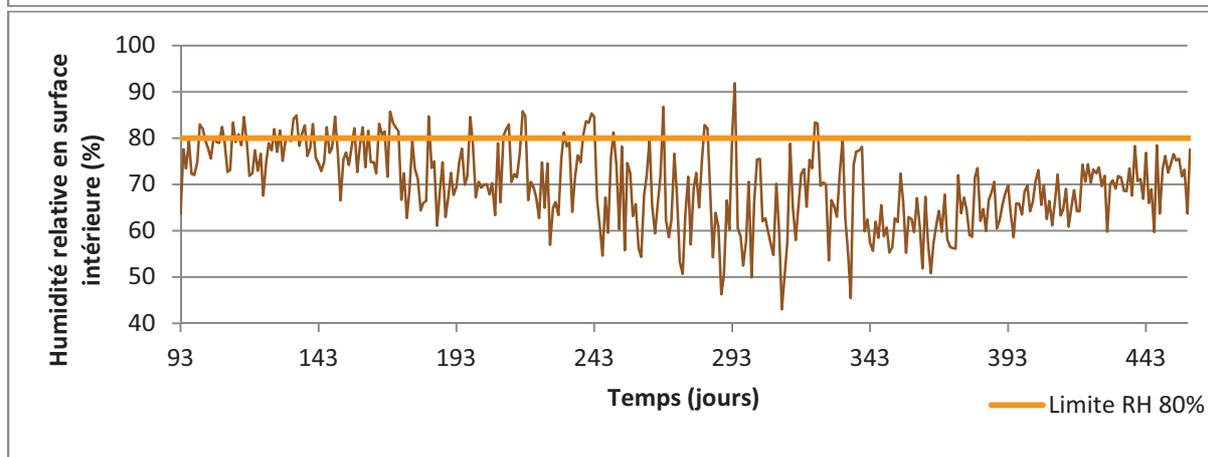
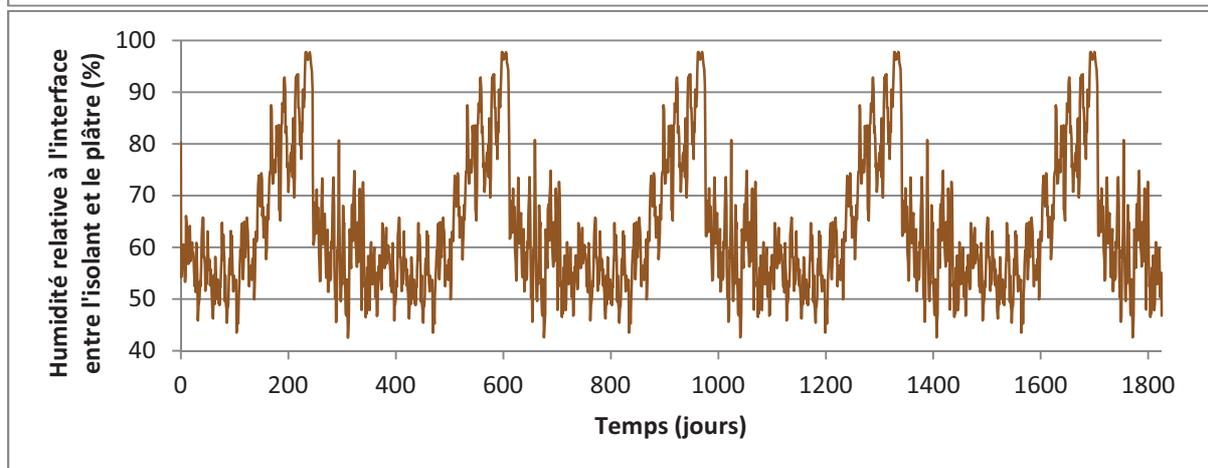
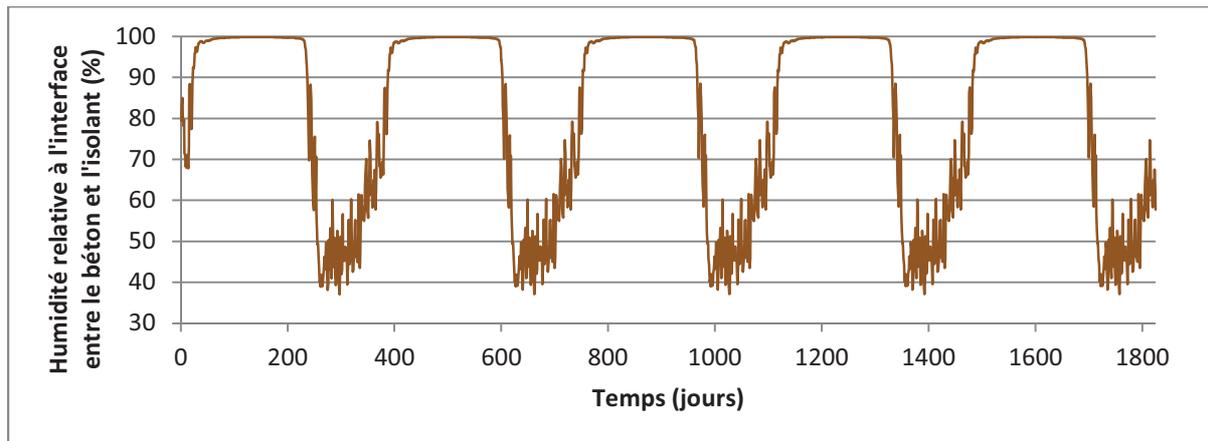


2.2.2. Etude paramétrique

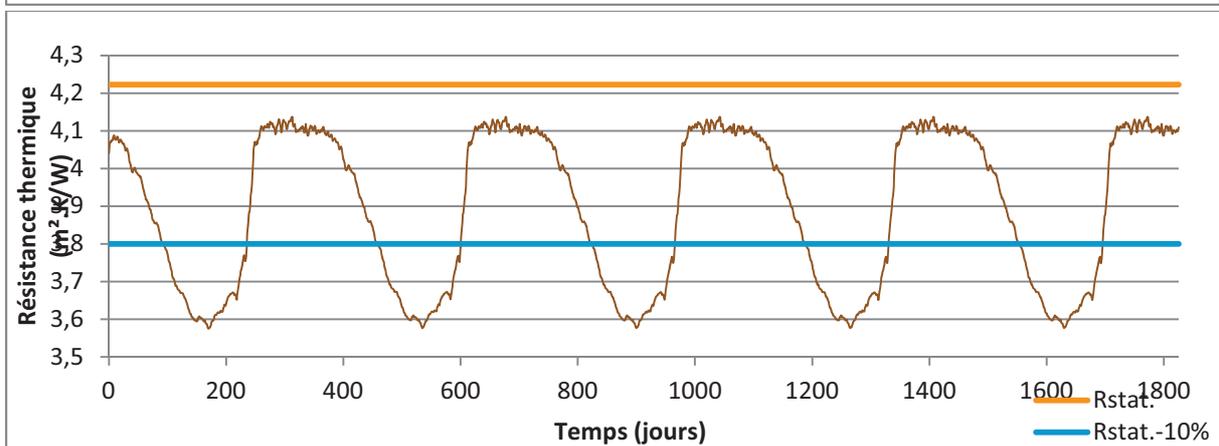
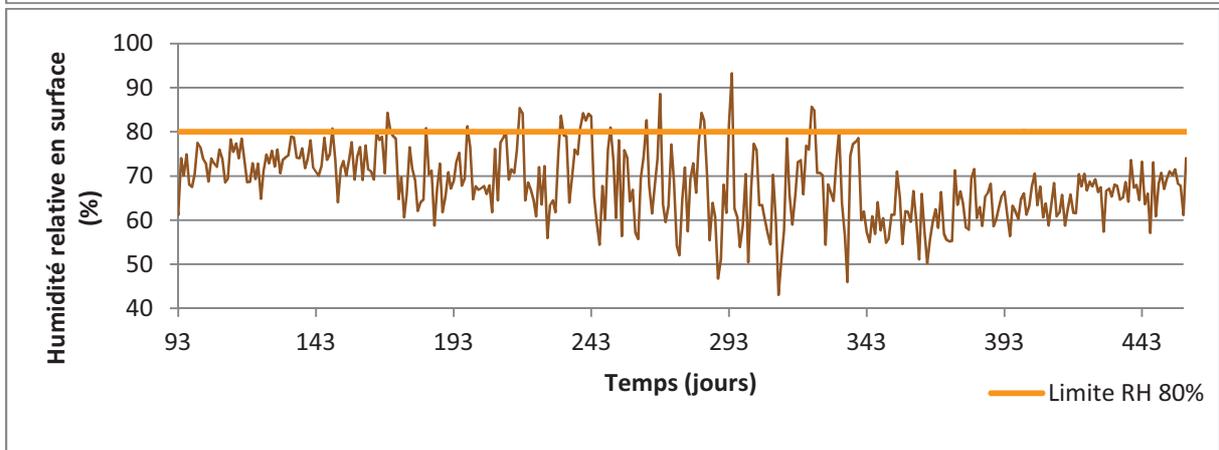
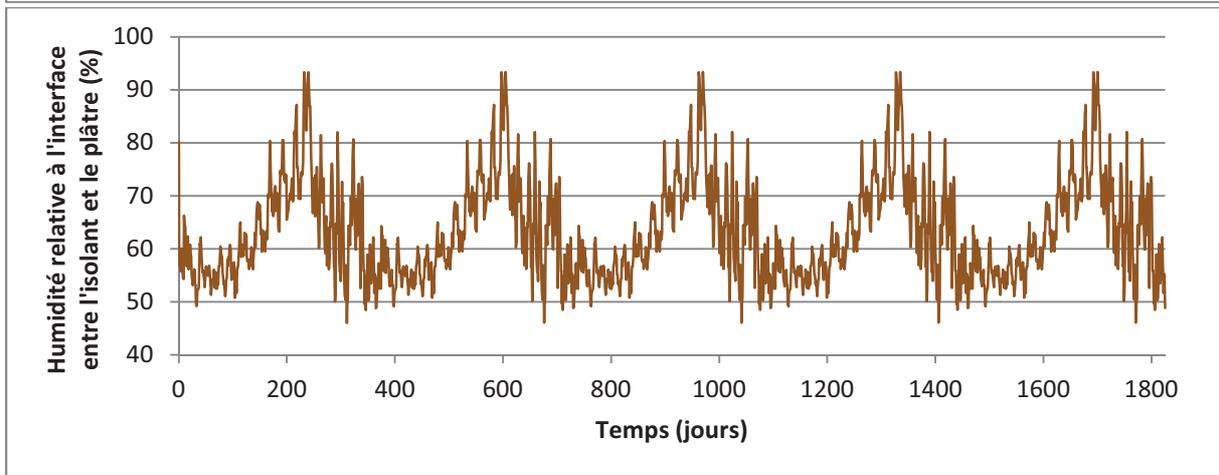
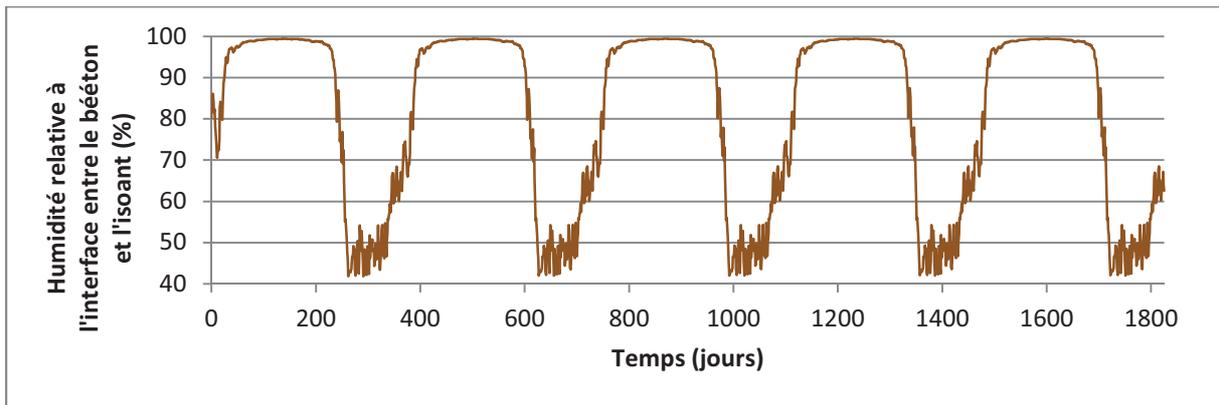
a. Variation de l'épaisseur d'isolant



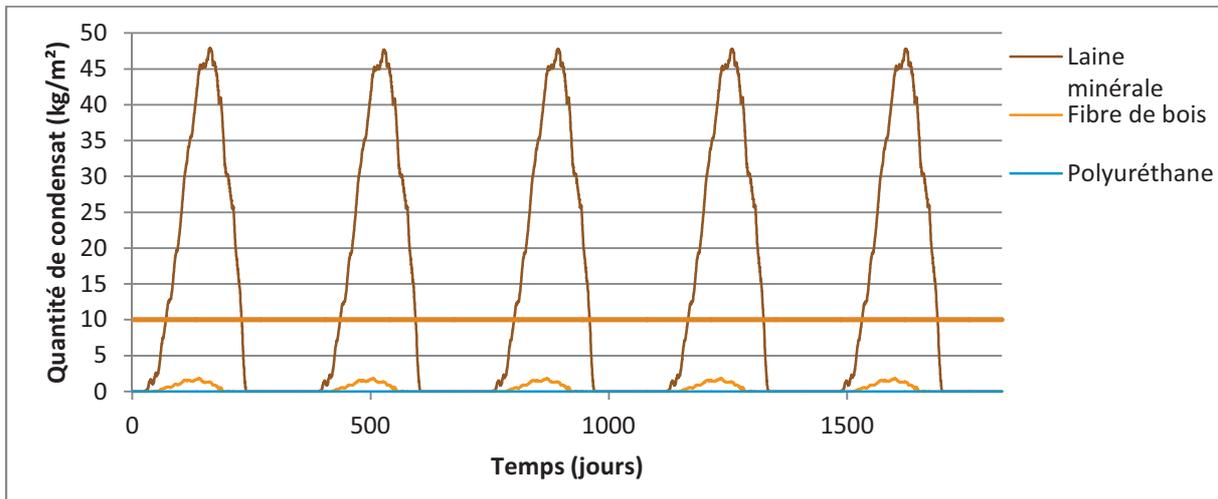
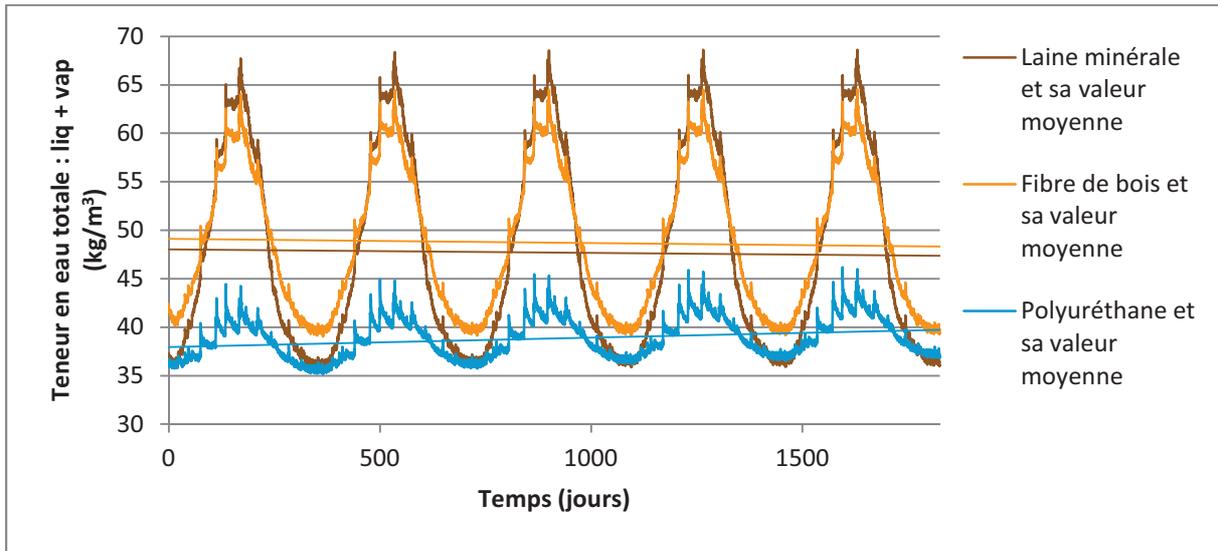
5cm d'isolant



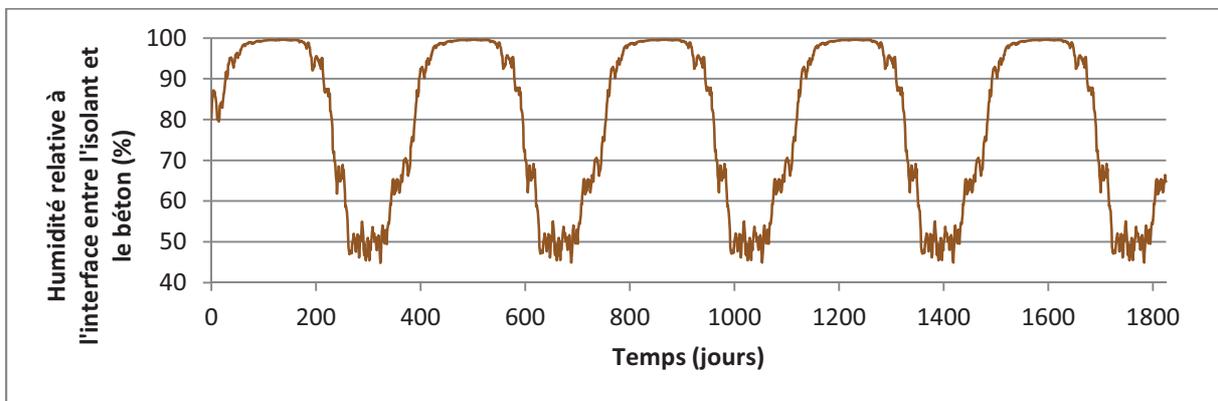
15cm d'isolant

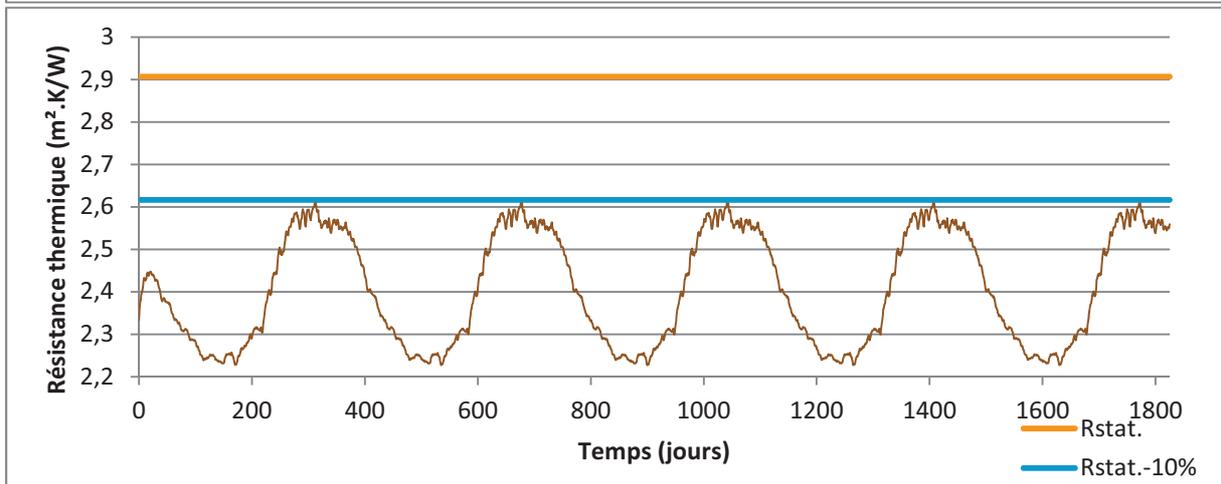
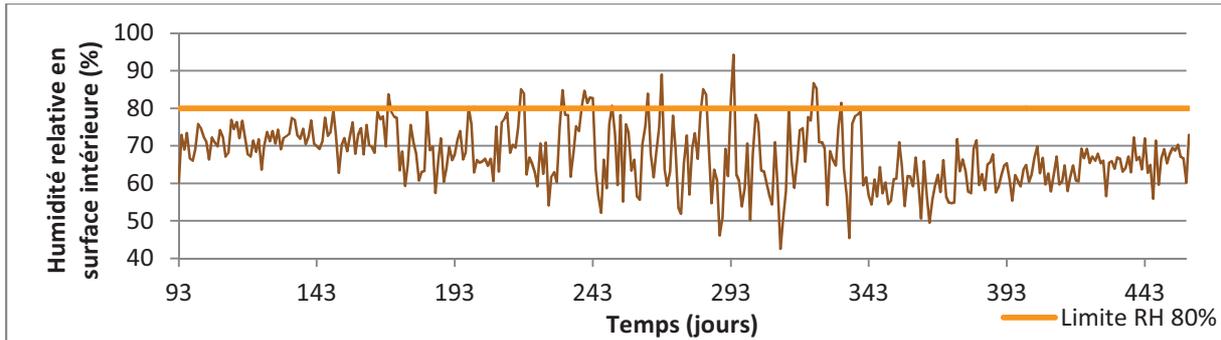
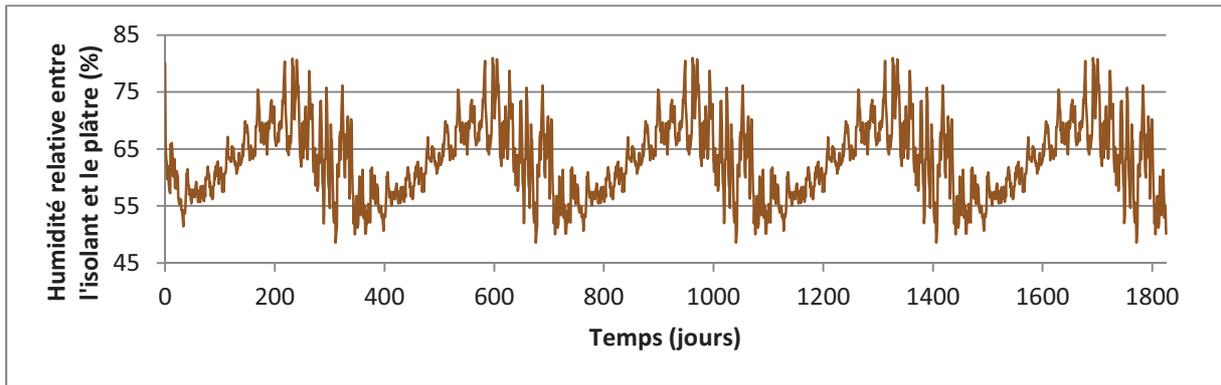


b. Variation du type d'isolant

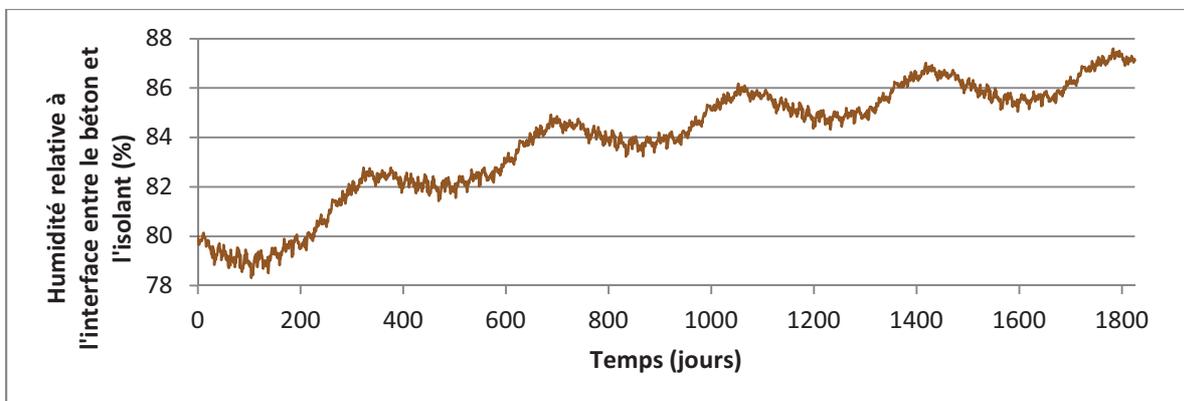


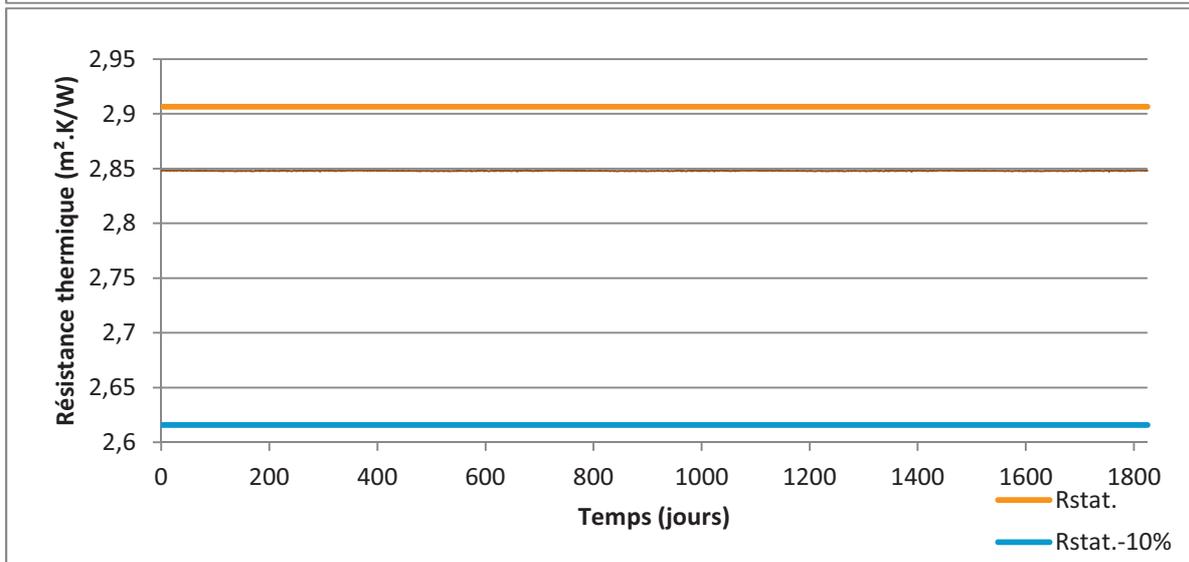
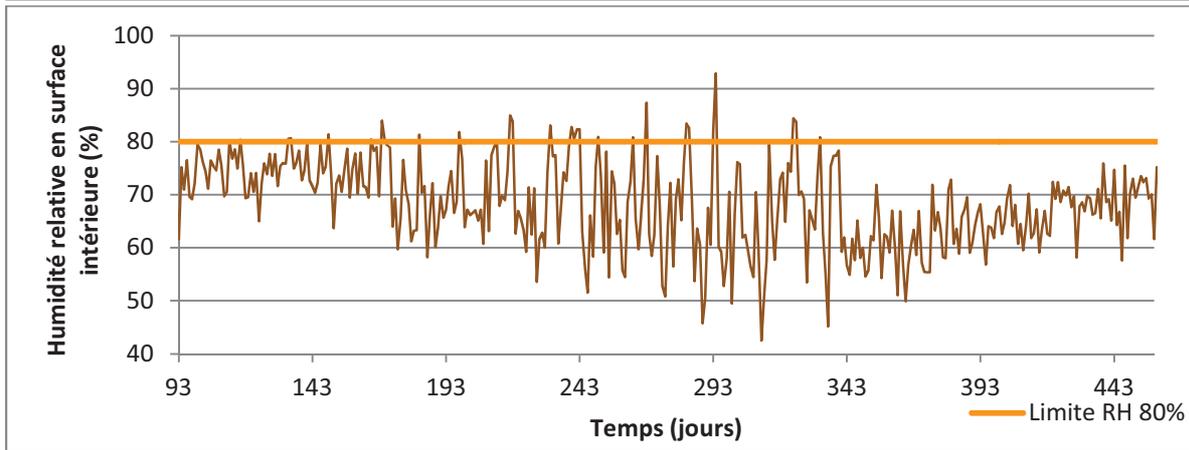
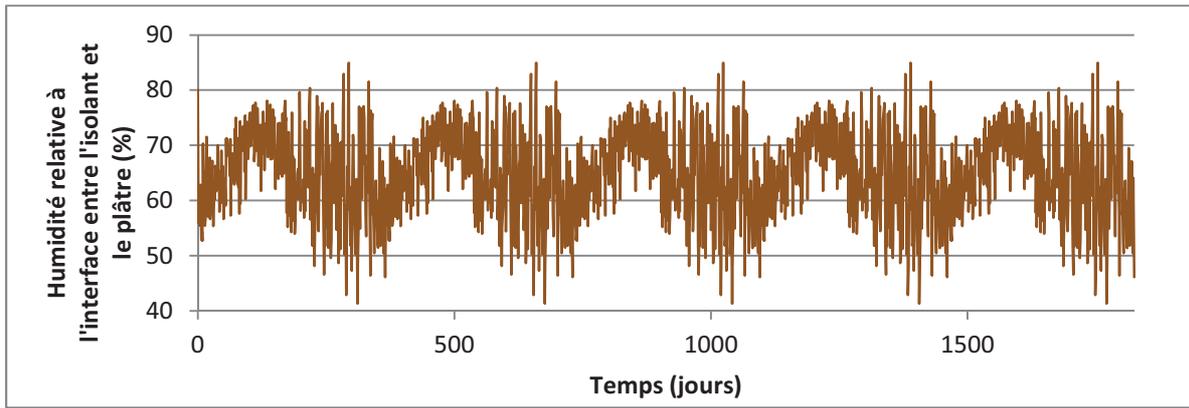
Fibre de bois





Polyuréthane





2.2.3. Généralisation : Moisissures et ponts thermiques

Cas	ψ (W/(m.K))	f_{RSi} (-)
Plancher intermédiaire		
A1	0,99	0,638
A2	1,27	0,579
A3	0,85	0,691
Plancher haut		
A4	0,77	0,819
A5	0,96	0,799
A6	0,38	0,903
B4	0,77	0,824
B5	0,96	0,802
B6	0,38	0,901
Plancher bas		
A7	0,87	0,763
A8	0,62	0,822
A9	0,5	0,855
B7	0,87	0,758
B8	0,62	0,824
B9	0,5	0,846

