

Faculty of Sciences and Technology  
Civil Engineering Department

كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية

N° d'ordre : M2.../GC/2025

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie civil

Spécialité : Structures

*Présenté par :*

**ABDALLAH BENSELLOUA ABBASSIA**

### Thème

**ANALYSE NUMERIQUE DU RISQUE DE  
CONDENSATION DANS UN MUR A OSSATURE EN BOIS**

*Soutenu devant le jury composé de :*

Dr MEHALA Tewfik

**Président**

Mr MOUSSAOUI Salaheddine

**Examineur**

Pr MALIKI Mustapha

**Encadrant**

Année Universitaire 2024/2025



## Remerciements

Avant tout, je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Dieu le tout puissant pour m'avoir doté de la force et de la patience nécessaire pour mener à bien ce travail. Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance envers ma famille qui a été toujours présente pour m'encourager et me soutenir tout le long de mon parcours académique.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mon encadrant Professeur MALIKI MUSTAPHA qui a généreusement accepté de me guider sur le chemin de la réussite avec sa préséance et ses précieux conseils, ainsi je tiens à remercier aussi Monsieur BOUHALOUFA AHMED, chef du département de génie civil.

D'autre part, je tiens également à exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury qui ont accepté de consacrer leur temps à l'évaluation de mon travail. Leurs commentaires et critiques constructives ont grandement contribué à enrichir mes connaissances et à améliorer la qualité de mon mémoire. Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation académique, leur expertise et leur dévouement ont été des sources d'inspiration pour moi.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Leurs collaborations, soutiens et encouragements ont été des éléments essentiels qui ont alimenté ma motivation et m'a permis de mener à bien ce projet.

## Dédicaces

Rien n'est aussi gratifiant que d'offrir le fruit de son travail avec dévouement et reconnaissance à ceux que l'on aime et que l'on remercie tout au long de notre vie.

Je dédie humblement ce travail à :

- ❖ Mes très chers parents, qui ont consacré leur vie à mon éducation et à mes études, et qui ont été un modèle de travail acharné et de persévérance en leur souhaitant tout le bonheur du monde.
- ❖ Mon frère MOHAMED NADIR et ma chère sœur, dont leur présence a été toujours précieuse dans ma vie.
- ❖ Mon amie IMANE BENADIDOU, qui a été présente à mes côtés, me soutenant et partageant des moments de joie et d'entraide.
- ❖ À toute la promotion du département de Génie Civil 2025/2024, une communauté soudée et engagée que nous avons partagé cette aventure ensemble.

Que ce travail puisse témoigner de ma gratitude et de ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à ma vie et à mon parcours académique.

## Résumé

Ce projet de fin d'études s'intéresse à l'évaluation du risque de condensation dans les murs à ossature en bois à l'aide d'une approche numérique. La condensation excessive peut altérer la durabilité du matériau, favoriser la prolifération de moisissures et compromettre l'efficacité thermique du bâtiment.

L'étude s'appuie sur des simulations numériques pour analyser les transferts de chaleur et d'humidité au sein de la structure et identifier les scénarios critiques conduisant à la condensation. Elle explore également les impacts des différentes configurations de paroi, des conditions climatiques et des matériaux isolants utilisés.

L'objectif est de proposer des recommandations visant à optimiser la conception des murs à ossature en bois afin de minimiser les risques de condensation et d'améliorer la performance énergétique des bâtiments.

## Abstract

This final project focuses on assessing the risk of condensation in timber-framed walls using a numerical approach. Excessive condensation can impair the durability of the material, promote mold growth, and compromise the building's thermal efficiency.

The study uses numerical simulations to analyze heat and moisture transfer within the structure and identify critical scenarios leading to condensation. It also explores the impacts of different wall configurations, climatic conditions, and the insulation materials used.

The objective is to provide recommendations for optimizing the design of timber-framed walls to minimize condensation risks and improve the energy performance of buildings.

## ملخص

يركز هذا المشروع في السنة النهائية على تقييم مخاطر التكثيف في جدران الإطار الخشبي باستخدام نهج عددي. يمكن أن يؤدي التكثيف المفرط إلى إضعاف متانة المادة، وتعزيز نمو العفن، والإضرار بالكفاءة الحرارية للمبنى.

وتستخدم الدراسة محاكاة رقمية لتحليل انتقالات الحرارة والرطوبة داخل الهيكل وتحديد السيناريوهات الحرجة التي تؤدي إلى التكثيف. ويستكشف أيضًا تأثيرات تكوينات الجدران المختلفة والظروف المناخية ومواد العزل المستخدمة.

الهدف هو اقتراح توصيات تهدف إلى تحسين تصميم الجدران ذات الإطارات الخشبية من أجل تقليل مخاطر التكثيف وتحسين الأداء الطاقوي للمباني.

# Table des matières

Remerciement.....	III
Dédicaces.....	IV
Résumé.....	V
Abstract.....	V
ملخص.....	V
Symboles et notations.....	XIII
Liste des figures.....	XVI
Liste des tableaux.....	XXI
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Généralité sur le matériau bois : de l'anatomie au comportement hygro-mécanique .

1. Introduction :.....	3
2. Historique :.....	4
2.1 Origine de bois ;.....	6
3. Le Bois Dans La Construction .....	7
3.1 Définition : .....	7
3.2 Avantages de l'utilisation du bois dans la construction .....	8
3.3 Les essences de bois :.....	9
3.4 La liste des essences de bois :.....	10
3.5 Utilisations des essences de bois :.....	12
3.6 Les classes de bois.....	12
3.7 Constructions bois en L'Algérie.....	13
3.7.1 Le bois disponible en l'Algérie .....	14
3.7.2 'importation de bois en L'Algérie pour la construction .....	15
3.7.3 Les zones propices à la construction en bois en L'Algérie .....	15
4. Structure anatomique et anisotropie .....	16
4.1 Anatomique : .....	16
4.1.1 Structure Anatomique du Bois à l'échelle macroscopie :.....	16
4.1.2 Structure anatomie de bois à l'échelle microscopique : .....	17
4.2. Anisotropie .....	18
4.2.1 Directions principales dans le bois .....	18
4.2.2. Conséquences de l'anisotropie sur les propriétés du bois .....	19
4.2.3 Importance de ces Propriétés dans la Conception de Structures en Bois .....	19
5. Structure de la paroi cellulaire :.....	20
5.1. Une spécificité de la cellule végétale : .....	20

5.2 Structure multicouche des parois cellulaires .....	20
6. Comportement hygroscopie : .....	21
6.1. L'eau dans le bois ;.....	21
6.1.1 .Le séchage à l'air.....	23
6.2. Phénomène d'hystérésis : .....	24
6.2.1 Introduction : .....	24
6.2.2 L'importante de phénomène de L'hystérésis en modélisation :.....	24
6.2.3 Absorption de l'eau par le bois :.....	26
7. Point de saturation des fibres :.....	28
7.1 L'humidité : .....	28
7.2 Régulation de l'humidité du bois : .....	29
7.3 Hygrométrie : .....	29
7.4 Calcul de la teneur d'humidité .....	30
7.5 .Humidité le bois de constructions : .....	30
7.6. Retrait et déformations du bois face à l'eau. ....	31
7.6.1. Retrait anisotrope.....	31
7.6.2. Conséquences du retrait et de la dilatation de l'eau dans le bois.....	32
8. Variation dimensionnelle : .....	33
8.1 Le travail du bois : .....	33
8.2. Estimations de travail d'une pièce de bois .....	34
9. Propriétés microscopique pour le couplage hygro-mécanique.....	35
9.1 Propriétés hydriques : .....	35
9.1.1 La teneur en humidité du bois .....	35
9.2. Propriétés mécanique : .....	36
9.2.1 Résistances .....	36
1. Flexion :.....	36
2. Cisaillement.....	37
3. Compression et traction parallèle au fil (grain).....	37
4. Compression oblique .....	38
9.3 Propriétés physique : .....	39
9.3.1 Densité ou masse volumique :.....	39
9.3.2. Propriétés du bois avant transformation : .....	40
9.3.3. Propriétés du bois après transformation : .....	41
Conclusion.....	42
<b>Chapitre II : Les isolants thermiques dans les bâtiments.....</b>	<b>43</b>
1. Introduction : .....	43

2. Les différents types des les isolants thermiques dans la construction :.....	43
2.1. Panneau Placoplatre : .....	43
2.1.1 Définition : .....	43
2.1.2 Propriétés thermique et physique et mécanique d'isolant Placoplatre : .....	45
2.1.4. Les avantages de panneau en gypse comme un isolant thermique :.....	47
2.2. Isolant cellulose : .....	47
2.2.1 Définition : .....	47
2.2.2 Les propriétés d'isolante cellulose .....	48
2.2.3. Les avantage d'isolante cellulose : .....	49
2.2.4 Le Facture R : .....	50
2.2.5. Installation d'isolante cellulose : .....	50
2.3. Panneaux à copeaux orientés (l'OSB) : .....	51
2.3.1 Définition.....	51
2.3.2 Les différents types de panneaux OSB :.....	51
2.3.3 Les propriétés de panneau l'OSB :.....	52
2.3.4 Utilisation de panneaux OSB en extérieur : .....	53
2.3.5 La charge maximale supportée d'un panneau OSB :.....	53
2.3.6 Les avantages et les inconvénients de l'OSB : .....	53
2.4 Le pin maritime .....	54
2.4.1 Définition.....	54
2.4.2 Disponibilité en Algérie : .....	55
2.4.3 Variétés disponibles en Algérie.....	56
2.4.4 Utilisation de bois pin :.....	56
2.4.5 Propriété physique et mécanique.....	56
2.4.6. Défis et gestion durable : .....	57
Conclusion.....	57
<b>Chapitre III : Mécanismes de transfert de chaleur et d'humidité.....</b>	<b>58</b>
1. Introduction .....	58
2. Transfer de chaleur dans un mur : .....	58
2.1 Conduction thermique stationnaire dans les parois planes :.....	58
2.2 Conductivité thermique .....	60
2.3 Le concept de résistance thermique /.....	60
2.4 Coefficient de transfert thermique : .....	61
3. Les types de Transfer de chaleur : .....	61
3.1 Conduction : .....	61
3.2 Convection : .....	62

3.3 Rayonnement :	62
4. Formules de la conductivité thermique et du transfert de chaleur :	63
4.1 Flux de chaleur par conduction :	63
4.1 Flux de chaleur par convection :	64
La formule du transfert de chaleur par convection est la suivante :	64
4.3 Transfert de chaleur par rayonnement :	64
5. Transfer d'humidité :	65
5.1 Les dégâts liée à humidité dans les bâtiments	65
5.2 Les sources d'humidité dans les bâtiments se répartissent en trois grandes familles :	65
5.3 Modifications des propriétés mécaniques :	65
6. Les dégâts cause par humidifie dans les bâtiments :	67
6.1 La source de l'humidité :	67
6.2 Moisissure :	68
6.2.1 Risques pour la santé :	70
6.2.2 Dégradation des matériaux :	71
6.2.3 Conséquences de l'humidité sur les matériaux de constructions bois :	71
Conclusion.....	72

**Chapitre IV : Modélisation numérique du comportement hygrothermique d'un mur en bois isolé**  
..... 73

1. Introduction :	73
2. Contexte :	73
3. Objectifs de la simulation :	73
4. Méthodologie de simulation via COMSOL-Multiphysiques :	74
5. La méthode de Glaser :	74
5.1 But de la méthode :	74
5.2 Remarque.....	75
5.3 La norme EN 15026 :	76
5.4 vitesse et direction du vent. ....	76
6. Le Risque de condensation dans un mur à ossature bois :	77
6.1 Introduction :	77
6.2 Modèle mathématique :	77
6.2.1 Détermination des résistances thermiques.....	77
6.2.2 Calcul des pressions partielles de vapeur d'eau :	78
6.2.3 Modalisations dynamique du transport de chaleur et d'humidité :	78
6.2.4 Modalisation statique de transport de chaleur et humidité :	79
6.2.5 Modélisation du pare-vapeur :	79

6.2.6 Variation diurnes des conditions extérieures.....	80
6.3 Comparaison entre régime stationnaire et régime transitoire :.....	81
Conclusion.....	81
<b>Chapitre V : Résultats et discussions.....</b>	<b>82</b>
1. Introduction : .....	82
2. Géométrie du modèle : .....	82
2.1 Géométrie de model 1 .....	82
2.2 Géométrie de model 2 : .....	83
3. Conditions aux limites : .....	84
4. Propriétés des matériaux : .....	85
4.1 Propriété des matériaux Mur étudié (1 <sup>ère</sup> variante) :.....	85
4.2 Propriétés des matériaux mur étudié (2 <sup>ème</sup> variante) :.....	85
5. Étude du mur (1 <sup>ère</sup> variante) :.....	85
5.1 Distribution de température et de l’humidité sans pare-vapeur.....	89
5.2 Conductivité thermique des matériaux utilisés :.....	90
5.3 Propriétés des matériaux : .....	91
5.4 Diffusion de la vapeur d’eau : .....	92
5.4.1 Risques de condensation : .....	92
5.4.2 Gestion de l’humidité et solutions :.....	92
5.5 Effet du pare-vapeur sur la distribution de la chaleur et de l’humidité .....	94
5.6 Comparaison des approches de modélisation :.....	95
1. Température : .....	97
2. Humidité relative :.....	98
3. Comparaison des interactions :.....	99
5.7 Distribution de température et de l’humidité régime variable.....	99
6. Maillage :.....	101
7. Étude du mur (2 <sup>ème</sup> variante) : .....	103
6.1 Distribution de température et de l’humidité sans pare-vapeur :.....	105
6.2 Distribution de température et de l’humidité avec pare-vapeur : .....	107
6.3 Comparaison des approches de modélisation :.....	108
6.4 Distribution de température et de l’humidité régime variable.....	109
7. Maillage.....	111
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>112</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>112</b>

## Symboles et notations

CTL : Acronyme de « Cross Laminated Timber ».

LVL : type de bois d'ingénierie utilisés dans la construction Fabriqué en collant des fines couches de bois (placages)

PSL : type de bois d'ingénierie utilisés dans la construction Constitué de longues fibres de bois collées parallèlement.

LSL : type de bois d'ingénierie utilisés dans la construction Composé de petits morceaux de bois collés ensemble,

BA13 : Une plaque de plâtre très courante dans la construction et la rénovation

OSB : Panneau de lamelles orientées

C AvEMC : Courbe de la moyenne

DeEMC : Courbe de désorption

AbEMC : Courbe d'adsorption

STB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

THE : La teneur en humidité à l'équilibre

TM : La teneur en humidité de surface

PSF : Le point de saturation des fibres

ASHRAE : Conditions thermiques pour le confort des occupants

PE : un polymère thermoplastique largement utilisé dans l'industrie.

RH : L'humidité relative

$\Delta V$  : la variation de volume

$m_b$  : la masse à l'état humide,

$m_0$  : la masse à l'état anhydre.

$T_\infty$  : Température de l'air ambiant et de la surface du bois

$T_s$  : Température de l'air ambiant et de la surface du bois

$C_\infty$  : Concentration de vapeur d'eau de l'air ambiant et en équilibre avec la surface du bois

$C_s$  : Concentration de vapeur d'eau de l'air ambiant et en équilibre avec la surface du bois

$\alpha$  : Coefficient de transfert thermique

$\beta$  : Coefficient de transfert de masse (m/s)

$m_e$  : Masse d'eau dans le bois et  $m_s$  la masse de bois anhydre

$m_h$  : Masse de spécimen de teneur en humidité donnée

$R_t$  : Retrait tangentiel

$R_r$  : retrait radial

$\Delta L$  : accroissement ou diminution de longueur due au changement de teneur en eau du bois

$L$  : dimension du bois dans la direction considérée avant le changement de la teneur en eau  $w$

$\Delta h$  : la variation de la teneur en eau

$R$  : Résistance thermique

$\mu$  : Perméabilité à la vapeur d'eau

$A$  : La différence de température à travers la paroi

$\Delta x$  :  $L$  et de surface

$q'$  : Le taux de transfert de chaleur

$Q'_{\text{cond}}$  : le taux de conduction thermique

$R_{\text{mur}}$  : la résistance thermique de la paroi à la conduction thermique

$K$  : la conductivité thermique du matériau

$dE$  : La variation énergétique

$Q$  : la chaleur transférée (J),

$\lambda$  : le coefficient de conductivité thermique

$A$  : l'aire du flux de chaleur

$t$  : le temps (s)

$\Delta T$  : la différence de température

$X$  : coefficient de conductivité thermique ( $w/m \times k$ )

$\Delta y$  : Différence de température (froid – chaud)

$h$  : le coefficient de transfert thermique par convection

$\Delta T$  : la différence de température entre la surface et le liquide

$\Theta_m$  : la différence de température logarithmique moyenne

$\Theta_1$  : la différence de température entre les deux fluides à une extrémité de l'échangeur de chaleur,

$\Theta_2$  : la différence de température entre les deux fluides à l'autre extrémité de l'échangeur de chaleur

$\ln$  : indique un logarithme naturel

$R_{\text{crit}}$  : Les résistances minimales à la compression.

$R_{\text{meca}}$  : la résistance mécanique

$\phi$  : L'humidité relative

$R_{\text{vapeur}}$  : est la résistance à la diffusion de vapeur de la couche en question

$P_{v, \text{ext}}$  : la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air extérieur

$P_{v,int}$  : la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air intérieur  
 $C_p$  : la capacité thermique volumétrique effective à pression constante  
 $T$  : la température  
 $k_{eff}$  : la conductivité thermique effective  
 $L_v$  : la chaleur latente d'évaporation  
 $\delta_p$  : la perméabilité à la vapeur  
 $Q$  : la source de chaleur  
 $\xi$  : la capacité de stockage d'humidité  
 $D_w$  : la diffusivité de l'humidité  
 $G$  : la source d'humidité  
 $\rho$  : La masse volumique du matériau  
 $P_V$  : la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air,  
 $P_{Sat}$  : la pression de saturation de la vapeur d'eau à la température ambiante

## Liste des figures

Figure 1 : le forêt de l'akfadou à wilaya de Bejaïa, source ( site web LIBERTE QUOTIDIEN NATIONAL D'INFORMATION).....	4
Figure 2 :L'utilisation du bois par l'Homme et les révolutions l'humanité dans toutes les grandes Siècle, Source (site France bois forêt interprofession nationale de la filière forêt bois) .....	5
Figure 3 : Différentes échelle d'observation d'un bois de résineux d'après bouslimi (2014), Source,( site web slideplayer ) .....	6
Figure 4: coupe de tronc d'arbre avec le cambium Source (site assistance scolaire personnalisée).....	7
Figure 5 : Carte simple de la défloration en Amazone source ( site CANALBLOG La forêt de Amazonienne) .....	11
Figure 6 : Zone éco-végétale Source ( site planeteafrique.free.fr} .....	11
Figure 7: tableau exprime les cinq classes d'emploi du bois, Source (site ANOVA BOIS 2025).....	13
Figure 8 : Principaux écosystèmes forestiers de l'Est Algérien, source ( site 2008-2025 ResearchGate} .....	14
Figure 9 : Structure de bois deux groupe , source (site SlidePlayer.fr 2025} .....	16
Figure 10: Représentation schématique au niveau microscopique d'un résineux, source ( site ResearchGate GmbH. }.....	17
Figure 11: Plan ligneux d'un feuillu: source ( Robert et Catesson 1999 ,site web ResearchGate ) .....	18
Figure 12 : la paroi cellulaire végétale de bois, source (document de recherche université de lorraine mémoire fin d'étude) .....	20
Figure 13 : Décomposition de la paroi cellulaire du bois, source (document de recherche université de lorraine mémoire fin d'étude).....	21
Figure 14; Courbe d'équilibre hygroscopique de bois, source (site web HoutInfoBois 2025}.....	22
Figure 15 : Exemple de processus de séchage dans un diagramme de sorption .....	26
Figure 16 : Mise en évidence expérimentale de la remontée d'eau par capillarité dans les fibres du bois (source : Amaco, Université de Lyon 1) .....	27
Figure 17 : Diagramme Le diagramme de Mollier, source (site MATERIAUTEQUE 2021}.....	28
Figure 18 : schéma exprime phénomène de retrait, source (site MATRIAUTEQIE 2021} ....	31

Figure 19 : Retrait du bois ( <i>source : CNDB – Anatomie du bois</i> ), source ( site MATRIAUTEQUE 2021 ) .....	32
Figure 20 : Déformations liées au retrait anisotrope du bois ( <i>source : Wikibois</i> ).....	32
Figure 21 : Variations dimensionnelles une pièce de bois, source (site © HoutInfoBois 2025 .....	35
Figure 22 : exemple, la résistance en flexion d’une pièce de bois de charpente légère du groupe, source (site web cecobois 2025) .....	36
Figure 23: La résistance en cisaillement d’une pièce de bois, source ( site web cecobois 2025 } .....	37
Figure 24 : compression d’une pièce de bois , source ( site web cecobois 2025 } .....	38
Figure 25 : traction d’une pièce de bois, source ( site web cecobois 2025 } .....	38
Figure 26 : compression oblique d’une pièce de bois , source ( site web cecobois 2025 } .....	39
Figure 27 : gypsum board ( panneau en gypse ) , source ( site commercial ideleco insulation BOARD France ).....	44
Figure 28 : PRÉGYPLAC A1 BA13 épaisseur 12 5 mm largeur 120 cm, Source ( site France SINIAT ) .....	45
Figure 29 : isolation cellulose, source (site CONSTRUCTION RONOvation 2015-2025 adik média ).....	48
Figure 30 : les plaques l’OSB Source (site commerciale CHASSON France).....	51
Figure 31 : Les photos (A) et (B) est bois pin maritime, source ( site orcamentos.paulobastos ).....	54
Figure 32 : la zone de disponibilité de pin maritime en Algérie, Source ( étude revue des sciences de la nature site web researchgate ) .....	55
Figure 33 : Conduction thermique à travers une grande paroi plane. ....	59
Figure 34 : une tige métallique chauffée à une extrémité .....	61
Figure 35 : schéma des les trois types de Transfer de chaleur .....	62
Figure 36 : L’isolation multicouche réduit le transfert de chaleur par rayonnement en réfléchissant le rayonnement vers la source .....	63
Figure 37 :: Diminution de la résistance à la compression avec augmentation de la teneur en eau pour la pierre calcaire (Beck 2006).....	66
Figure 38 : Définition de la résistance mécanique critique pour prévenir de pathologies, source (Recherche Université de Savoie, Campus Scientifique, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget-du-Lac Cedex .....	66

Figure 39 : les différentes sources d'humidité, source (mémoire de fin étude master académique synthés bibliographique sur les bâtiments causé par l'humidité).....	67
Figure 40 : un mur moisi à cause l'humidité à London, source (site web info sinistar ) .....	68
Figure 41 : Infiltration directe par le toit source (site web info sinistar) .....	69
Figure 42: les différentes diffusions de l'humidité, source (mémoire de fin étude master académique synthés bibliographique sur les bâtiments causé par l'humidité).....	70
Figure 43 : Moisissure du bois Fonction de son taux d'humidité. source ( site web info sinistar ).....	72
Figure 44 : Méthode de Glaser et condensation interne en hiver .source (guide ENR haute qualité environnement l'information HQE) .....	75
Figure 45 : Données ambiantes de température et d'humidité relative utilisées sur la face extérieure du mur .....	80
Figure 46 : Géométrie du mur étudié. ....	82
Figure 47 : géométrie d'un mur étudié.....	83
Figure 48 : les diagrammes A B C et D exprime la teneur en eau de les couches d'ossature .....	86
Figure 49 : les diagrammes E F G et H exprime le coefficient de diffusion de les couches d'ossature .....	87
Figure 50 : diagramme I J K et L exprime les courbes de conductivité thermique de mur isolé .....	88
Figure 51 : diagramme de perméabilité de la vapeur .....	89
Figure 52 : Distribution de température, étude stationnaire sans pare-vapeur mur 1 .....	89
Figure 53 : Distribution de l'humidité relative, étude stationnaire sans pare-vapeur. ....	91
Figure 54 : perméabilité à la vapeur (sans pare-vapeur) mur 1 .....	93
Figure 55 : Effet du pare-vapeur sur la répartition de l'humidité relative à travers le mur, dans la charpente en bois et dans l'isolation.L'effet sur la distribution de la température est illustré .....	94
Figure 56 : Effet du pare-vapeur sur la répartition de la température à travers le mur, dans la structure en bois et dans l'isolation .....	95
Figure 57 : Comparaison des approches de modélisation de la distribution de la température à travers le mur, dans la structure en bois et dans l'isolation. ....	96
Figure 58 : Comparaison des approches de modélisation de la distribution de l'humidité relative à traver le mur, dans l'ossature bois et dans l'isolation.....	97
Figure 59 : distribution de la température étude régime variable.....	99

Figure 60 : distribution de la relative humidité étude régime variable .....	100
Figure 61 : la géométrie de maillage d'étude mur 1 .....	102
Figure 62 : les diagrammes A ,B,C et D de la teneur en eau de chaque couche de mur.....	103
Figure 63 : les diagramme ( E ) , (F) et (G) de coefficient de diffusion en fonction de temps (s).....	104
Figure 64 : le diagramme (H) et (I) les courbe de la conductivité thermique en fonction de temps .....	105
Figure 65: les diagrammes (J) et (K) les courbe de la permèabilité de la vapeur en fonction de l'humidité relative .....	105
Figure 66 : Distribution de température, étude stationnaire sans pare-vapeur.....	106
Figure 67 : Distribution de l'humidité relative , étude stationnaire sans pare-vapeur .....	106
Figure 68 : Distribution de température, étude stationnaire avec pare-vapeur .....	107
Figure 69 : Distribution de l'humidité relative, étude stationnaire avec pare-vapeur.....	107
Figure 70 : Comparaison des approches de modélisation de la distribution de la température à travers le mur, dans la structure en bois et dans l'isolation .....	108
Figure 71 : Comparaison des approches de modélisation de la distribution de l'humidité relative à travers le mur, dans l'ossature bois et dans l'isolation .....	109
Figure 72 : Distribution de température, étude régime variable mur 2 .....	109
Figure 73 : Distribution de l'humidité relative, étude régime variable mur 2.....	110
Figure 74 : Données ambiantes de température et d'humidité relative utilisées sur la face extérieure du mur .....	110
Figure 75 : la géométrie de maillage mur étudié 2.....	111

## Liste des tableaux

Tableau 1: tableau exprime les avantages de l'utilisation de bois comme matériau de construction .....	8
Tableau 2 : la liste des essences de bois disponible sur le marché source (site WOOD PARTNERS France 2024) .....	10
Tableau 3 : Tableau l'utilisation de bois, source (site WOOD PARTNERS 2024 entreprise bois .....	12
Tableau 4: Tableau exprime Conséquences de l'anisotropie sur les propriétés du bois .....	19
Tableau 5 : tableau présente teneur de eau de l' aubier et du duramen des feuillus et résineux ( perré Bade 2006) .....	29
Tableau 6 : tableau exprime le taux d'humidité de quelque essence de bois.....	30
Tableau 7: tableau exprime la densité de bois, source (les propriété de densité résistance conductivité du bois , site web MAT7RIAUTHEQUE) .....	40
Tableau 8: tableau exprime la conductivité thermique de bois .....	41
Tableau 9 : tableau exprime les propriétés thermiques de panneau Placoplatre .....	45
Tableau 10 : tableau exprime les propriétés physiques de panneau Placoplatre.....	45
Tableau 11 : tableau exprime les propriétés mécaniques de panneau Placoplatre.....	46
Tableau 12 : tableau exprime les différents usages de panneau Placoplatre.....	46
Tableau 13 : tableau exprime les propriétés thermiques d'isolante cellulose .....	48
Tableau 14 : tableau exprime les propriétés physiques d'isolante cellulose.....	49
Tableau 15 : tableau exprime les propriétés mécaniques d'isolante cellulose.....	49
Tableau 16 : tableau exprime les propriétés mécaniques de panneau l'OSB.....	52
Tableau 17 : tableau exprime les propriétés thermiques de panneau l'OSB.....	52
Tableau 18: tableau exprime les propriétés physiques de panneau l'OSB .....	52
Tableau 19 : tableau exprime les valeurs mécanique de bois pin maritime, source ( site french timber .....	56
Tableau 20 : Production de vapeur d'eau due aux usagers. Source : « Santé et Qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments », Claude-Alain Rouet.....	68
Tableau 21 : tableau exprime dégradation des matériaux .....	71
Tableau 22 : tableau exprimes Les conditions environnementales de fonctionnement .....	84
Tableau 23 ; tableau de propriété des matériau de mur étudié model 2.....	85
Tableau 24 : tableau de propreté des matériaux d'ossature en bois model 2 .....	85

## Introduction Générale

La condensation dans les murs à ossature en bois est un phénomène complexe influencé par divers facteurs environnementaux et structurels. Ce processus, qui résulte de l'interaction entre la température, l'humidité et les propriétés des matériaux, peut avoir des conséquences néfastes sur la durabilité des bâtiments. En effet, une mauvaise gestion de l'humidité peut engendrer des pathologies graves, telles que le développement de moisissures, la détérioration des matériaux isolants et, à terme, une perte d'efficacité thermique du bâtiment.

Les bâtiments à ossature bois connaissent un essor considérable en raison de leur légèreté, leur performance thermique et leur impact écologique réduit. Toutefois, ces structures présentent une sensibilité particulière aux risques de condensation et nécessitent une étude approfondie pour garantir leur pérennité. La conception et la mise en œuvre de ces constructions doivent tenir compte des échanges thermiques et hydriques afin de limiter l'accumulation d'humidité à l'intérieur des parois.

L'analyse numérique joue un rôle clé dans l'évaluation et la prévention des phénomènes de condensation. Grâce à la modélisation des transferts de chaleur et d'humidité, il est possible d'anticiper les zones à risque, d'optimiser les choix de matériaux et de concevoir des solutions adaptées pour améliorer la durabilité des structures en bois. Les outils numériques permettent de simuler différentes configurations en fonction des conditions climatiques et des caractéristiques des matériaux, offrant ainsi une approche préventive et optimisée de la conception des bâtiments.

L'objectif de ce mémoire est d'examiner les risques de condensation dans les murs à ossature bois à travers une approche numérique. Nous nous intéresserons aux méthodes de simulation permettant d'évaluer les transferts thermiques et hydriques dans les parois. Par ailleurs, une analyse des facteurs influençant la condensation sera réalisée afin de proposer des solutions concrètes et efficaces pour réduire ces risques. Cette étude vise ainsi à contribuer à une meilleure compréhension des phénomènes hydriques dans les structures en bois et à fournir des recommandations techniques pour garantir leur durabilité.

Le travail est réalisé selon le plan de travail suivant :

**Le premier chapitre** qui est consacré L'étude du bois sous l'angle de son anatomie et de son comportement hygro-mécanique. **Le deuxième chapitre** vise à expliquer le rôle des isolants thermiques qui sont essentiel dans la réduction des pertes de chaleur, et que l'étude de ces matériaux est primordiale pour concevoir des bâtiments plus durables. **Le troisième**

**chapitre** vise à expliquer les mécanismes du transfert de chaleur et leur impact sur la performance thermique des bâtiments. **Le quatrième chapitre** vise à analyser, à travers la modélisation numérique, le comportement hygrothermique d'un mur en bois isolé dans un bâtiment. **Le cinquième chapitre** l'étude thermique et les résultats obtenus. Ce travail s'achève par une conclusion générale et quelques recommandations.

**But du travail :**

Ce mémoire de fin d'étude vise à évaluer, par une approche numérique, le risque de condensation dans un mur à ossature bois, afin de mieux comprendre les mécanismes hygrothermiques influençant la durabilité des structures. L'objectif principal est d'analyser, à l'aide de l'outil de simulation Comsol-Multiphysics, les transferts combinés de chaleur et de vapeur d'eau au sein des différentes couches du mur, pour identifier avec précision les conditions susceptibles de provoquer la condensation et ainsi proposer des solutions constructives optimisées.

# Chapitre I

## Généralité sur le matériau bois : de l'anatomie au comportement hygro-mécanique

### 1. Introduction :

Le bois est un matériau de construction utilisé depuis des millénaires, apprécié pour sa disponibilité, sa résistance mécanique et son esthétisme. Dans un contexte où la construction durable devient une priorité mondiale, le bois connaît un regain d'intérêt en tant qu'alternative écologique aux matériaux conventionnels comme le béton et l'acier.

Grâce à ses propriétés naturelles, il offre de nombreux avantages : une légèreté structurelle permettant une mise en œuvre rapide, une excellente isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une empreinte carbone réduite. L'essor de nouvelles technologies, telles que le bois lamellé-collé et le bois massif contrecollé (CLT), permet aujourd'hui la réalisation de bâtiments de grande hauteur, démontrant ainsi son potentiel pour l'architecture moderne.

Cependant, malgré ses atouts, l'utilisation du bois en construction présente également des défis, notamment en matière de durabilité face aux conditions climatiques, aux insectes et au feu. Des traitements spécifiques et des conceptions adaptées sont donc nécessaires pour garantir sa longévité et ses performances.

Ce projet vise à explorer en profondeur le rôle du bois dans la construction, en mettant en avant ses caractéristiques, ses applications modernes et les enjeux liés à son utilisation dans un contexte de développement durable. À travers cette étude, nous analyserons comment ce matériau ancestral s'adapte aux exigences contemporaines et aux défis environnementaux du XXI<sup>e</sup> siècle.

## 2. Historique :

Une forêt est un milieu naturel où vivent une multitude d'espèces animales et végétales. Elles ont toutes besoin les unes des autres, mais aussi de la forêt, pour vivre. On dit qu'une forêt est un écosystème. Il existe des liens très forts entre les différents éléments d'un écosystème. Les oiseaux, par exemple, ont besoin des arbres pour construire leurs nids, les vers de terre aèrent les sols pour permettre aux racines des arbres de se développer, La forêt fournit une [matière première] de grande qualité pour se chauffer ou fabriquer des objets, des meubles, des maisons, etc. Des milliers de personnes travaillent dans les forêts, et grâce aux forêts : bûcherons, gardes forestiers, charpentiers, ébénistes alors dans cette raison la forêt jouer un rôle très important Les arbres en général contribuent à la production de bois de toutes sortes. Le bois est considéré comme un matériau important à cette époque en raison de ses nombreuses utilisations dans les domaines de la construction.



Figure 1 : le forêt de l'akfadou à wilaya de Bejaïa, source ( site web LIBERTE QUOTIDIEN NATIONAL D'INFORMATION)

Le bois a répondu à bien des usages au fil des âges : des premiers outils aux armes nécessaires à la chasse, en passant par sa combustion (chauffage et cuisson des aliments) et par son utilisation dans l'habitat des peuples nomades et sédentaires. Il a joué un rôle prépondérant dans la construction jusqu'à la fin du Moyen-âge. Si son utilisation dans la construction a

décliné au profit de l'acier, puis du béton avec les révolutions industrielles, il occupe encore une place importante jusqu'au début du XXe siècle dans l'haussmannien parisien, tant dans la structure que dans le second œuvre (portes, fenêtres, parquets, lambris, escaliers, etc.). De nos jours, le bois, matériau biosourcé, occupe une place majeure dans nos sociétés modernes. Plus encore, la prise de conscience écologique lui confère des vertus jusqu'alors éclipsées. Construction, industrie, énergie, autant de secteurs dans lesquels le bois continue de prospérer.

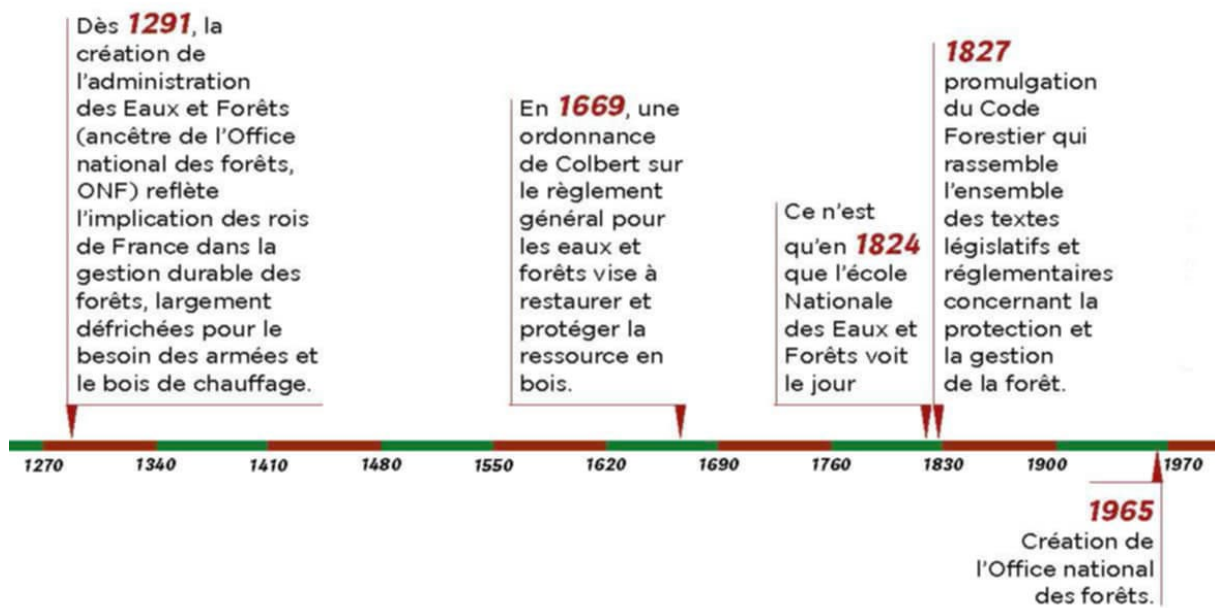


Figure 2 : L'utilisation du bois par l'Homme et les révolutions l'humanité dans toutes les grandes Siècle, Source (site France bois forêt interprofession nationale de la filière forêt bois)

Le bois est l'un des premiers matériaux utilisés par l'homme pour construire des abris, des outils et des infrastructures. Son usage remonte à la préhistoire et a évolué au fil des civilisations, s'adaptant aux besoins et aux avancées technologiques.

## 2.1 Origine de bois ;

Le bois a pour origine l'arbre et le matériau qui nous intéresse le plus particulièrement est celui tiré du tronc. Pris dans son ensemble, le tronc comprend

1. le rhytidome est la partie externe de l'écorce. Il protège l'arbre contre les attaques biologiques (insectes), contre les gelures, contre le dessèchement (coup de soleil) et contre les blessures (chutes de pierres).
2. Le liber est la partie interne de l'écorce. C'est l'appareil conducteur de la sève élaborée (descendante) formée de glucose transformé en amidon. C'est pourquoi une blessure du liber peut freiner ou stopper la croissance de toute une partie de l'arbre

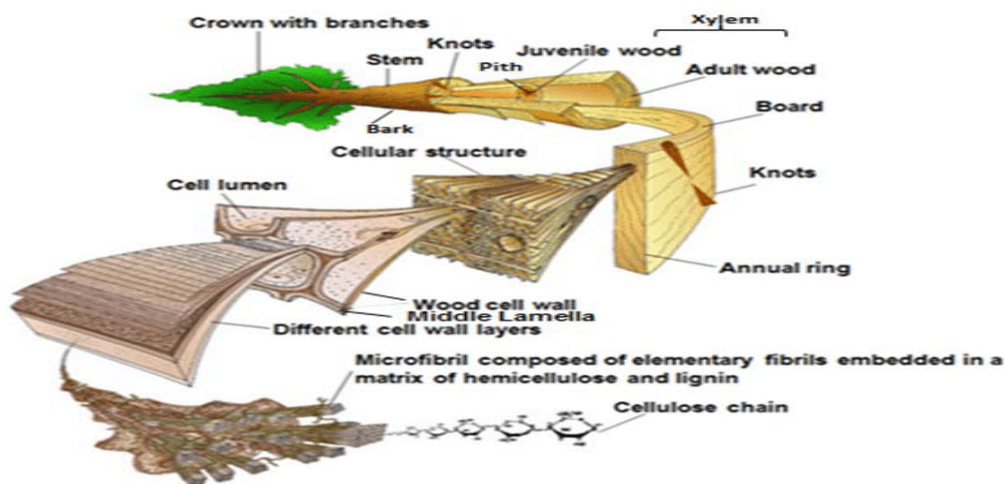


Figure 3 : Différentes échelle d'observation d'un bois de résineux d'après bouslimi (2014), Source,( site web slideplayer )

3. le cambium est le tissu de croissance de l'arbre. Les cellules vivantes du cambium se multiplient par division, croissent jusqu'à leur taille définitive, se rigidifient (croissance des parois cellulaires) et meurent. Ces vaisseaux cessent peu à peu d'alimenter l'arbre après quelques années. Ils se bouchent et s'imprègnent de différentes substances : tanins, résines, etc. La croissance se développe principalement dans trois directions : longitudinale (croissance en

hauteur), radiale vers l'intérieur (xylème, formation du bois) et radiale vers l'extérieur (phloème, formation du liber).

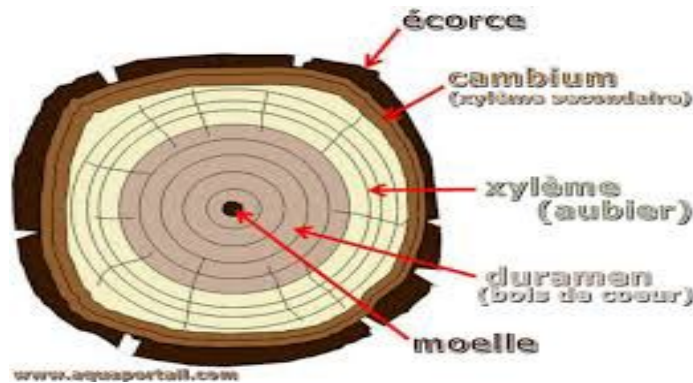


Figure 4 : coupe de tronc d'arbre avec le cambium Source (site assistance scolaire personnalisée)

### 3. Le Bois Dans La Construction

#### 3.1 Définition :

Le bois peut être très largement utilisé dans la construction puisque des ouvrages peuvent être complètement réalisés avec ce matériau. Après de longues années où le béton surtout, mais aussi le métal et le verre, ont été les principaux matériaux de construction, un nouvel engouement ou un retour vers le matériau bois s'opère aujourd'hui. La sensibilité des populations vis-à-vis de l'environnement, les atouts que présente le bois pour la protection de la planète, les qualités de celui-ci, sont vraisemblablement les éléments moteurs, qui font que les ingénieurs en génie civil et les architectes, les maîtres d'ouvrages, les maîtres d'œuvre accordent aujourd'hui une plus grande attention à ce matériau.

De nos jours, le bois est utilisé à tous les stades de l'exécution des ouvrages, notamment sous forme de : Blindage et étaisages des feuilles, coffrage des éléments en béton, réalisation de la charpente et des couvertures, menuiserie (portes, fenêtres) et parquets. Le bois est également très utilisé comme matériel de chantier. On s'en sert comme : échafaudages, plateaux de levage, baraques préfabriquées et palissades pour clôturer les chantiers

Ces multiples utilisations nécessitent de l'utilisateur des connaissances précises sur les diverses essences, les qualités et défauts des bois, leurs modes d'assemblages et leurs conditions d'emplois.

### 3.2 Avantages de l'utilisation du bois dans la construction

Le bois est un matériau de construction très prisé pour de nombreuses raisons. Voici quelques points qui illustrent son utilité dans la construction :

Durabilité	Avec un bon entretien, le bois peut durer des siècles. Les bâtiments en bois datant de plusieurs centaines d'années sont encore debout aujourd'hui
Ecologique	Le bois est une ressource renouvelable. Lorsqu'il est géré de manière durable, il peut être utilisé sans nuire à l'environnement. De plus, il stocke le carbone, aidant à réduire l'empreinte carbone globale d'un bâtiment
Flexibilité et légèreté	Le bois est un matériau léger mais robuste, ce qui facilite son transport et son maniement sur les chantiers. Il peut également être utilisé dans une grande variété de conceptions architecturales grâce à sa flexibilité.
Isolation	Le bois possède d'excellentes propriétés isolantes, gardant les bâtiments chauds en hiver et frais en été. Cela peut se traduire par des économies d'énergie significatives

Tableau 1: tableau exprime les avantages de l'utilisation de bois comme matériau de construction

### 3.3 Les essences de bois :

Se divisent en trois principales catégories : le bois exotique, le bois résineux ou le bois noble et feuillu. En fonction du type de bois, les propriétés divergent et s'adaptent plus facilement à certaines constructions.

Une essence de bois est un type de bois, elle désigne ce que l'on obtient après la coupe d'un arbre. Chaque essence de bois correspond à une famille répondant aux mêmes caractéristiques et comprend une ou plusieurs espèces d'arbres comme l'épicéa, le chêne ou le sipo, par exemple.

On peut distinguer 3 grandes essences de bois :

1. Les bois résineux : des bois tendres et léger et donc facile à travailler
2. Les bois nobles et feuillus : des bois mi-dure et résistant qui s'avèrent un bon entre deux et entre termes de rapport et prix
3. Les bois exotique : des bois durs et lourds et résistants

Ainsi, le bois prend plusieurs formes plus ou moins robustes , souple et esthétiques qui permettent l'identification du bois, ce sont ces propriétés spécifiques qu'il faut connaître pour pouvoir adapter le type de bois à la construction .en effet , on n'utilisera pas la même essence de bois pour faire une charpente ou une terrasse par exemple .de plus ,dans le domaine de la construction , il est courant d'utiliser les origines du bois pour le classer . Ainsi on retrouve deux types de bois principaux : les bois indigènes ou locaux et les bois exotiques ou bois précieux.

### 3.4 La liste des essences de bois :

D'Europe (les feuilles et les résineux)	D'Amérique du Nord (les feuilles et les résineux)	D'Amérique du sud (exotique)	D'Asie (Exotique)	D'Afrique (Tropicaux imputrescible)
-acacia	-cherry	-Amarante	-Bintangor	-Acajou
-alisier	-chêne blanc d'Amérique	-cumaru	-Darkred méranti	-Ayous
-bouleau	-chêne rouge d'Amérique	-curupixa	-Kapur	-Azobè
- charme	-chêne soyeux	-garapa	-Mengkulang	-Badi
-Châtaigner	-westemredcedar	-lpé	-Merabau	- bahia
-chêne	-érable d'Amérique	-Itauba	-Teck	-Bété
- érable	-érablemoucheté	-massaranduba	-Ueat Mata	-Bossé
-frêne	-frêne d'Amérique	-pauamarelo	-Yellow Balau	-bubinga
-hêtre	-hemlock	-tatajuba		-Dibetou
-merisier	-liquidambar	-tauari		-douka
-noyer	-orme gris	-muiracatiara		-Doussié
-cédre				- ébène
-Olivier				
-Sapin				

Tableau 2 : la liste des essences de bois disponible sur le marché source (site WOOD PARTNERS France 2024)

**Remarque :**

- Les essences de bois d'Amérique du Sud sont dites exotique et possèdent une bonne résistance à l'humidité pour la construction

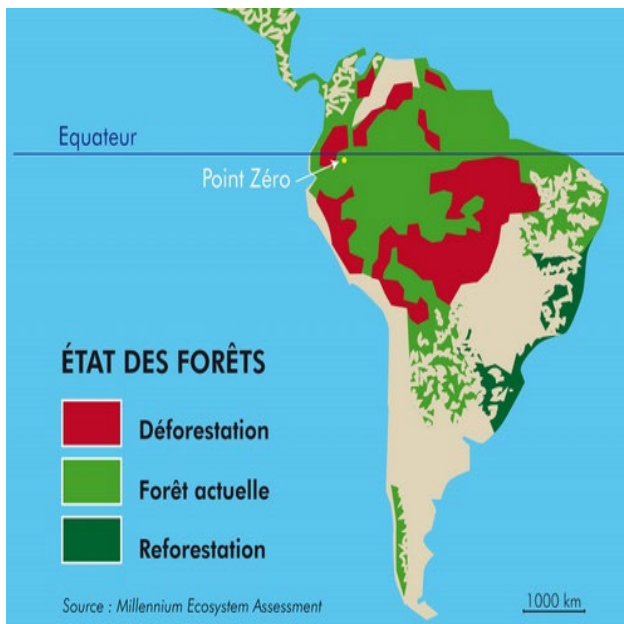


Figure 5 : Carte simple de la défloration en Amazonie source ( site CANALBLOG La forêt de Amazonienne)

- Les essence de bois d'Afrique sont des bois tropicaux imputrescible, régulièrement employé pour l'aménagement extérieur



Figure 6 : Zone éco-végétale Source ( site planeteafrique.free.fr }

### 3.5 Utilisations des essences de bois :

Les essences de bois doivent être adaptées selon leur usage, l'épicéa par exemple un bois solide dense et stable qui sera adapté à la construction d'une maison

	Les essences de bois	Les caractéristique
Les types de bois pour la construction d'une maison	L'épicéa Le pin Le cèdre Le mélèze Le sapin Le douglas	Solide Dense Stable
Les essences de bois pour aménagement l'intérieur	Le chêne Le frêne Le hêtre Le châtaignier Le noyer	Souple Facile à travailler Esthétique
Les essences de bois pour l'extérieur	L'ipé Le padouk L'itauba	Dur Résistant à l'eau

Tableau 3 : Tableau l'utilisation de bois, source (site WOOD PARTNERS 2024 entreprise bois

### 3.6 Les classes de bois

La classe d'emploi d'un bois est déterminée par la norme NF EN 335-1 à 3 selon les risques d'exposition à l'humidité qui exprime le niveau d'exposition auquel le bois sera soumis. Elles sont au nombre de 5 si vous suivez l'actualité du bois. Chaque classe détermine un degré de résistance et de protection soit par durabilité naturelle ou traitement (bois autoclave ; bois thermo chauffé

Il existe 5 classes d'emploi du bois :

<b>CLASSE 1</b>	Bois toujours sec. Humidité inférieure à 20 %	<b>Intérieur uniquement : meuble, parquet, lambris, menuiserie</b>
<b>CLASSE 2</b>	Bois sec, soumis occasionnellement à une humidité supérieure à 20 %	<b>Charpente et ossature correctement ventilées</b>
<b>CLASSE 3</b>	Bois soumis à une humidité fréquemment supérieure à 20 %	<b>Toute pièce de construction ou menuiserie extérieure soumise à la pluie : bardage, fenêtre...</b>
<b>CLASSE 4</b>	Bois soumis à une humidité toujours supérieure à 20 %	<b>Bois horizontal en extérieur et bois en contact avec le sol ou source d'humidification prolongée</b>
<b>CLASSE 5</b>	Bois en contact avec l'eau de mer	<b>Pilier, ponton, bois immergé</b>

Figure 7: tableau exprime les cinq classes d'emploi du bois, Source (site ANOVA BOIS 2025)

### 3.7 Constructions bois en L'Algérie

L'Algérie a une superficie totale de 2,388 millions de km<sup>2</sup>. La ressource forestière recouvre un peu plus de 10% de la surface totale. La localisation des forêts est dans les régions du nord du pays avec un peuplement principalement constitué de résineux. En Algérie, les forêts sont constituées de deux groupes, le premier groupe : les forêts d'intérêt économique (les chênes, les cèdres, le pin maritime, les eucalyptus, l'essence prédominante est le pin d'Alep) et le second groupe sont les forêts de protection des sols (Chêne vert, Thuya...). L'utilisation du bois en Algérie dans la construction est très minime pour ne pas dire inexistante (échafaudage, coffrages). Il est constaté seulement des utilisations secondaires comme la fabrication des ameublements, menuiseries, décoration...etc., malgré que les essences de bois locales puissent être utilisées dans la majorité des produits de bois

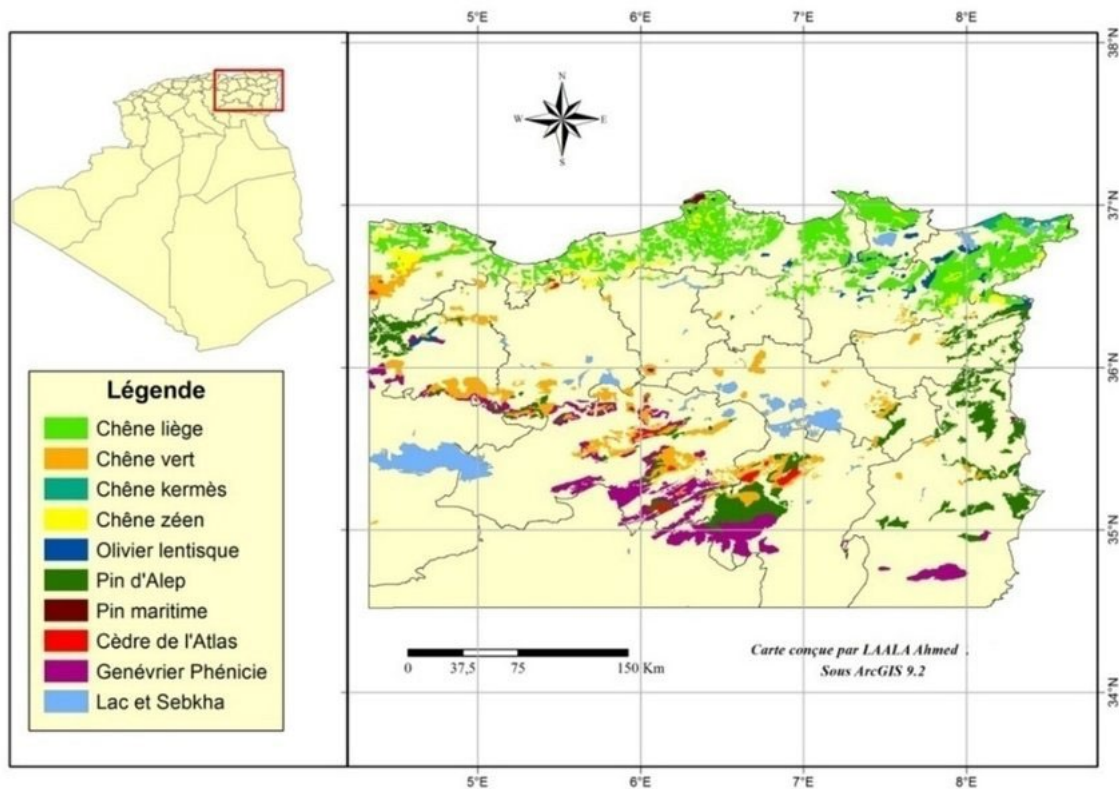


Figure 8 : Principaux écosystèmes forestiers de l'Est Algérien, source ( site 2008-2025 ResearchGate}

### 3.7.1 Le bois disponible en l'Algérie

En Algérie, vous pouvez trouver une variété de types de bois disponibles pour différents usages. Voici quelques exemples courants :

- **Bois de chêne** : Connu pour sa durabilité et sa résistance, il est souvent utilisé pour les meubles et les parquets.
- **Bois de cèdre** : Apprécié pour son parfum agréable et sa résistance aux insectes, il est souvent utilisé pour les armoires et les coffres.
- **Bois de pin** : Léger et facile à travailler, il est couramment utilisé pour les charpentes et les meubles.
- **Bois de hêtre** : Solide et résistant, il est souvent utilisé pour les meubles et les parquets.
- **Bois de teck** : Connu pour sa résistance à l'eau et aux intempéries, il est souvent utilisé pour les meubles d'extérieur et les ponts de bateaux.

### 3.7.2 'importation de bois en L'Algérie pour la construction

L'Algérie importe du bois de plusieurs pays pour répondre à ses besoins en construction. Voici quelques-uns des principaux pays d'importation :

- **Finlande** : Connu pour son bois de pin de haute qualité.
- **Suède** : Fournit également du bois de pin et d'autres types de bois.
- **Canada** : Exporte du bois de construction, notamment du bois de sapin et de pin.
- **Russie** : Fournit divers types de bois, y compris le bois de conifères.
- **États-Unis** : Exporte du bois de chêne et d'autres bois durs.

### 3.7.3 Les zones propices à la construction en bois en L'Algérie

, certaines régions sont particulièrement favorables pour la construction en bois en raison de leurs ressources forestières et de leur climat. Voici quelques-unes de ces régions :

1. **Kabylie** : Cette région est bien arrosée et possède des forêts denses de chêne-liège et de chêne zeen, ce qui en fait une zone idéale pour la construction en bois.
2. **Atlas Tellien** : Comprenant les grands massifs forestiers de pin d'Alep et de chêne vert, cette région est également favorable pour la construction en bois.
3. **Atlas Saharien** : Les massifs de pin d'Alep des Aurès-Nemencha, Hodna, Ouled Nail et Djebel Amour offrent des ressources en bois pour la construction

Les régions bénéficient d'un climat méditerranéen, caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Ce climat est favorable à la croissance des arbres et à la durabilité des constructions en bois.

## 4. Structure anatomique et anisotropie

### 4.1 Anatomique :

#### 4.1.1 Structure Anatomique du Bois à l'échelle macroscopie :

Le bois a pour origine l'arbre et le matériau qui nous intéresse le plus particulièrement est celui tiré du tronc. Au niveau macroscopique, une coupe transversale d'un tronc d'arbre est caractérisée par la présence de « cerne annuels ». Ceux-ci correspondent à l'activité cellulaire en fonction des saisons.

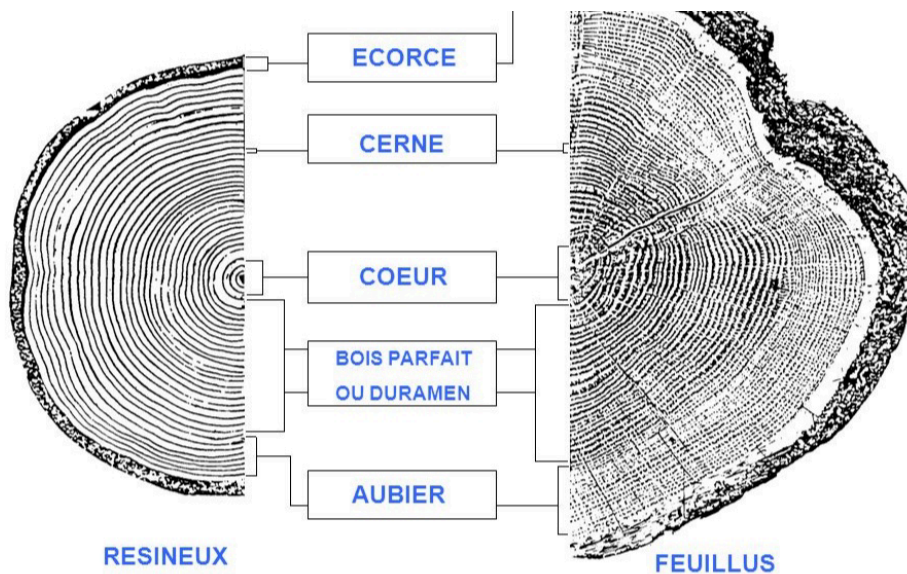


Figure 9 : Structure de bois deux groupe , source (site SlidePlayer.fr 2025} .

**L'aubier** : représente le système conducteur de la nourriture de l'arbre, des racines à la couronne. Il transporte la sève brute (montante), un mélange de sels nutritifs dissous dans l'eau que les racines prélèvent du sol. L'aubier reprend aussi l'effort principal des charges mécaniques (en traction et en compression) dus aux vents, à la neige et au poids propre de la couronne.

**Le bois de cœur** (ou le bois parfait ou duramen) est l'élément de soutien central de l'arbre. En revanche, il ne remplit plus de fonction conductrice des substances nutritives. Le centre du tronc, la moelle, peut, à partir d'un certain âge, être creux.

#### 4.1.2 Structure anatomie de bois à l'échelle microscopique :

Le bois est un tissu végétal fait d'éléments cellulaires différemment agencés d'une essence à une autre, mais selon la taille et la forme des éléments conducteurs, on distingue deux grandes familles : les Gymnospermes (résineux, conifères) et les Angiospermes (feuillus).

La figure (x) représente le plan ligneux d'un résineux, les tissus sont essentiellement formés de cellules allongées de 1 à 4 mm, appelées "trachéides", associées à des canaux résinifères et des rayons médullaires constituées par des cellules de parenchymes.

La figure (x) représente le plan ligneux d'un feuillu, la présence de vaisseaux, tissus de conduction, et la longueur des fibres distinguent le feuillu du résineux

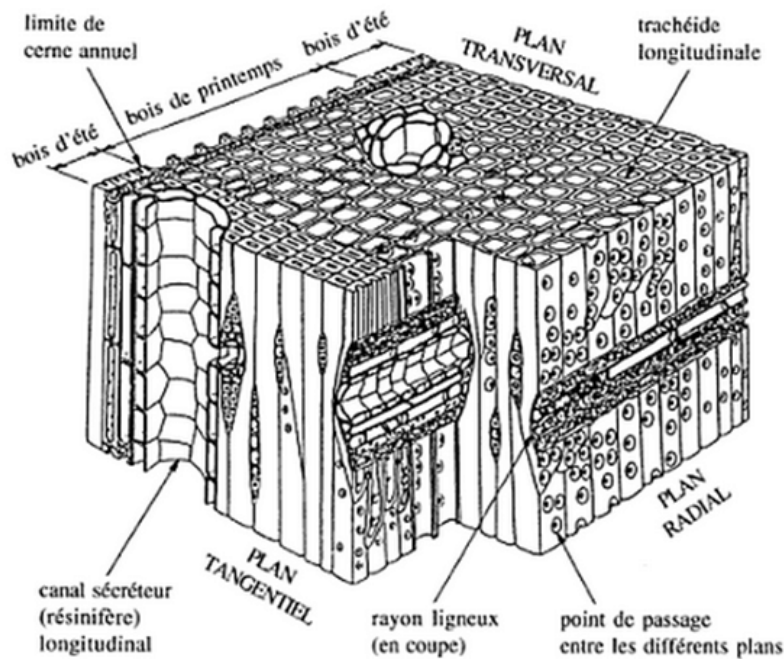


Figure 10: Représentation schématique au niveau microscopique d'un résineux, source ( site ResearchGate GmbH. }.

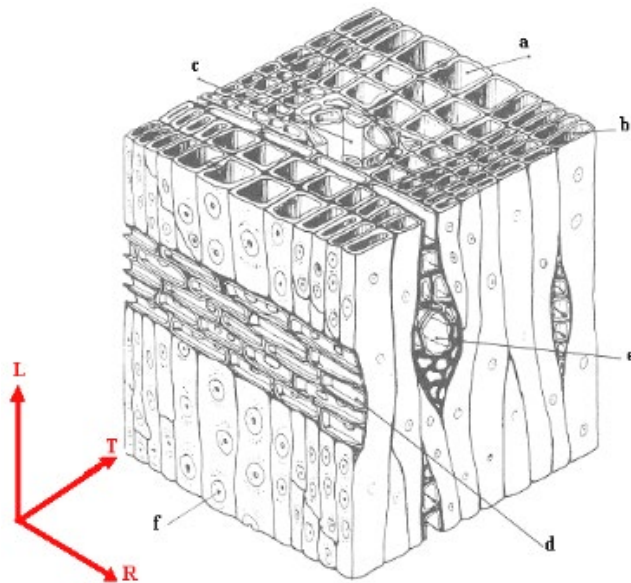


Figure 11 : Plan ligneux d'un feuillu: source ( Robert et Catesson 1999 ,site web ResearchGate )

(1) section transversale, (2) section radiale, (3) section tangentielle, (4) cernes de croissance, (5) bois de printemps, (6) bois d'été, (7) rayons, (8) vaisseaux, (9) perforations [07]

## 4.2. Anisotropie

Le bois est un matériau anisotrope, ce qui signifie que ses propriétés varient selon la direction considérée. Cette anisotropie est due à son organisation cellulaire

### 4.2.1 Directions principales dans le bois

Les propriétés du bois varient selon trois directions :

- Longitudinale (L) : Parallèle aux fibres. C'est la direction la plus résistante mécaniquement.
- Radiale (R) : Perpendiculaire aux cernes de croissance, suivant les rayons médullaires.
- Tangente (T) : Parallèle aux cernes de croissance, elle est la plus sensible aux variations dimensionnelles.

## 4.2.2. Conséquences de l'anisotropie sur les propriétés du bois

<p align="center"><b>Propriétés mécaniques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistance en traction et en compression : Très élevée en direction longitudinale, plus faible en radiale et tangentielle.</li> <li>• Rigidité (module d'élasticité) : Élevée en longitudinal, faible en radial et tangentiell.</li> <li>• Résistance au cisaillement : Plus faible en direction radiale et tangentielle.</li> </ul>
<p align="center"><b>Comportement hygroscopique (Retrait et Gonflement)</b></p>	<p>Le bois est un matériau hygroscopique, capable d'absorber et de libérer de l'humidité, entraînant des variations dimensionnelles.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retrait longitudinal : Très faible (~0,1-0,3 %).</li> <li>• Retrait radial : Moyen (~3-6 %).</li> <li>• Retrait tangentiell : Important (~6-12 %).</li> </ul>
<p align="center"><b>Propriétés thermiques</b></p>	<p>Cette anisotropie du retrait est essentielle dans l'étude du risque de condensation dans les structures en bois, car elle peut entraîner des déformations différentielles et des fissurations</p> <p><b>Conductivité thermique</b> : Faible, mais plus élevée dans le sens longitudinal en raison de l'alignement des fibres.</p> <p>Dilations différentielles dues aux variations d'humidité et de température.</p>

Tableau 4: Tableau exprime Conséquences de l'anisotropie sur les propriétés du bois

## 4.2.3 Importance de ces Propriétés dans la Conception de Structures en Bois

- L'anisotropie du retrait peut provoquer des déformations différentielles favorisant les infiltrations d'eau.
- La structure cellulaire du bois influe sur sa capacité à absorber et libérer l'humidité, ce qui peut impacter la résistance à la condensation.

- Les propriétés thermiques et hygroscopiques du bois doivent être prises en compte dans le choix des matériaux isolants et des traitements de protection contre l'humidité.

## 5. Structure de la paroi cellulaire :

### 5.1. Une spécificité de la cellule végétale :

La paroi cellulaire est une des spécificités de la cellule végétale par rapport à la cellule animale, avec la vacuole et les chloroplastes.

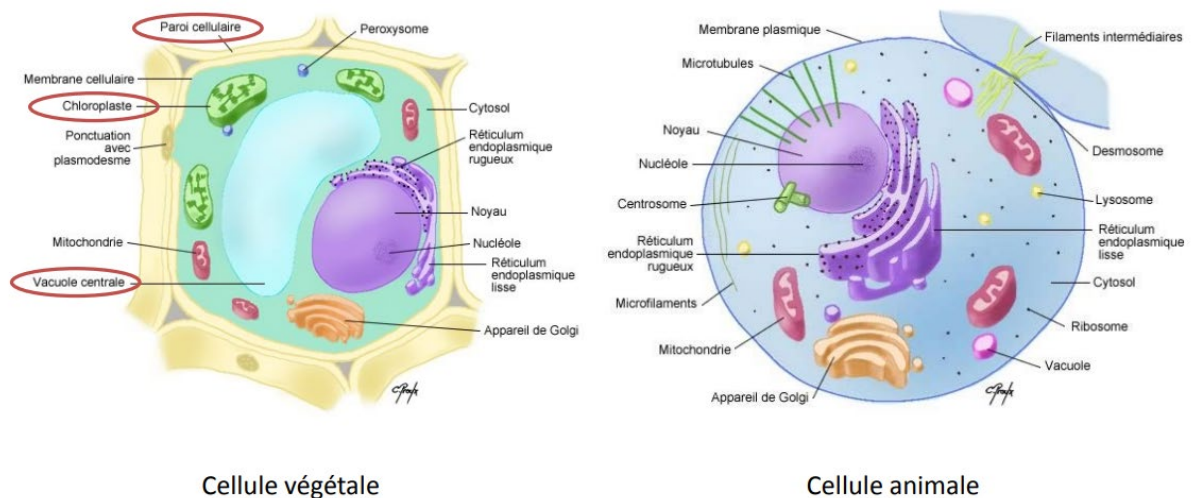


Figure 12 : la paroi cellulaire végétale de bois, source (document de recherche université de lorraine mémoire fin d'étude)

### 5.2 Structure multicouche des parois cellulaires

Les cellules du bois sont des structures stratifiées creuses, composées d'une paroi primaire à l'extérieur, d'une paroi secondaire et d'une lumière à l'intérieur. Chaque couche contient des micro fibrilles de cellulose orientées, ainsi que des hémicelluloses et de la lignine. L'orientation du micro fibrilles affecte la résistance ultime du tissu. La paroi primaire (P) est très fine et contient des micro fibrilles orientées aléatoirement, entourées d'une substance riche en lignine, contenant de faibles quantités de cellulose, d'hémicelluloses, de pectines et de glycoprotéines structurales. La cellule secondaire présente des couches visuellement distinctes par leurs différentes orientations micro fibrillaires ; de la paroi primaire vers la lumière, les couches sont désignées séquentiellement par S. Schéma

généralisé d'une paroi cellulaire ligneuse, basé sur les trachéides du bois final du pin des marais

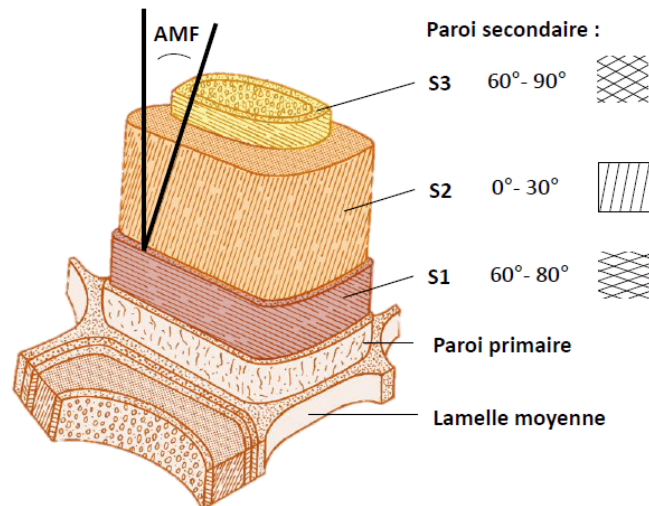


Figure 13 : Décomposition de la paroi cellulaire du bois, source (document de recherche université de lorraine mémoire fin d'étude)

## 6. Comportement hygroscopie :

### 6.1. L'eau dans le bois ;

A l'état vivant, le bois contient de très grandes quantités d'eau. Le peuplier, par exemple, peut contenir plus de 200 % d'eau ! Cela signifie que si sa masse volumique à l'état totalement sec est de 400 kg, il peut peser, à l'état humide, près de 1200 kg ! En passant de l'état vert à un état sec, de grandes quantités d'eau peuvent ainsi être extraites.

Telle une éponge, le bois tend à se mettre en équilibre avec l'humidité relative de l'air ambiant. Si le contenu en humidité de l'air est contrôlé dans une certaine limite (fonction de l'utilisation), les problèmes majeurs de variations dimensionnelles sont évités. Dès lors, le taux d'humidité du bois mis en œuvre doit être le plus proche possible du taux d'humidité moyen d'équilibre avec son environnement.

La teneur en eau du bois, mais également le poids, les dimensions, les propriétés mécaniques et la durabilité varient avec l'humidité relative de l'air. Le graphique suivant exprime cette

relation entre la température, l'humidité relative de l'air et le taux d'humidité d'équilibre du bois.

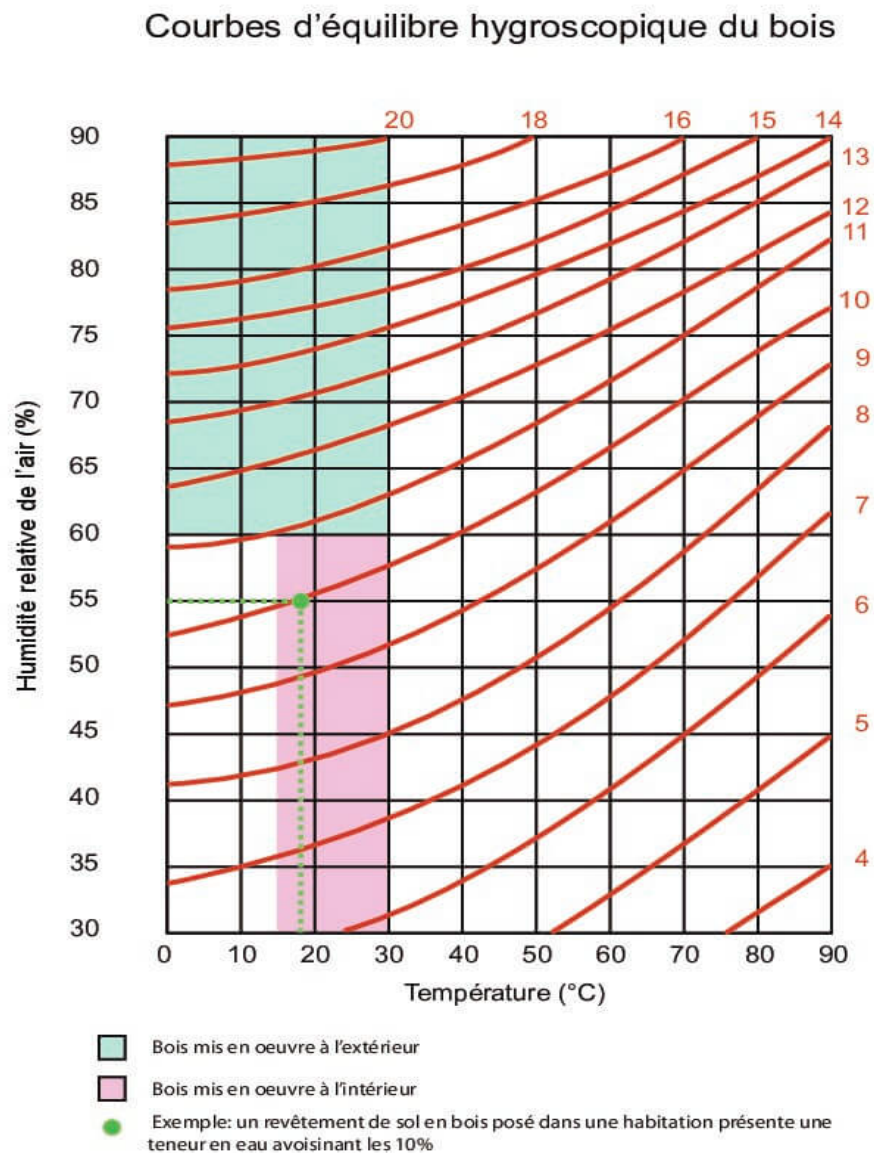


Figure 14; Courbe d'équilibre hygroscopique de bois, source (site web HoutInfoBois 2025).

La teneur en eau du bois ou taux hygroscopique ou taux d'humidité s'exprime en % :

$$\text{Taux d'humidité du bois} = ((m_b - m_0) / m_0) \times 100$$

$m_b$  = la masse à l'état humide,

$m_0$  = la masse à l'état anhydre.

Les courbes d'évolution de la variation de volume ( $\Delta V$ ) en fonction de la teneur en eau  $h$  est relativement linéaire jusqu'à 30 % d'humidité du bois. Il s'agit d'un taux moyen, il varie en fait selon l'espèce de bois mais oscille autour de cette valeur. Au-delà de 30%, il n'y a plus aucun changement de volume du bois. Le taux d'humidité au-delà duquel le bois ne gonflera plus ou en-deçà duquel il rétrécira s'appelle le point de saturation des fibres (PSF).

Les variations dimensionnelles du bois sont donc principalement liées à la perte (rétrécissement) ou à la reprise (gonflement) d'eau tant que le taux d'humidité du bois reste inférieur au PSF.

Il est important de noter que les dimensions de sciages commerciaux sont habituellement données à l'état vert, même si le bois est séché et a donc déjà subi un retrait. L'utilisateur doit donc toujours prévoir une surdimensionnement pour compenser d'une part le retrait dû au séchage et d'autre part, les pertes éventuelles occasionnées par un rabotage.

#### 6.1.1 .Le séchage à l'air

L'objectif du séchage à l'air est d'évacuer de l'eau du bois en consommant le moins d'énergie possible. Ce type de séchage est par contre relativement lent. En outre, il est moins bien contrôlé et en période particulièrement sèche, les risques de fissures et de déformations sont réels.

Le plus souvent, il permet d'amener les bois d'un état humide à un taux d'humidité se situant entre 15 et 20%, rarement en dessous. Lorsqu'on veut amener les bois à un taux d'humidité inférieur, il faut recourir à un séchage artificiel.

● Les humidités moyennes idéales d'équilibre dans la construction :

- Bois de structure  $\leq 20\%$
- Bardage extérieur  $\pm 14\%$
- Terrasse extérieure 14 à 18%
- Mobilier – Parquet – plancher – escalier intérieurs 7 à 11%
- Afin de déterminer le taux d'humidité d'équilibre du bois en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air, nous vous proposons le module de calcul suivant :

## 6.2. Phénomène d'hystérésis :

### 6.2.1 Introduction :

L'hystérésis de sorption est un phénomène bien connu pour le bois. Dans ce contexte, l'hystérésis signifie que la teneur en humidité à l'équilibre (THE) est différente dans les processus de désorption et d'adsorption. Cependant, lorsque des isothermes de sorption quantitatives sont présentées dans la littérature (notamment dans des manuels tels qu'Anon 1999 ou Babiak 2007), une seule courbe est généralement donnée : la moyenne (AvEMC) des courbes de désorption (DeEMC) et d'adsorption (AbEMC). Il existe relativement peu d'expressions analytiques pour le bois (couvrant une large plage de températures) pour les courbes DeEMC et AbEMC séparément (Hartley et Avramidis 2002, Krupinska et al. 2007). C'est peut-être pour cette raison que de nombreux modèles de simulation de séchage sont basés sur les courbes AvEMC pour différentes températures. Cela introduit une erreur dans les modèles, qui a été partiellement corrigée par l'introduction de facteurs de correction.

Dans ce qui suit, nous démontrerons d'abord que négliger le phénomène d'hystérésis de sorption dans les modèles peut avoir un impact substantiel sur leurs prédictions. Nous soulignerons ensuite certains des principaux problèmes et nouveautés liés à l'introduction de l'hystérésis dans la modélisation. Enfin, nous discuterons de certaines solutions à ces problèmes.

### 6.2.2 L'importante de phénomène de L'hystérésis en modélisation :

L'interaction entre un morceau de bois et le climat environnant (température et humidité de l'air) est l'un des deux principaux éléments de tous les modèles de séchage. L'autre élément est la migration de l'humidité à l'intérieur du bois. L'interaction externe comprend le transfert de chaleur (énergie) et d'humidité (masse) vers et depuis la surface du bois. Les transferts de chaleur et de masse sont exprimés par les équations suivantes (Salin 2007).

$$\phi / A = \alpha(T_{\infty} - T_s) \quad (1)$$

$$m / A = \beta(c_s - c_{\infty}) \quad (2)$$

$\phi/A$  = Flux de chaleur par unité de surface (W/m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = Coefficient de transfert thermique (W/m<sup>2</sup>/K)

$T_{\infty}, T_s$  = Température de l'air ambiant et de la surface du bois (K)

$m/A$  = Flux d'humidité par unité de surface ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ )

$\beta$  = Coefficient de transfert de masse (m/s)

$C_{\infty}, C_s$  = Concentration de vapeur d'eau de l'air ambiant et en équilibre avec la surface du bois ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

La concentration de vapeur est utilisée comme force motrice dans l'équation 2, mais on peut se demander si la pression partielle serait un meilleur choix. Le terme  $c_s$  donne le lien entre la teneur en humidité de surface (TM) et la concentration de vapeur dans l'air en équilibre avec la surface via la courbe de sorption. Pour un procédé de séchage, la courbe DeEMC doit être utilisée pour déterminer ce lien.

Comme le transfert de chaleur et d'humidité se fait à travers la même couche limite côté air, il semble raisonnable d'envisager un couplage entre les coefficients de transfert  $\alpha$  et  $\beta$ . C'est ce que l'on appelle l'analogie entre transfert de chaleur et de masse, qui, avec une bonne approximation, peut s'exprimer comme suit :

$$\alpha / \beta = C_p \rho \quad (3)$$

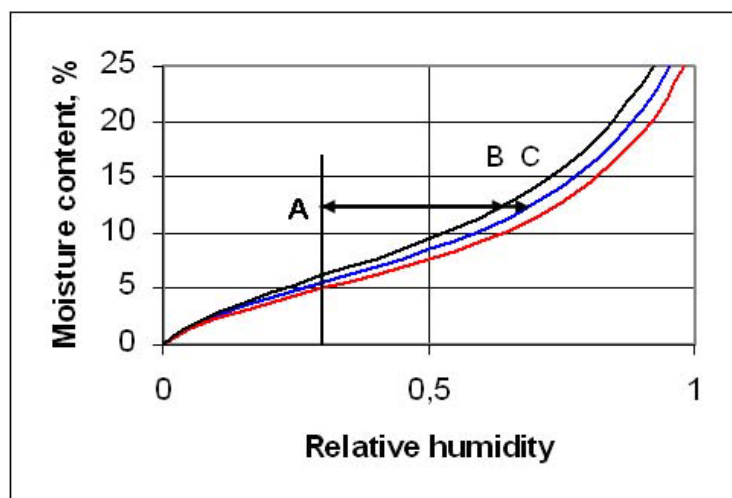


Figure 15 : Exemple de processus de séchage dans un diagramme de sorption

Où A représente l'humidité relative de l'air et B l'humidité relative en équilibre avec la teneur en eau de la surface du bois. Dans les modèles, l'humidité relative déterminée par la courbe de sorption moyenne (C) est cependant souvent utilisée. Les courbes sont, de haut en bas, les courbes de désorption (DeEMC), de moyenne (AvEMC) et d'adsorption (AbEMC).

### 6.2.3 Absorption de l'eau par le bois :

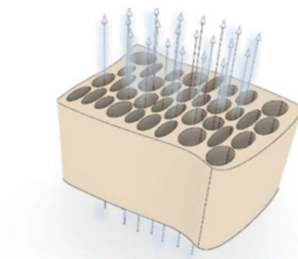
#### 1. Phénomène d'absorption

Le bois est un matériau organique, constitué de cellules de formes et de tailles différentes, qui présentent des lacunes et des vides. C'est dans ces cavités que l'eau peut pénétrer dans le bois lorsqu'elle se met en contact avec celui-ci, et ce de plusieurs façons :

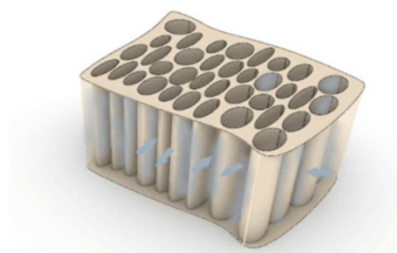
- Par capillarité : l'eau liquide se propage dans les lacunes des cellules :



- L'évaporation : l'eau sous forme de vapeur peut circuler à travers les cavités cellulaires



Par diffusion moléculaire : des échanges ont lieu au niveau microscopique au niveau de la membrane cellulaire



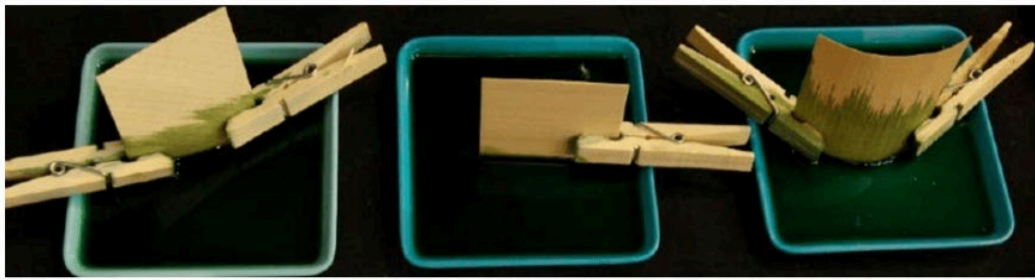


Figure 16 : Mise en évidence expérimentale de la remontée d'eau par capillarité dans les fibres du bois (source : Amaco, Université de Lyon 1)

L'abaque ci-dessus fournit le taux d'humidité du bois en fonction de la température et de l'humidité relative RH de l'air. Pour un RH de 50% et une température de 22°C, l'humidité du bois est de 9.5%.

## 2. Point de rosée et diagramme de Mollier

Le point de rosée est la température à laquelle l'air doit être refroidi pour que la vapeur d'eau qu'il contient se condense en rosée ou givre. Cela induit des gonflements possibles du bois ; D'où l'importance d'assurer aux murs en bois un bon revêtement isolant, bloquant moisissures et détériorations.

Le diagramme de Mollier permet de déterminer la température de rosée en fonction de la température de l'air et du taux d'humidité relative. A 20° et 50% d'humidité relative, soit 7g d'eau par kilo d'air sec on voit qu'une chute de température de 11° aboutit au point de rosée ou température de 9° ( $9 + 11 = 20$ ).

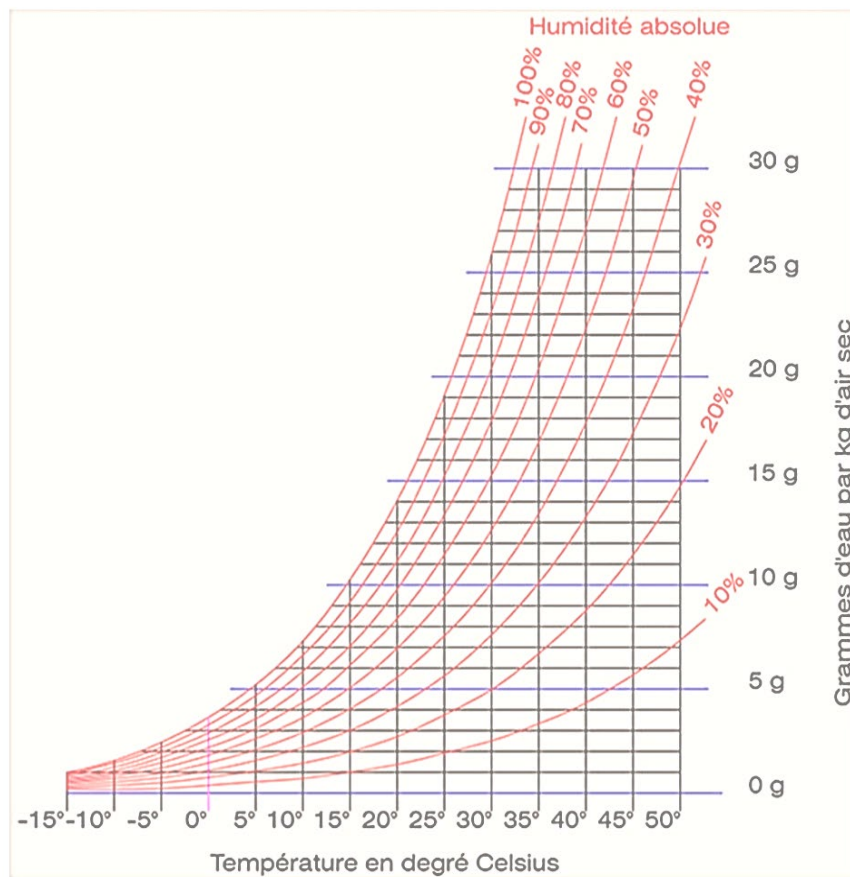


Figure 17 : Diagramme Le diagramme de Mollier, source (site MATERIAUTEQUE 2021)

## 7. Point de saturation des fibres :

### 7.1 L'humidité :

L'humidité s'exprime en pourcentage de deux façons :

- L'humidité sur masse brute ou humidité relative : utilisée pour le bois de chauffage, elle est le rapport de la masse d'eau contenue, à la masse du bois humide ;
- L'humidité sur masse sèche ou anhydre : utilisée dans tout autre secteur, elle est le rapport de la masse d'eau contenue, à la masse du bois séché en séchoir

Type de bois	Teneur d'eau	
	Aubier	Duramen
Résineux	150 à 200 %	40 à 80 %
Feuillus	80 à 120 %	60 à 100 %

Tableau 5 : tableau présente teneur de eau de l' aubier et du duramen des feuillus et résineux ( perré Bade 2006)

## 7.2 Régulation de l'humidité du bois :

La régulation de l'humidité du bois se fait grâce à sa porosité qui lui confère naturellement des propriétés de perspirante. L'air et la vapeur d'eau peuvent donc circuler à travers ses fibres. Cette structure interne, combinée à ses propriétés hygroscopiques, permet au bois de jouer un rôle de régulateur de l'humidité et de la température dans une pièce. Cette caractéristique est de plus en plus vue comme un facteur de confort dans la construction bois.

## 7.3 Hygrométrie :

Il est aussi un bon régulateur **hygrométrique** : en effet, si pour le bois sec, le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau  $\mu$  est de l'ordre de 400, pour un bois saturé en eau cette valeur tombe à 10. En d'autres termes, lorsque le  $\mu$  d'un matériau vaut 5 cela signifie que l'eau traverse 5 fois plus difficilement ce matériau que l'air dont le  $\mu$  est 1. Comme le bois n'est jamais utilisé complètement sec ni jamais complètement vert, mais à un taux d'humidité intermédiaire (environ 25%-30%), son coefficient  $\mu$  sera compris entre ces valeurs.

De fait, il permet de compenser un taux d'humidité trop important ou trop faible, dans des proportions raisonnables, et d'apporter un confort supplémentaire aux usagers du bâtiment.

Essence	$\mu$ (bois sec)	$\mu$ (bois humide)
Saule, bouleau, hêtre tendre	120	18
chêne, hêtre, frêne, noyer	370	40
pin, épicéa	370	9
Sapin	120	18

Tableau 6 : tableau exprime le taux d'humidité de quelque essence de bois

#### 7.4 Calcul de la teneur d'humidité

La teneur en humidité (TH) est généralement exprimée en pourcentage et peut être calculée à partir de la formule

$$TH = \frac{m_e}{m_s} \times 100$$

Où  $m_e$  la masse d'eau dans le bois et  $m_s$  la masse de bois anhydre

Sur le plans opérationnel le teneur de l'humidité de morceau bois donné peut être calcule en formule :

$$TH = \frac{m_H - m_s}{m_s} \times 100$$

Où  $m_h$  la masse de spécimen de teneur en humidité donnée

#### 7.5 .Humidité le bois de constructions :

Le bois est hygroscopique c'est-à dire qu'il gagne ou perd de l'humidité en fonction des conditions du milieu environnant. L'échange d'humidité entre le bois et l'air dépend de l'humidité relative et de la température de l'air et de la quantité d'eau dans le bois. En climat tempéré l'humidité du bois varie autour de 7 %-8 % en hiver dans des pièces chauffées, et 19 %-20 % à l'extérieur avec des humidités relatives de 80 %. En gagnant ou perdant de l'humidité, le bois se dilate ou se contracte, ce qu'on appelle aussi le travail du bois ou jeu du bois<sup>25</sup>, qui est responsable d'éventuels désordres dans la mise en œuvre du bois ou dans le comportement du bois ouvré. Le bois qui, n'est pas bien sec et est exposé à l'air, ou celui qui est trop sec et est exposé dans des lieux humides

La plupart des problèmes liés au bois employé comme matériau de construction sont des problèmes d'humidité. Peinture écaillée, pourriture, gauchissement, fissures et retrait en général sont tous liés à l'eau associée au bois. Le bois ne rétrécit et ne gonfle que sous son point de saturation des fibres, qui est d'environ 28 % d'humidité. Le bois rétrécit et gonfle au contact de l'eau liquide et de l'humidité relative.

La résistance mécanique du bois s'améliore avec le séchage, particulièrement lorsque l'humidité descend en dessous du point de saturation des fibres. La résistance à la traction du bois est à son maximum à un taux d'humidité allant de 6 à 12 %. Dans les dimensionnements des structures en bois, on prend donc en compte le taux d'humidité du bois.

## 7.6. Retrait et déformations du bois face à l'eau.

### 7.6.1. Retrait anisotrope

Comme le bois n'est pas un matériau isotrope, les retraits et gonflements dus aux variations hygrométriques sont différents selon la direction (radiale, tangentielle et axiale).

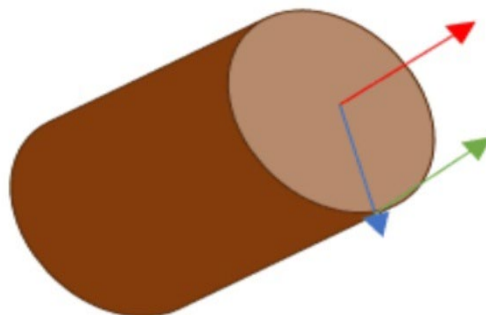


Figure 18 : schéma exprime phénomène de retrait, source (site MATRIAUTEQIE 2021)

Dans la direction tangentielle aux anneaux, le bois peut se rétracter ou se dilater de 8% ; là où dans la direction radiale il ne peut se rétracter ou se dilater que de 4%. Dans la direction du fil du bois, il ne peut se rétracter que très peu, de 0,2 à 0,5%. Ces valeurs sont d'autant plus faibles que l'on atteint le cœur du bois, où le séchage est plus difficile. De plus, plus le bois est dense, plus les phénomènes de retrait et de gonflement sont importants.

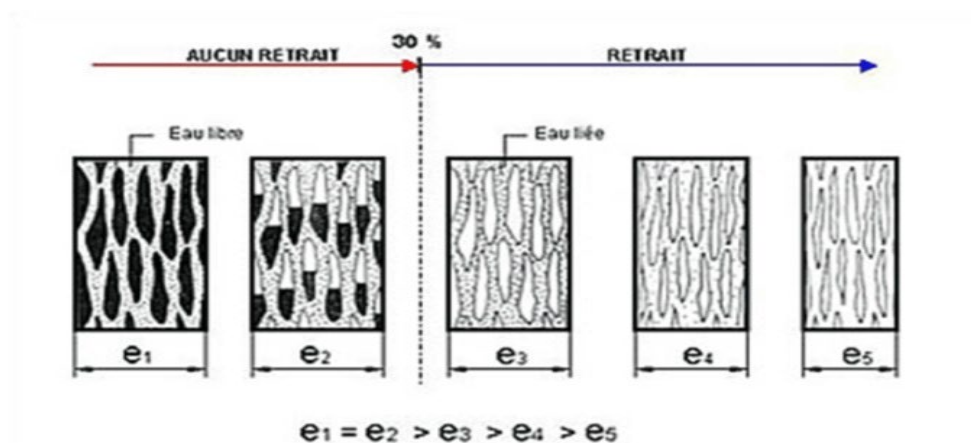


Figure 19 : Retrait du bois (source : CNDB – Anatomie du bois), source (site ATRIAUTEQUE 2021 )

#### 7.6.2. Conséquences du retrait et de la dilatation de l'eau dans le bois

Ces phénomènes de retrait et de gonflement du bois sont à surveiller et à limiter dans la mesure du possible. Les conséquences peuvent s'avérer grave car ils provoquent des désordres structurels potentiellement importants. En effet, en séchant, le bois peut se tordre, ce qui peut causer des tassements dans certaines structures porteuses de bâtiments.

On parle de retrait lorsque, du fait d'une diminution du taux d'humidité (en séchant), les dimensions d'une pièce de bois diminuent. Ces diminutions n'ont pas la même amplitude dans toutes les directions, ce qui peut occasionner des déformations des pièces.

On parle de gonflement quand, à l'inverse, du fait d'une augmentation du taux d'humidité, les dimensions d'une pièce de bois augmentent. Cette déformation ne se fait pas forcément de manière homogène. Cela peut également être à l'origine de déformation des pièces.

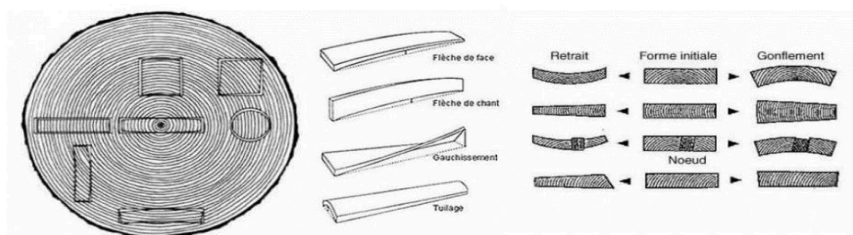


Figure 20 : Déformations liées au retrait anisotrope du bois (source : Wikibois)

Il est donc important de faire sécher ou de réhydrater le bois progressivement (plusieurs jours) pour limiter ces déformations ou d'autres désordres. En effet, un séchage trop important ou trop brutal peut être à l'origine de fissures, inesthétiques et préjudiciables à l'ensemble de la structure ; car elles rendent les matériaux vulnérables aux concentrations de contraintes.

## 8. Variation dimensionnelle :

### 8.1 Le travail du bois :

Le bois a des propriétés anisotropiques c'est-à-dire qu'elles sont différentes selon la direction dans laquelle le bois est sollicité.

Il séchera 10 à 15 fois plus vite longitudinalement que radialement ou tangentiellement. Pour sa part, le séchage radial est un peu plus rapide que le séchage tangentiel. Cela signifie qu'un débit sur dosse séchera plus vite qu'un débit sur quartier.

En outre, l'aubier sèche plus vite que le duramen. Dans ce dernier, des extraits chimiques spécifiques empêchent, ralentissent les mouvements de l'eau.

Le retrait dans le sens longitudinal, c'est-à-dire dans le sens des fibres, est négligeable. L'épaisseur des parois cellulaires varie avec l'humidité alors que la longueur des fibres reste relativement stable. En revanche, le retrait est significatif dans les sens radial et tangentiel. Le retrait radial  $R_r$  est toujours inférieur au retrait tangentiel  $R_t$ . Les relations moyennes entre le retrait longitudinal, le retrait radial et le retrait tangentiel sont approximativement de 1 :10 :20. Le travail du bois résulte des variations directionnelles liées aux changements d'humidité.

- La formule suivante permet le calcul de la variation dimensionnelle qui suit un changement d'humidité :

$$\Delta L = (\alpha \times \Delta h \times L) / 100$$

$\Delta L$  = accroissement ou diminution de longueur due au changement de teneur en eau du bois

$\alpha$  = Coefficient spécifique de retrait et de gonflement (valeur pour une variation de 1% de la teneur en eau sous le PSF)

$\Delta h$  = variation de la teneur en eau en %

$L$  = dimension du bois dans la direction considérée avant le changement de la teneur en eau  $w$

La notion de stabilité dimensionnelle ne doit pas être confondue avec la nervosité du bois. Cette dernière notion est complexe et non encore quantifiable. Elle dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- l'importance et le rapport des retraits (radial et tangentiel). Au plus le rapport s'éloigne de l'unité, au plus la nervosité sera importante;
- la vitesse de circulation de l'eau dans le bois. Au plus l'eau circulera rapidement, au plus elle induira des tensions dans le bois car les gradients d'humidité seront importants;
- la régularité de la texture. Une texture régulière induira une plus faible nervosité du bois;
- la direction et la rectitude du fil. Un fil droit et rectiligne engendrera moins de nervosité;
- la proportion de bois de réaction. Au plus elle est importante, au plus le retrait sera élevé;
- les contraintes internes (croissance et séchage). Au plus elles sont élevées, au moins le bois sera stable.

## **8.2. Estimations de travail d'une pièce de bois**

Le programme ci-dessous vous permettra d'estimer l'importance du gonflement ou du rétrécissement d'une pièce de bois sous l'effet de la reprise ou de la perte d'humidité. Au préalable vous devrez bien observer, sur la section transversale de la pièce, quelle est l'orientation des cernes d'accroissement.

Le programme ne se base que sur deux possibilités : soit tangentielle (cas le plus fréquent) :

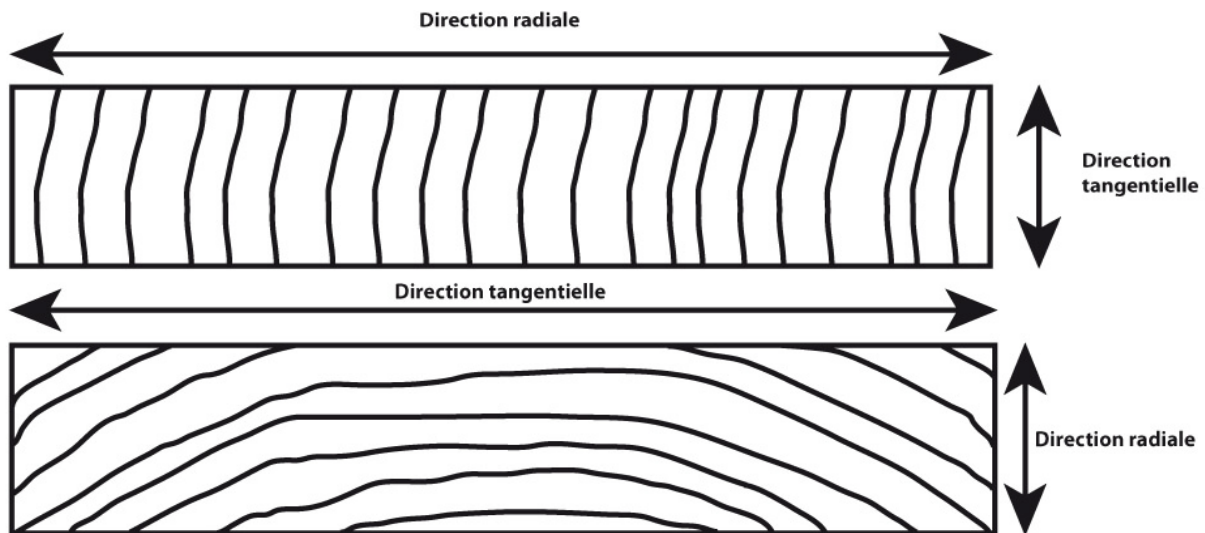


Figure 21 : Variations dimensionnelles d'une pièce de bois, source (site © HoutInfoBois 2025)

Le plus souvent, la réalité se situe entre les deux valeurs obtenues dans chacun des cas étant donné que les accroissements d'une planche ne sont jamais parfaitement orientés transversalement ou tangentielllement.

## 9. Propriétés microscopique pour le couplage hygro-mécanique

### 9.1 Propriétés hydriques :

Le bois est un matériau vivant qui réagit à l'eau et aux variations du taux d'humidité de l'air ambiant. Cette capacité du bois à absorber ou à libérer une certaine quantité d'eau selon la température et l'humidité relative de l'air est appelée hygroscopicité et constitue une caractéristique majeure de ce matériau.

- La teneur en humidité du bois
- Le retrait et le gonflement
- Reconnaître les signes de dégradation fongique
- L'humidité à l'intérieur du bâtiment
- L'humidité à l'extérieur du bâtiment

#### 9.1.1 La teneur en humidité du bois

La teneur en humidité est le rapport exprimé en pourcentage de la masse de l'eau présente dans le bois sur la masse du bois anhydre (sec). Le bois est dit « vert » ou « humide » quand sa teneur en humidité est supérieure à 19 % et « sec » lorsqu'elle est inférieure.

## 9.2. Propriétés mécanique :

Le bois est un matériau possédant une structure interne particulière. Les cellules sont en effet toutes orientées verticalement et parallèlement dans les parois cellulaires, permettant ainsi aux arbres de résister à des forces extérieures comme le vent. Cette caractéristique fait du bois un matériau possédant une meilleure résistance dans la direction parallèle au fil (longitudinalement) que dans la direction perpendiculaire à celui-ci (radialement et tangentielllement).

- Résistances
- Astuces de construction

### 9.2.1 Résistances

#### 1. Flexion :

Selon des principes de base d'ingénierie, un couple de flexion est le résultat d'efforts de compression et/ou de traction excentriques par rapport à l'axe neutre d'un élément. Puisqu'il résiste très bien à la compression et à la tension axiale, le bois est donc également efficace en flexion.

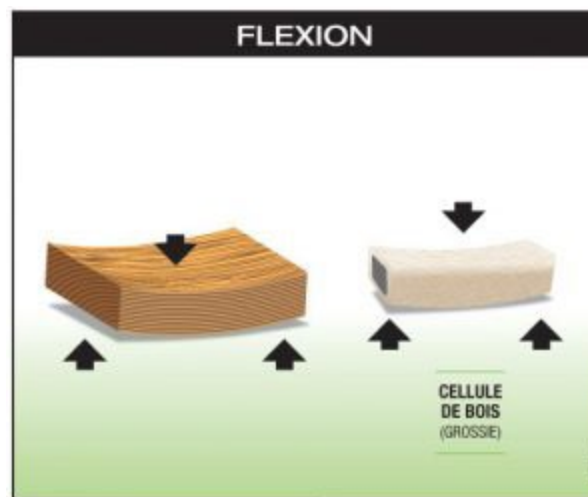


Figure 22 : exemple, la résistance en flexion d'une pièce de bois de charpente légère du groupe, source (site web cecobois 2025)

À titre d'exemple, la résistance en flexion d'une pièce de bois de charpente légère du groupe d'essence EPS n° 1/n° 2 est de 11,8 MPa tandis qu'un bois classé MSR 2100Fb-1.8E possède une résistance en flexion de 30,4 MPa. Les bois d'ingénierie structuraux tels que les bois de charpente composites (LVL, PSL et LSL) possèdent des résistances en flexion grandement supérieures au bois de sciage traditionnel et peuvent aller de 20 à 35 MPa.

## 2. Cisaillement

Le cisaillement longitudinal est un autre aspect à considérer au moment des calculs de résistance d'un élément en bois. La réduction de l'aire transversale d'une section en bois causée par des ouvertures pour les connecteurs ou par des entailles influence la résistance au cisaillement.



Figure 23: La résistance en cisaillement d'une pièce de bois, source ( site web cecobois 2025)

La résistance en cisaillement d'une pièce de bois de charpente légère du groupe d'essence EPS n° 1/n° 2 est de 1,5 MPa tandis que les bois d'ingénierie structuraux, tels que les bois de charpente composites (LVL, PSL et LSL), peuvent atteindre des résistances en cisaillement allant de 2,8 à 3,65 MPa.

## 3. Compression et traction parallèle au fil (grain)

Puisque les cellules du bois sont toutes orientées dans le sens longitudinal, la structure interne du bois est comparable à une multitude de petits tubes soudés les uns aux autres. Cela fait en sorte que le bois est très résistant à la compression exercée dans le sens du fil (compression axiale). On doit cependant tenir compte du flambement au cours du calcul de la résistance à la compression d'éléments porteur

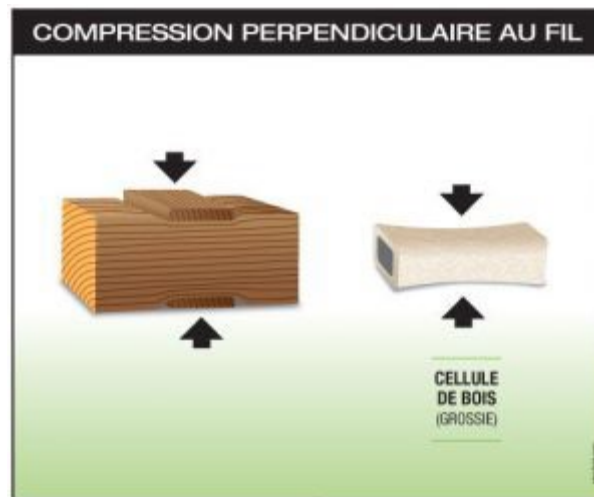


Figure 24 : compression d'une pièce de bois , source ( site web cecobois 2025 )

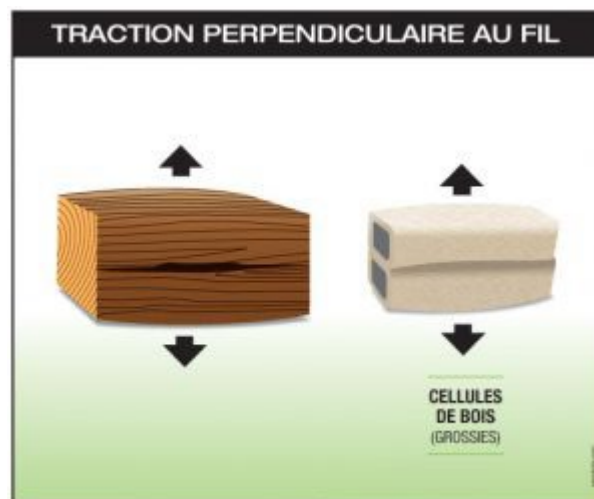


Figure 25 : traction d'une pièce de bois, source ( site web cecobois 2025 )

La traction exercée perpendiculairement au fil doit être le plus souvent possible limitée car le bois possède très peu de résistance dans cette direction. Un effort radial exercé dans un élément courbé tel qu'une arche peut provoquer ce genre de sollicitation indésirable.

#### 4. Compression oblique

La résistance relative à la compression oblique exercée est un rapport entre la compression parallèle au fil et la compression perpendiculaire au fil. La norme de calcul des charpentes en bois décrit la relation pour une résistance en compression oblique selon l'angle d'application de la charge.

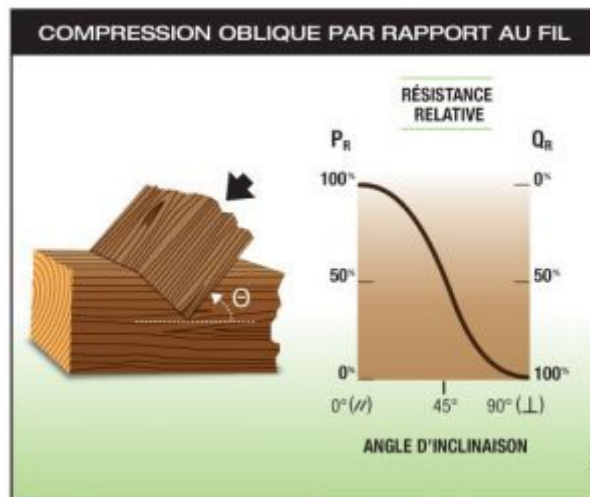


Figure 26 : compression oblique d'une pièce de bois , source ( site web cecobois 2025 )

### 9.3 Propriétés physique :

#### 9.3.1 Densité ou masse volumique :

La densité du bois, que l'on devrait plutôt appeler masse volumique, est le rapport entre la masse du bois et son volume. On distingue :

- La densité absolue peu utilisée, qui est la densité de la masse ligneuse anhydre (bois réduit en poudre et aggloméré), indépendante de l'essence,  $\rho = 1530 \text{ kg.m}^{-3}$  (densité : 1,53) ;
- La densité du bois sec à l'air, que l'on appelle « densité du bois », est le rapport entre la masse et le volume de l'échantillon conditionné à environ 12 p.100 de taux d'humidité ;
- L'infra densité du bois, rapport entre la masse et le volume saturé en eau ou « volume vert » de l'échantillon. –

La densité, qui caractérise la masse du bois par rapport à son volume, est fortement corrélée à la dureté du bois, qui caractérise la résistance du bois à la pénétration d'un élément métallique. Elles varient beaucoup d'une essence à l'autre. Ensemble, ces deux caractéristiques permettent de le classer comme «léger et tendre», «mi-lourd et mi-dur», «lourd et dur».

Types de bois	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Dureté (mm-1)	Essences
Très légers et très tendres	<450	<1.25	balsa, red cedar, peuplier, okoumé
Légers et tendres	450 – 550	1.25 – 2.5	sapin, épicéa, douglas, framiré, bouleau
mi-lourds et mi durs	550 – 700	2.5 – 5	châtaignier, sipo, mélèze,
lourds et durs	700 – 850	5 – 9	chêne, padouk, charme, doussié, if
très lourds et très durs	> 850	> 9	ébène, ipé, azobé, gaiac

Tableau 7: tableau exprime la densité de bois, source (les propriété de densité résistance conductivité du bois , site web MAT7RIAUTHEQUE)

### 9.3.2. Propriétés du bois avant transformation :

- **Sensible à l'humidité atmosphérique**, le bois est en échange constant avec son milieu et se met en équilibre avec le taux ambiant.
- **Rétractabilité** : Le bois a un caractère hydrophile, il varie de dimensions et de volume avec les variations d'humidité. Il se rétracte quand il sèche et gonfle quand il absorbe de l'humidité

Ces réactions jouent sur les propriétés physiques et mécaniques du bois (résistance, rigidité, qualités thermique, acoustiques) qui sont d'autant plus grandes que le bois est sec. Dilatabilité : Le bois subit des variations dimensionnelles sous l'effet d'une augmentation de température, qui sont relativement moindres en comparaison d'autres matériaux comme le béton ou l'acier. Cela lui confère un bon comportement en cas d'incendie.

Le bois, est l'un des seuls matériaux vivant. De ce fait, il respire. C'est cette capacité à produire de l'oxygène et à stocker le CO<sub>2</sub> pendant toute sa durée de vie qui fait du bois, un matériau durable.

### 9.3.3. Propriétés du bois après transformation :

Une fois transformé pour tel ou tel usage, le matériau bois continue d'absorber du CO<sub>2</sub> dès lors que sa durée de vie est supérieure à quelques décennies. Il restitue le CO<sub>2</sub> qu'il a emmagasiné durant toute sa vie une fois celui-ci détruit ou brûlé.

#### a) Résistance :

Globalement, le bois a une résistance élevée pour une densité relativement faible, surtout en traction longitudinale. Les bois durs ont une meilleure résistance mécanique que les bois tendres du fait de leur densité, c'est pourquoi ils vont être privilégiés pour des éléments structurels dans la construction. Les propriétés mécaniques du bois dépendent de son taux d'humidité, l'augmentation de cette dernière réduit la résistance et la rigidité du bois.

#### b) Conductivité :

Le bois présente une conductivité plutôt faible, et ainsi une résistance élevée au transfert d'énergie calorifique. Ceci fait du bois et ses dérivés de très bons matériaux isolants et une bonne résistance au feu. Ces propriétés sont particulièrement importantes quand le matériau est sec, la conductivité augmentant avec le taux d'humidité.

La conductivité thermique du bois varie selon les essences en fonction de leur densité. Plus le bois est léger et tendre, plus sa conductivité thermique est faible, et donc plus il est isolant

Type de bois / Matériaux	Densité (g/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique (W/m/°C)
Tendres et légers (sapin, épicéa)	0.4 à 0.5	0.12
mi-durs résineux (pins, mélèze)	0.5 à 0.6	0.15
mi durs feuillus (chêne, hêtre, iroko)	0.6 à 0.7	0.23
panneaux de contre-plaqué	0.45 à 0.55	0.15

Tableau 8: tableau exprime la conductivité thermique de bois

**Conclusion**

L'étude du comportement hygro-mécanique à travers l'anatomie des matériaux biologiques révèle l'importance de leur structure interne dans leur réponse aux variations d'humidité. La disposition des tissus et leur composition influencent directement les propriétés mécaniques, notamment la déformation et la résistance.

Cette interaction entre anatomie et hygro-mécanique ouvre des perspectives importantes dans plusieurs domaines, tels que l'optimisation des matériaux de construction naturels, la conservation des objets sensibles à l'humidité, et la conception de biomatériaux adaptés aux variations environnementales. Une compréhension approfondie de ces phénomènes permet ainsi d'améliorer la durabilité et la performance des matériaux dans divers contextes d'application.

## Chapitre II

### Les isolants thermiques dans les bâtiments

#### 1. Introduction :

Les isolants thermiques jouent un rôle essentiel dans le secteur du bâtiment, en contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique des constructions. Face aux enjeux climatiques et économiques, leur utilisation est devenue une priorité pour réduire les pertes de chaleur, améliorer le confort des occupants et diminuer la consommation énergétique. Les matériaux isolants permettent de limiter les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment, garantissant ainsi une température intérieure plus stable et réduisant le recours au chauffage ou à la climatisation.

Dans le domaine de la construction, différents types d'isolants existent, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages selon les besoins et les contraintes du projet. Qu'il s'agisse de l'isolation des murs, des toitures, des sols ou des fenêtres, le choix du matériau est crucial pour assurer une performance optimale. Les isolants peuvent être d'origine minérale, synthétique ou naturelle, et leur efficacité dépend de plusieurs critères, tels que leur conductivité thermique, leur épaisseur et leur mise en œuvre.

L'intégration de solutions d'isolation performantes dans le bâtiment constitue un levier important pour atteindre les objectifs de développement durable, en réduisant l'empreinte environnementale des constructions et en favorisant des économies d'énergie significatives. Ainsi, la sélection et l'installation des isolants thermiques doivent être pensées avec soin pour garantir des résultats efficaces et durables.

#### 2. Les différents types des les isolants thermiques dans la construction :

##### 2.1. Panneau Placoplatre :

###### 2.1.1 Définition :

Un panneau de gypse, également appelé plaque de plâtre ou placoplâtre, est un matériau de construction utilisé pour les murs et les plafonds intérieurs. Il est fabriqué à partir de gypse, un minéral naturel ou synthétique, qui est pris en sandwich entre deux couches de papier ou de fibre de verre. Ces panneaux sont populaires pour leur facilité d'installation, leur coût abordable, leur résistance au feu et leur capacité à limiter la propagation du son.

Il existe plusieurs types de panneaux de plâtre, chacun adapté à des besoins spécifiques :

- Plaque standard (BA13) : Utilisée pour les pièces sèches comme les chambres et les salons.
- Plaque hydrofuge : Résiste à l'humidité, idéale pour les salles de bains et cuisines.
- Plaque acoustique : Conçue pour réduire les nuisances sonores, parfaite pour les bureaux ou les home-cinémas.
- Plaque ignifuge : Offre une meilleure résistance au feu, utilisée dans les bâtiments publics et les zones à risque.
- Plaque haute dureté Plus résistante aux chocs, adaptée aux lieux recevant du public ou aux garages.
- Panneaux alvéolaires : Constitués de deux plaques de plâtre séparées par une structure en carton, ils sont légers et faciles à manipuler.



Figure 27 : gypsum board ( panneau en gypse ), source ( site commercial ideleco insulation BOARD France )



Figure 28 : PRÉGYPLAC A1 BA13 épaisseur 12 5 mm largeur 120 cm, Source ( site France SINIAT )

### 2.1.2 Propriétés thermique et physique et mécanique d'isolant Placoplatre :

#### 1. Propriété thermique :

La conductivité thermique ( $\lambda$ )	Entre 0.25 et 0.35 W/(m.K) pour le plâtre pur et jusqu'à 0.045 à 0.07 W/(m.K) pour plâtres isolants allèges
Capacité- thermique massique	Environ 1000 J/kg.K
Résistance thermique (R)	Dépend de l'épaisseur par exemple une plaque de 5cm de plâtre isolant peut offrir une résistance thermique de 0.7 à 1.1 m <sup>2</sup> .K/W
Régulations de l'humidité	Le plâtre est hygroscopique il absorber l'humidité de l'air et la restitue contribuant au confort intérieur

Tableau 9 : tableau exprime les propriétés thermiques de panneau Placoplatre

#### 2. Propriétés physique :

Densité	Porosité	Perméabilité à la vapeur l'eau
<ul style="list-style-type: none"> <li>Plâtre classique : <b>850 à 1100 kg/m<sup>2</sup></b></li> <li>Plâtre isolant allège : <b>300 à 800 Kg/m<sup>2</sup></b></li> </ul>	Elevée sur tout dans les versions allégées ce qui améliore l'isolation mais diminue la résistance mécanique	Bonne le plâtre laisse 'respirer' les parois ( valeur $\mu$ entre 8 et 10 )

Tableau 10 : Propriétés physiques de panneau Placoplatre

### 3. Propriétés mécanique

Résistance à la comprissions	Résistance à la flexion	Comportement au feu incombustible
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Plâtre pur : environ 2 à 10 MPa</li> <li>○ Plâtre isolant : plus faible autour de 0.5 à 2 MPa</li> </ul>	Généralement faible entre 1 et 3 MPa	Classé 1A selon les normes européennes ce qui en fait un bon matériau pour la protection passive contre l'incendie

Tableau 11 : Propriétés mécaniques de panneau Placoplatre

#### 2.1.3 Usage de panneau placo platre :

Les panneaux de gypse sont très polyvalents et largement utilisés dans la construction. Voici quelques-unes de leurs principales applications :

<b>Cloison</b>	Parfaits pour créer des cloisons intérieures légères et économique
<b>Doublage de murs</b>	Utilisés pour améliorer l'isolation thermique et acoustique des murs existants.
<b>Plafonds</b>	Permettent de réaliser des faux plafonds esthétiques et fonctionnels.
<b>Zones humides</b>	Les panneaux résistants à l'humidité sont idéaux pour les salles de bains et cuisines.
<b>Supports prêts à carreler</b>	Servent de base pour poser des carreaux dans les salles d'eau.
<b>Planchers sur chape sèche</b>	Utilisés pour des planchers légers et isolants.

Tableau 12 : Différents usages de panneau Placoplatre

#### 2.1.4. Les avantages de panneau en gypse comme un isolant thermique :

Les panneaux en gypse peuvent également offrir des avantages en matière d'isolation thermique, bien qu'ils ne soient généralement pas le premier choix pour cette fonction spécifique.

- Réduction des transferts de chaleur : Le gypse a une faible conductivité thermique, ce qui aide à limiter les pertes ou gains de chaleur à travers les murs et plafonds.
- Efficacité avec d'autres matériaux: Combinés avec des matériaux isolants (comme la laine de roche ou la mousse isolante), ils améliorent considérablement les performances thermiques.
- Régulation de la température : Le gypse peut contribuer à maintenir une température intérieure stable en absorbant et en libérant lentement la chaleur.
- Protection contre l'humidité: Certaines variantes, comme les panneaux résistants à l'humidité, aident à prévenir les problèmes liés à la condensation, ce qui améliore indirectement l'isolation.
- Respect des normes énergétiques : En construction ou rénovation, leur utilisation peut contribuer à répondre aux exigences d'efficacité énergétique.

## 2.2. Isolant cellulose :

### 2.2.1 Définition :

L'isolant en cellulose est un produit issu du recyclage de journaux non distribués. Pour l'instant, la filière n'accueille pas encore les journaux déjà lus par les particuliers. L'isolant est traité pour résister aux moisissures, à la corrosion et au feu.



Figure 29 : isolation cellulose, source (site CONSTRUCTION RONOvation 2015-2025 adik mèdia )

### 2.2.2 Les propriétés d'isolante cellulose

#### 1. propriétés thermiques

Conductivité thermique ( $\lambda$ )	Environ 0,038 à 0,042 W/m·K Très bon isolant thermique.
Capacité thermique massique	1500 à 2100 J/kg·K Excellente inertie thermique : retarde le passage de la chaleur en été.
Résistance thermique (R)	Dépend de l'épaisseur. Par exemple, une couche de 20 cm offre $R \approx 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ .
Déphasage thermique	Très bon (peut dépasser 10h), idéal pour le confort d'été.

Tableau 13 : Propriétés thermiques d'isolante cellulose

## 2. Propriétés physique

Densité :	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En vrac insufflé : 25 à 65 kg/m<sup>3</sup></li> <li>• En panneaux semi-rigides : 40 à 80 kg/m</li> </ul>
Hygroscopicité	bonne. La cellulose peut absorber jusqu'à 15 % de son poids en humidité sans perdre son pouvoir isolant.
Perméabilité à la vapeur d'eau	Élevée ( $\mu \approx 1$ à 2) → matériau perspirant
Stabilité dimensionnelle	Stabilité dimensionnelle : bonne, surtout si bien mise en œuvre (risque faible de tassement si correctement densifiée)

Tableau 14 : Propriétés physiques d'isolante cellulose

## 3. Propriétés mécanique

Résistance à la compression	faible en vrac, meilleure en panneaux (environ 0,02 à 0,1 MPa selon la forme).
Résistance à la traction/flexion	Résistance à la traction/flexion : faible. La cellulose n'est pas structurée ; elle doit être contenue ou protégée
Résistance au feu	traitée avec des sels de bore ou autres retardateurs ; classement généralement B-s2,d0 ou C selon les traitements.
Durabilité :	bonne si l'humidité est bien gérée. Elle peut durer plusieurs dizaines d'années.

Tableau 15 : tableau exprime les propriétés mécaniques d'isolante cellulose

### 2.2.3. Les avantages d'isolante cellulose :

La cellulose est une excellente alternative éco responsable aux isolants composés de polystyrène il est facile de se procurer la fibre de cellulose. Même si ce produit est issu du recyclage de papier, il offre une excellente résistance thermique. Une liste complète des différents avantages de ce produit :

- Écologique
- Recyclable
- Biodégradable
- Abordable
- Excellent rapport qualité/prix
- Bon facteur R
- Insonorisant
- Résistant au feu

La cellulose ne présente que quelques points faibles. Ce produit est plus complexe à installer puisqu'il nécessite une machine adaptée et un certain savoir-faire en isolation. Le second point faible concerne le sel utilisé pour le rendre résistant au feu. Le sel de bore est naturel, Il est extrait en Californie et en Turquie.

#### 2.2.4 Le Facteur R :

Ce facteur correspond à la résistance thermique au pouce offerte par l'isolant en question. Le facteur R se situe entre 0 et 60. Plus cette valeur est élevée, plus l'isolant est performant et résistant en termes d'isolation thermique. Le facteur R de la fibre de cellulose se situe entre 3,6 et 3,85 par pouce, ce qui est excellent pour un isolant naturel. En comparaison, le polystyrène possède un coefficient R d'environ 4.

#### 2.2.5. Installation d'isolante cellulose :

L'isolant de cellulose peut être installé partout dans une maison, mis à part le sous-sol puisqu'il est plus sujet aux infiltrations d'eau. L'isolation cellulose est tout indiquée pour les murs, les planchers et le toit.

Pour l'installation de la fibre de cellulose, il est recommandé de faire affaire avec un professionnel. La pulvérisation du produit doit se faire à l'aide d'une machine qui compacte l'isolant. Avant d'installer la cellulose, un pare-vapeur doit absolument être installé aux endroits où l'isolant sera pulvérisé.

## 2.3. Panneaux à copeaux orientés (l'OSB) :

### 2.3.1 Définition

L'OSB est un matériau de construction à base de bois. L'acronyme OSB signifie « Oriented Strand Board », soit en français « Panneau de lamelles orientées ».

L'OSB est un matériau qui résulte de l'assemblage de plusieurs lamelles de bois sous formes de couches successives fortement compressées puis encollées à l'aide de liants. Le nombre de couches dépend de l'épaisseur du panneau ou de la dalle.

Les procédés de fabrication donnent à l'OSB des propriétés esthétiques séduisantes :

- Un aspect naturel et chaleureux
- Un rendu mat
- Une isolation acoustique importante



Figure 30 : les plaques l'OSB Source (site commerciale CHASSON France)

### 2.3.2 Les différents types de panneaux OSB :

- **OSB 1** : Panneau à utiliser pour un agencement intérieur ou du mobilier en milieu sec.
- **OSB 2** : Panneau travaillant à utiliser en milieu sec.
- **OSB 3** : Panneau travaillant à utiliser en milieu humide.
- **OSB 4** : Panneau travaillant sous contrainte élevée en milieu humide

### 2.3.3 Les propriétés de panneau l'OSB :

#### 1. Propriétés mécaniques

Les valeurs ci-dessus peuvent varier selon le type d'OSB ( 1 à 4) et le sens des efforts (parallèle ou perpendiculaire aux lamelles)

Propriétés	Valeur typique (0 ;12%)
Module de d'élasticité (MDE)	3500 à 4500 MF (parallèle aux lam )
Résistance en flexion	20 à 30 MPa
Résistance en traction	10 à 15 MPa
Résistance au cisaillement	5 à 10 MPa
Module de cisaillement	600 à 900 MPa

Tableau 16 : tableau exprime les propriétés mécaniques de panneau l'OSB

- **OSB3** est plus utilisé dans les construction à ossature bois ,car il offre un bon compromis entre résistance mécaniques et résistance à l'humidité

#### 2. Propriétés thermiques

Propriétés	Valeur typique
Conductivité thermique ( $\lambda$ )	0.3 W/(m.K)
Capacité thermique spécifique ( $C_p$ )	1700 J/(kg.K)
Résistance thermique ( R )	$R=e/\lambda$ ( ex : pour mm d'épaisseur 0.115 m <sup>2</sup> .K/W)

Tableau 17 : tableau exprime les propriétés thermiques de panneau l'OSB

#### 3. Propriété physique :

Propriétés	Valeur typique
Densité	600 à 700 kg/m <sup>3</sup>
Teneur en humidités	5 à 12 % (à l'équilibre)
Absorption d'eau	Elevée si non prote l'OSB3 et OSB4 sont plus résistants à l'humidité

Tableau 18: tableau exprime les propriétés physiques de panneau l'OSB

### 2.3.4 Utilisation de panneaux OSB en extérieur :

Comme évoqué plus haut, les panneaux OSB 3 et 4 peuvent être utilisés en extérieur car ils résistent à l'humidité. Cependant, il faut savoir observer certaines précautions afin qu'ils ne soient pas prématurément endommagés ou qu'ils perdent certaines de leurs propriétés.

Les panneaux OSB ont des qualités d'isolation thermique et acoustique. Pour cette raison, ils peuvent notamment être choisis pour habiller les façades extérieures d'une habitation. Pour ce type de projet, les panneaux OSB 3 et 4 peuvent être utilisés mais ils doivent être recouverts d'un matériau de protection (de type – pare-pluie ) afin qu'ils ne soient pas endommagés par les intempéries. L'utilisation d'une peinture protectrice peut être un gage supplémentaire de durabilité. En plus d'habiller les panneaux, elle les protégera également contre les intempéries ainsi que les variations de températures.

### 2.3.5 La charge maximale supportée d'un panneau OSB :

Selon la nature du projet, il est également important de connaître la charge maximale supportée par le panneau OSB. Cette dernière dépend beaucoup de l'épaisseur du panneau qui varie de 6 à 25 millimètres et qui peut atteindre les 40 millimètres.

Dans le cadre d'une construction de plancher avec des panneaux OSB, il est recommandé d'opter pour une épaisseur minimale comprise entre 15 et 18 millimètres. Pour un panneau OSB d'une épaisseur de 15 millimètres non exposé à l'humidité, on estime que la charge maximale supportée par le matériau est d'environ 200 kilos par mètre carré. Avant la pose du plancher, il est nécessaire d'en définir la fonction ainsi que les charges qu'il aura à supporter car cela permet également de définir l'entraxe des solives.

### 2.3.6 Les avantages et les inconvénients de l'OSB :

#### 1. Avantages :

- Excellente résistance mécanique : résiste au décollement et au voilement.
- Facilité de mise en œuvre : se perce et se découpe facilement.
- Coût compétitif par rapport à d'autres matériaux.
- Écologique : car fabriqué à partir de bois recyclés.
- Bonne isolation phonique et thermique .

#### 2. Inconvénients :

- Aspect moins « fini » que d'autres panneaux.
- Aspect moins lisse que le contreplaqué.

- **Sensibilité à l'humidité** : bien que les OSB 3 et 4 soient résistants à l'humidité, il est important de les protéger en extérieur ou en milieu humide.
- **Moins esthétique que le bois massif** : L'aspect de l'OSB est plus homogène et moins chaleureux que celui du bois naturel.

## 2.4 Le pin maritime

### 2.4.1 Définition

Le pin maritime présente un aubier blanc à jaune clair distinct du duramen rougeâtre. Il a un grain moyen; son fil est le plus souvent droit.

Le pin maritime (*Pinus pinaster*) est un arbre résineux de la famille des Pinacées, originaire des régions méditerranéennes de l'Europe occidentale. Il se caractérise par sa croissance rapide, ses longues aiguilles groupées par deux, et ses grands cônes allongés. Il est particulièrement adapté aux sols pauvres et sablonneux

L'aubier de pin maritime est naturellement peu durable mais très facilement imprenable par des produits de préservation (traitement par trempage ou autoclave). Son duramen est naturellement durable. Après traitement par autoclave, il peut attendre les classes de risque 4 et 5.



(A)



(B)

Figure 31 : Photos (A) et (B) est bois pin maritime, source (site [orcamentos.paulobastos](http://orcamentos.paulobastos.com))

### 2.4.2 Disponibilité en Algérie :

Le pin maritime est naturel dans le nord-est du pays et couvre 32 000 ha. Les eucalyptus introduits dans le nord et surtout l'est du pays occupent 43 000 ha. Ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économiques qui totalisent 1 249 000 ha dont 424 000 ha de peuplements artificiels.

Le bois de pin maritime (*Pinus pinaster*) est une ressource précieuse en Algérie, utilisée dans divers domaines tels que la construction, la menuiserie et la fabrication de papier. Ce bois est apprécié pour sa résistance mécanique, sa durabilité et sa capacité à être travaillé facilement. Il est également riche en résine, ce qui le rend idéal pour des applications industrielles comme la production de colles et de vernis.

En Algérie, le pin maritime est présent dans plusieurs régions Algériennes, notamment dans le massif de l'Edough, où il coexiste avec d'autres espèces telles que le chêne-liège et le chêne zeen cependant son expansion rapide peut perturber lorsqu'il envahit les écosystèmes locaux

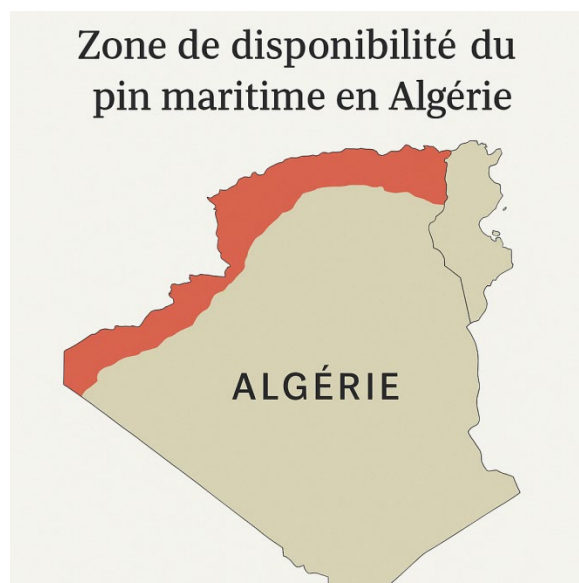


Figure 32 : la zone de disponibilité de pin maritime en Algérie, Source (étude revue des sciences de la nature site web researchgate)

- ❖ Régions de présence : On le trouve surtout dans les régions montagneuses du nord, notamment en Kabylie, dans les Aurès, et certaines zones du Tell.
- ❖ Adaptation : Il s'adapte bien aux sols pauvres et au climat méditerranéen, ce qui en fait une essence utile pour restaurer des terrains dégradés.

### 2.4.3 Variétés disponibles en Algérie

Selon la classification botanique, les principales variétés de pin maritime présentes en Algérie incluent :

- **Pinus pinaster subsp. renoui** : Endémique à l'Algérie et à la Tunisie, cette sous-espèce est bien adaptée aux conditions locales et est utilisée dans les programmes de reboisement.
- **Pinus pinaster subsp. atlantica var. maritime** : Originaire du sud-ouest de l'Europe, cette variété a été introduite en Afrique du Nord, y compris en Algérie, pour ses qualités de croissance rapide et sa tolérance aux sols pauvres.

### 2.4.4 Utilisation de bois pin :

- **Reboisement** : pour la stabilisation des sols et la reforestation.
- **Bois** : utilisé localement pour la charpente, la menuiserie grossière ou comme bois de chauffage.
- **Résine** : moins exploitée en Algérie qu'en France, mais présente.

### 2.4.5 Propriété physique et mécanique

Le pin maritime est dur, lourd et résistant. Ses noeuds assez durs peuvent parfois le rendre peu adhérent. Son bois est fissile, souple et il travaille peu. Bonne résistance en compression mais en flexion il est moins élastique que le pin sylvestre. C'est un bois avec une forte teneur en résine.

<b>Densité</b>	560 kg/m <sup>3</sup>
<b>Retrait volumique moyen</b>	11.9 %
<b>Dureté</b>	20 N/mm <sup>2</sup>
<b>Module de rupture de flexion</b>	90 MPa
<b>Contrainte de Rupture de compression axiale</b>	47 MPa
<b>Module d'élasticité longitudinale en flexion</b>	10 200 MPa

Tableau 19 : Valeurs mécanique de bois pin maritime, (source : site french timber)

#### 2.4.6. Défis et gestion durable :

En Algérie, l'exploitation du bois de pin maritime doit être gérée de manière durable pour éviter la déforestation et préserver les écosystèmes. Cela inclut :

- La reforestation pour compenser l'exploitation.
- L'utilisation de techniques modernes pour le traitement et la transformation du bois.
- La valorisation des déchets issus de la transformation pour des produits comme les panneaux de particules.

### **Conclusion**

L'isolation thermique des bâtiments joue un rôle crucial dans la réduction de la consommation énergétique et l'amélioration du confort intérieur grâce aux avancées technologiques. Les matériaux isolants sont de plus en plus performants permettant une meilleure régulation thermique et une diminution des pertes de chaleur.

En Algérie où le secteur de bâtiment est particulièrement énergivore, l'intégration de solutions d'isolation thermique est essentielle pour assurer un développement durable et limiter l'impact environnemental. Les études montrent que l'utilisation de matériaux adaptés et de techniques innovantes peut significativement améliorer l'efficacité énergétique des constructions.

Ainsi l'isolation thermique est non seulement un levier économique mais aussi un enjeu-écologique majeur pour l'avenir du secteur de bâtiment.

## Chapitre III

### Mécanismes de transfert de chaleur et d'humidité

#### 1. Introduction

En thermodynamique, nous étudions la quantité de chaleur transférée lorsqu'un système subit un processus d'un état d'équilibre à un autre. La thermodynamique ne donne aucune indication sur la durée de ce processus. En transfert de chaleur, nous nous intéressons davantage à la vitesse de transfert.

#### 2. Transfer de chaleur dans un mur :

La condition fondamentale du transfert de chaleur est la présence d'une différence de température. Cette différence de température est la force motrice du transfert de chaleur, tout comme la différence de tension pour le courant électrique. La quantité totale de chaleur transférée  $Q$  pendant un intervalle de temps peut être déterminée à partir de

$$Q = \int_0^{\Delta T} Q' dt \quad (\text{KJ}) \quad (1)$$

Le taux de transfert de chaleur par unité de surface est appelé flux thermique, et le flux thermique moyen sur une surface est exprimé par :

$$q' = \frac{Q'}{A} \quad (\text{W} / \text{m}^2) \quad (2)$$

#### 2.1 Conduction thermique stationnaire dans les parois planes :

La conduction est le transfert d'énergie des particules les plus énergétiques d'une substance vers les particules adjacentes moins énergétiques, résultant des interactions entre les particules.

Considérons la conduction stationnaire à travers une grande paroi plane d'épaisseur  $\Delta x = L$  et de surface  $A$ . La différence de température à travers la paroi est :  $\Delta T = T_2 - T_1$ .

A noter que le transfert de chaleur est la seule interaction énergétique ; le bilan énergétique de la paroi peut être exprimé.

$$Q'_{\text{in}} - Q'_{\text{out}} = \frac{dE}{dt} \quad (3)$$

Pour un fonctionnement en régime permanent

$$Q'_{\text{in}} - Q'_{\text{out}} = \text{const} \quad (4)$$

Il a été observé expérimentalement que le taux de conduction thermique à travers une couche est proportionnel à la différence de température à travers la couche et la zone de transfert thermique, mais inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche.

**Taux de Transfer de chaleur**  $\propto \frac{\text{(surface)(différence de température)}}{\text{épaisseur}}$

$$Q'_{\text{cond}} = KA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}) \quad (5)$$

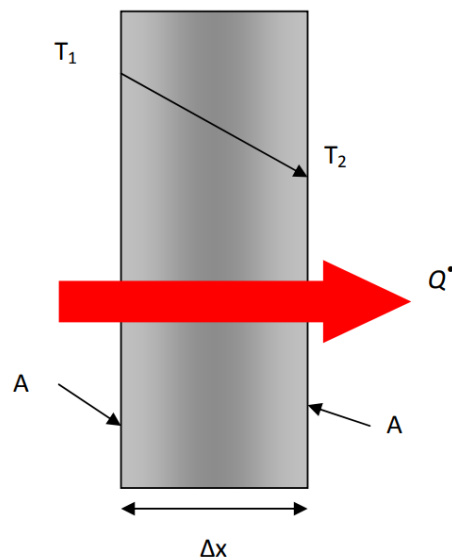


Figure 33 : Conduction thermique à travers une grande paroi plane.

La constante de proportionnalité  $k$  est la conductivité thermique du matériau. Dans le cas limite où  $\Delta x \rightarrow 0$ , l'équation ci-dessus se réduit à la forme différentielle :

$$Q'_{\text{cond}} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}) \quad (6)$$

Ce phénomène est appelé loi de Fourier sur la conduction thermique. Le terme  $dT/dx$  désigne le gradient de température, qui correspond à la pente de la courbe de température (taux de variation de la température  $T$  selon la longueur  $x$ ).

## 2.2 Conductivité thermique

- La conductivité thermique  $k$  [W/mK] mesure la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Elle est définie comme le taux de transfert de chaleur à travers une unité d'épaisseur de matériau par unité de surface et par unité de différence de température.
- La conductivité thermique varie avec la température et est déterminée expérimentalement.
- La conductivité thermique de certains matériaux présente une variation spectaculaire à des températures proches du zéro absolu, lorsque ces solides deviennent supraconducteurs.
- Un matériau isotrope est un matériau dont les propriétés sont uniformes dans toutes les directions.
- Les isolants sont des matériaux utilisés principalement pour résister au flux thermique. Leur conductivité thermique est faible.

## 2.3 Le concept de résistance thermique /

L'équation de Fourier, pour une conduction stable à travers une paroi plane de surface constante, peut s'écrire :

$$Q'_{cond} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x} = KA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (7)$$

Cela peut être réorganisé comme suit :

$$Q'_{cond} = \frac{T_2 - T_1}{R_{mur}} \quad (8)$$

$$R_{mur} = \frac{L}{KA} \quad (9)$$

$R_{mur}$  est la résistance thermique de la paroi à la conduction thermique, ou simplement sa résistance à la conduction.

## 2.4 Coefficient de transfert thermique :

Le coefficient de transfert thermique est le taux de transfert thermique entre une surface et un fluide. Ce taux est proportionnel à la différence de température entre les deux matériaux. Il dépend des propriétés physiques des deux matériaux et n'est pas une propriété du fluide. La valeur du coefficient de transfert thermique dépend de variables telles que la géométrie de la surface, les propriétés du fluide, la vitesse volumique du fluide et la nature de son mouvement.

## 3. Les types de Transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur désigne les différents mécanismes par lesquels l'énergie thermique se déplace d'un endroit à un autre. Il existe trois principaux types de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. Un transfert d'énergie thermique donné peut impliquer un ou plusieurs de ces processus. Les changements de phase libèrent ou absorbent également de la chaleur.

### 3.1 Conduction :

La conduction est un type de transfert de chaleur dans un matériau solide. Elle se produit lorsque les molécules d'une substance vibrent et transfèrent de l'énergie aux molécules voisines. Ce processus est essentiel dans de nombreuses applications industrielles où les matériaux doivent conduire efficacement la chaleur.

#### 3.1.1 Exemple de conduction :

Lorsque vous touchez une tige métallique chauffée à une extrémité, la chaleur traverse la tige jusqu'à votre main.

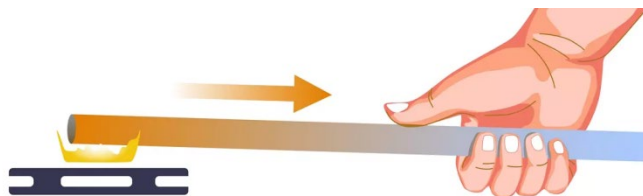


Figure 34 : une tige métallique chauffée à une extrémité

### 3.2 Convection :

La convection est le transfert de chaleur à travers un fluide. Les fluides peuvent être liquides ou gazeux. La convection implique un écoulement de matière à grande échelle qui transfère de l'énergie d'une substance chaude à une substance plus froide. Un moteur de voiture refroidi par de l'antigel est un exemple de transfert de chaleur par convection. La convection ne se produit pas dans les solides, car l'écoulement en masse est impossible.

Le transfert de chaleur par convection désigne le mouvement de l'énergie thermique dans les fluides. La convection résulte du mouvement des molécules dans le liquide, le gaz ou le mélange liquide-gaz. Initialement, la chaleur est transférée entre les molécules par conduction, mais le principal transfert de chaleur s'effectue par le mouvement des molécules dans le fluide.

- La convection est le processus d'échange d'énergie thermique dans les fluides par le mouvement de la matière en leur sein.
- Un transfert massif de molécules se produit au sein du fluide.
- Il se produit aussi bien dans les gaz que dans les liquides et entraîne un effet cyclique.
- Il existe des transferts de chaleur par convection naturelle et forcée.

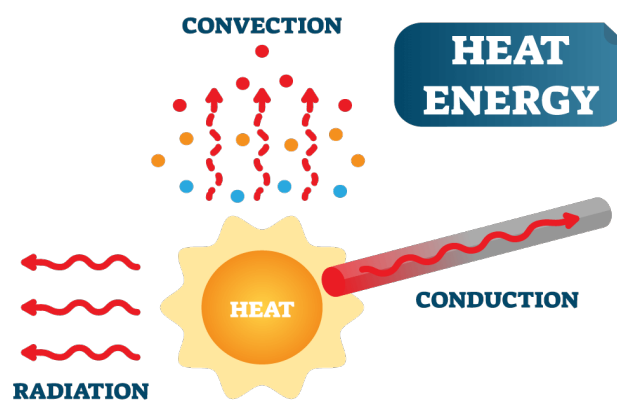


Figure 35 : schéma des les trois types de Transfert de chaleur

### 3.3 Rayonnement :

Le rayonnement transfère la chaleur par ondes électromagnétiques. Il est important de noter qu'il n'a pas besoin de milieu pour se propager ; le rayonnement peut se propager dans le vide. Par exemple, l'énergie est transférée du Soleil vers la Terre à travers le vide spatial par rayonnement.

L'effet du rayonnement peut être limité en le réfléchissant, ce qui constitue une forme d'isolation thermique. Par exemple, l'isolation multicouche est utilisée pour réduire le transfert de chaleur par rayonnement dans diverses applications, notamment l'aérospatiale.

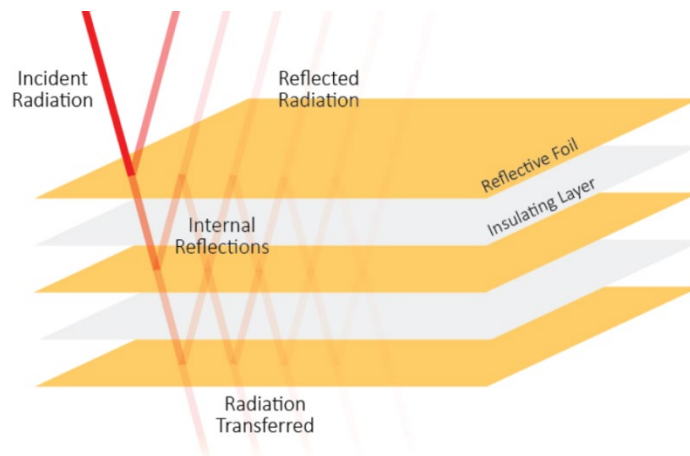


Figure 36 : L'isolation multicouche réduit le transfert de chaleur par rayonnement en réfléchissant le rayonnement vers la source

#### 4. Formules de la conductivité thermique et du transfert de chaleur :

##### 4.1 Flux de chaleur par conduction :

La conductivité thermique est une mesure de la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. La formule est la suivante :

$$Q = \lambda A t \left( \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad (10)$$

Où :

Q = la chaleur transférée (J),

$\lambda$  = le coefficient de conductivité thermique (W/m.K),

A : Aire de contact (m<sup>2</sup>),

t : le temps (s),

$\Delta T$  : la différence de température (K),

$\Delta x$  : la distance (m).

#### 4.1 Flux de chaleur par convection :

La formule du transfert de chaleur par convection est la suivante :

$$Q = -h \times A \times t \times \Delta T \quad (12)$$

où :

h : le coefficient de transfert thermique par convection ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ),

$\Delta T$  : différence de température entre la surface et le liquide (K).

Le signe négatif indique que le transfert de chaleur se produit de la température la plus élevée à la température la plus basse.

#### 4.3 Transfert de chaleur par rayonnement :

La loi de Stefan Boltzmann permet de déterminer le flux de chaleur Q (W) émis sous forme de rayonnement par un corps de surface S ( $\text{m}^2$ ) dans toutes les directions de l'espace:

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4$$

(19)

Avec :  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  étant la Constante de Stefan – Boltzmann.

S est la surface en  $\text{m}^2$  et  $\varepsilon$  est le facteur d'émission dépendant de la nature de la surface, avec  $0 < \varepsilon < 1$  et  $\varepsilon$  sans unité.

T : la température absolue du corps en Kelvin

## 5. Transfer d'humidité :

### 5.1 Les dégâts liée à humidité dans les bâtiments

Les quantités de vapeur d'eau ou d'eau liquide à travers la paroi entraînent des modifications des caractéristiques thermo-physiques des matériaux. Ces modifications concernent les propriétés thermiques, les propriétés mécaniques et les variations dimensionnelles des matériaux

### 5.2 Les sources d'humidité dans les bâtiments se répartissent en trois grandes familles :

- ✓ **Les sources extérieures au bâtiment** : elles sont principalement constituées de la pluie (pénétration par la façade ou par la toiture) et des remontées capillaires (par les fondations ou les murs enterrés).
- ✓ **Les sources provenant du bâtiment lui-même** : que ce soit en neuf ou en rénovation, les matériaux possèdent une certaine humidité qu'ils vont dans certains cas devoir évacuer. C'est le cas du séchage du béton ou des enduits par exemple.
- ✓ **Les sources liées aux usagers** : une personne émet de la vapeur d'eau par respiration et par sudation. La cuisine et la toilette sont aussi des sources d'humidité liées à l'utilisation du bâtiment. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs pour la production de vapeur d'eau liée aux usagers.

### 5.3 Modifications des propriétés mécaniques :

La résistance mécanique des matériaux est inversement proportionnelle à leur teneur en eau [CoI 06]. Les courbes de résistances mécaniques en fonction de la teneur en eau permettent de caractériser cette variation. bECK [bEC 03] caractérise l'influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression d'une pierre tuffeau. Il montre que la résistance à la compression diminue de 55% entre l'état sec et l'état de saturation. La figure suivante donne un autre exemple de diminution de la résistance mécanique pour la pierre calcaire :

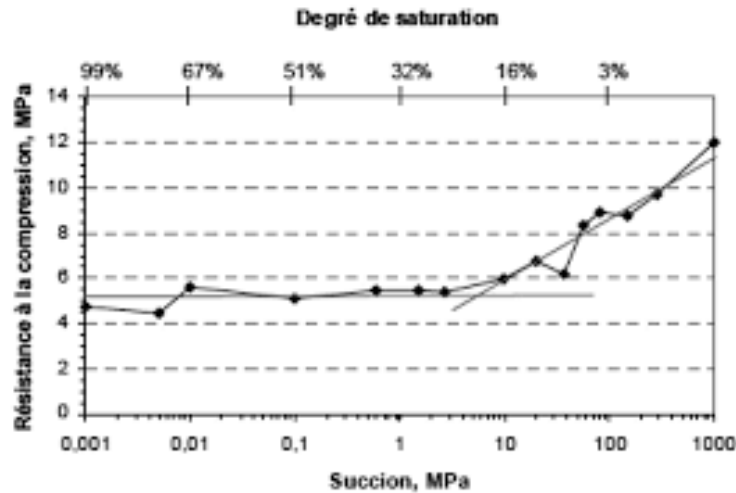


Figure 37 : Diminution de la résistance à la compression avec augmentation de la teneur en eau pour la pierre calcaire (Beck 2006)

Si la teneur en eau du matériau atteint une valeur critique, la structure du mur peut être compromise. Les avis techniques du CsTb sur les matériaux donne les résistances minimales à la compression  $R_{crit}$ .

Pour prévenir l'apparition de ce genre de pathologie, il s'agit de comparer la valeur de la résistance mécanique  $R_{meca}$  en fonction de la teneur en eau  $w$  du matériau par rapport à la résistance minimale ou critique à la compression défini par les avis techniques (Figure xx ). si cette résistance mécanique atteint la valeur seuil  $R_{crit}$  définie pour l'usage convenu, alors il y a risque de dégradation de la structure du matériau. Le critère d'apparition de la pathologie est donc le suivant :

$$R_{mec}(w) > R_{crit}$$

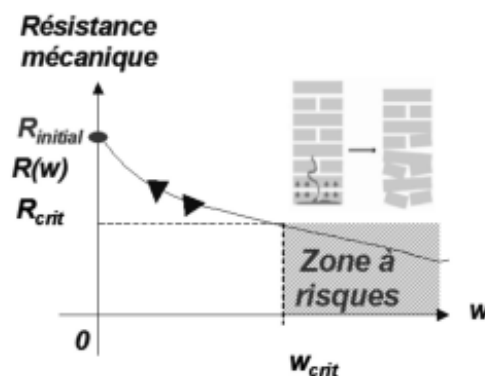


Figure 38 : Définition de la résistance mécanique critique pour prévenir de pathologies, source (Recherche Université de Savoie)

## 6. Les dégâts causés par l'humidité dans les bâtiments :

### 6.1 La source de l'humidité :

Les sources d'humidité dans les bâtiments se répartissent en trois grandes familles :

- ✓ Les sources extérieures au bâtiment : elles sont principalement constituées de la pluie (pénétration par la façade ou par la toiture) et des remontées capillaires (par les fondations ou les murs enterrés).
- ✓ Les sources provenant du bâtiment lui-même : que ce soit en neuf ou en rénovation, les matériaux possèdent une certaine humidité qu'ils vont dans certains cas devoir évacuer. C'est le cas du séchage du béton ou des enduits par exemple.
- ✓ Les sources liées aux usagers : une personne émet de la vapeur d'eau par respiration et par sudation. La cuisine et la toilette sont aussi des sources d'humidité liées à l'utilisation du bâtiment. Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs pour la production de vapeur d'eau liée aux usagers.

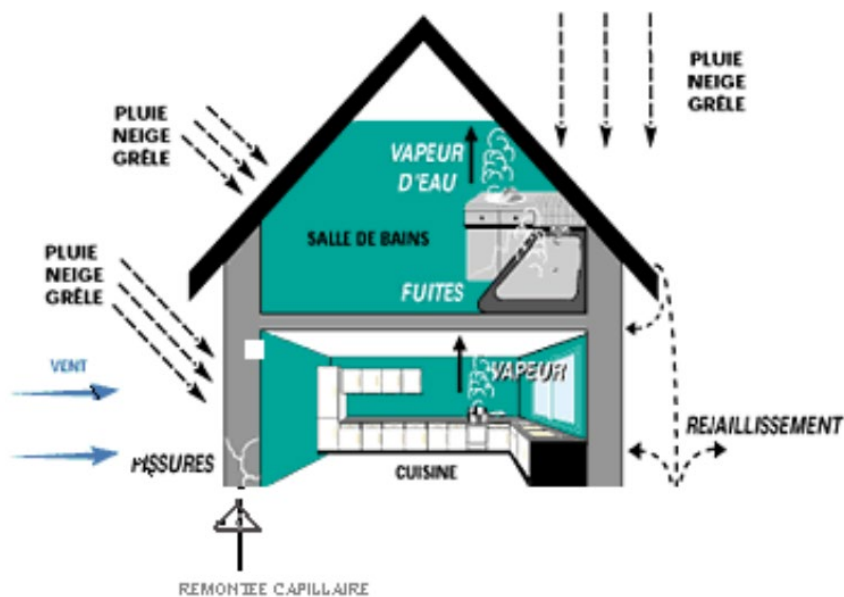


Figure 39 : les différentes sources d'humidité, source (mémoire de fin étude master académique synthés bibliographique sur les bâtiments causés par l'humidité)

Source d'humidité	Production
Personne au repos	40 g/h
Personne en activité modérée	60 g/h
Cuisson	2 kg/jour
Séchage du linge	1,5 kg/jour

Tableau 20 : Production de vapeur d'eau due aux usagers. Source : « Santé et Qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments », Claude-Alain Rouet.

## 6.2 Moisissure :

L'humidité est reconnue comme un catalyseur de la prolifération des moisissures, deux éléments qui présentent de graves risques pour la santé des occupants et peuvent causer des dommages importants aux bâtiments. Les sous-sols, les greniers et les salles de bains sont généralement les endroits les plus propices au développement des moisissures, car ils présentent généralement un taux d'humidité élevé et une mauvaise ventilation. Si on laisse les moisissures se développer et se propager, elles peuvent compromettre la structure du bâtiment et libérer des spores nocives dans l'air, rendant les habitants malades.



Figure 40 : un mur moisi à cause l'humidité à London, source (site web info sinistar )



Figure 41 : Infiltration directe par le toit source (site web info sinistar)

Certains des symptômes qu'une personne pourrait ressentir en étant exposée à la moisissure

- Problèmes respiratoires, notamment toux, respiration sifflante, essoufflement ou oppression thoracique :
- Congestion nasale et sinusale : L'inhalation de particules de moisissures peut irriter le nez et la gorge.
- Irritation cutanée : Le contact direct avec les moisissures peut provoquer des démangeaisons, des rougeurs ou des éruptions cutanées.
- Irritation oculaire : Les spores peuvent provoquer des rougeurs, des démangeaisons, des larmoiements et une sensibilité à la lumière.
- Fatigue et maux de tête : L'exposition aux moisissures peut provoquer de la fatigue, des symptômes pseudo-grippaux, des maux de tête, etc. Selon un résumé de la Bibliothèque nationale de médecine, dans une étude sur le syndrome de fatigue chronique (SFC), 48 % des patients avaient des antécédents d'allergie aux moisissures et/ou de sinusite chronique. L'étude indique également qu'il existe un lien entre le SFC et le syndrome des bâtiments malsains (SBM).

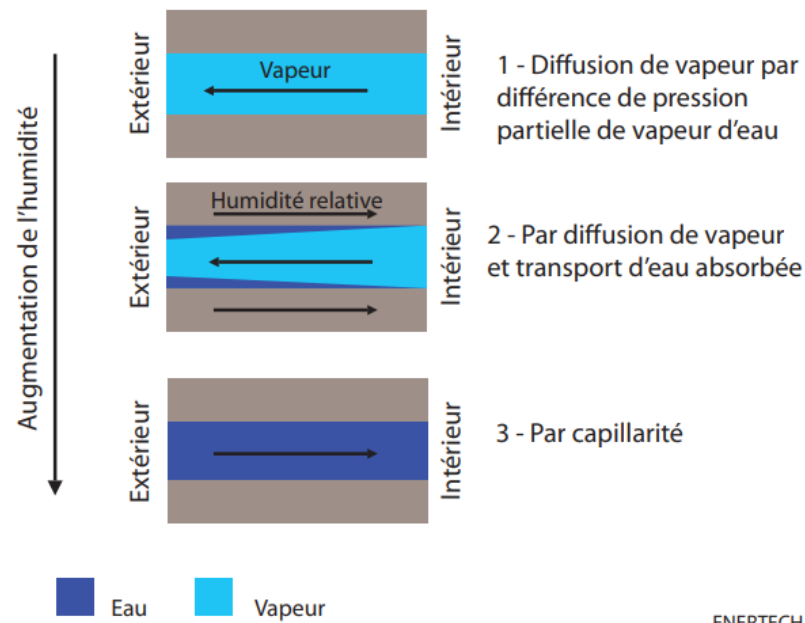


Figure 42: les différentes diffusions de l'humidité, source (mémoire de fin étude master académique synthés bibliographique sur les bâtiments causé par l'humidité)

### 6.2.1 Risques pour la santé :

Les personnes qui habitent dans une maison où il y a des moisissures et de l'humidité sont plus susceptibles de présenter les symptômes suivants:

- Irritation des yeux, du nez et de la gorge
- Toux et accumulation de mucus (mucosités)
- Respiration sifflante et essoufflement
- Aggravation des symptômes d'asthme
- Autres réactions allergiques

Certaines personnes sont plus susceptibles que d'autres aux effets des moisissures sur la santé. C'est le cas des enfants, des aînés et des personnes qui ont des problèmes de santé, comme l'asthme et des allergies graves. Puisque certaines personnes sont plus sensibles que d'autres, aucune quantité de moisissures n'est dépourvue de risques.

Certaines moisissures en suspension dans l'air peuvent causer des infections pulmonaires graves chez les personnes dont le système immunitaire est très affaibli, comme celles qui sont atteintes de la leucémie ou du sida ou qui ont reçu une transplantation.

## 6.2.2 Dégradation des matériaux :

<b>Le bois</b>	L'humidité peut causer le gonflement, la pourriture et une réduction de la résistance mécanique.
<b>Les métaux</b>	Elle peut accélérer la corrosion, surtout en présence d'eau stagnante.
<b>Les murs en béton ou en brique</b>	Ces matériaux peuvent se fissurer ou se détériorer en raison de l'humidité excessive.
<b>Les plâtres</b>	Ils peuvent s'effriter et perdre leur intégrité.

Tableau 21 : tableau exprime dégradation des matériaux

## 6.2.3 Conséquences de l'humidité sur les matériaux de constructions bois :

Attaquée par l'humidité, le bois perd ses propriétés physiques tel que : la résistance à la pression en revanche, sa résistance à la traction reste la même. Le diagramme de Geiger, (fig 49), montre bien comment la charge maximum supporté par le pin, qui dans les conditions normales d'humidité (12%) est d'environ 470 kg/cm<sup>2</sup>, tombe à 220-200 kg/cm<sup>2</sup> lorsque le bois approche de la saturation (2 - 40 %). On peut conclure que le bois, et à cause de l'humidité, serait moins résistant en hiver et en automne qu'en été. Cette observation est d'une grande utilité vis-à-vis des surcharges saisonnières. L'autre ennemi du bois est le champignon qui apparaît avec l'humidité, au moment où le taux de celle-ci dépasse 18% ou plus, d'autres conditions aussi qui favorisent l'apparition et la multiplication sont : - L'absence de l'aération ; - Un minimum constant de chaleur qui favorise le développement du mycélium.

Le champignon le plus répandu est le « *Merulius lacrimans* », appelé communément « pourriture rouge ». Il est le type le plus dangereux car il n'a besoin que de très peu d'humidité pour se développer, bien que dans la pénombre des greniers il apparaisse recouvert de gouttes d'eau. Outre, l'odeur prenante qu'il dégage, ce champignon détériore le bois en détruisant soit la lignine, soit la cellulose, mais jamais les deux à la fois sauf que l'action successive de différentes espèces ne les ronge l'une après l'autre [16]. On peut combattre ce champignon par le biais de la ventilation et une température élevée, car, il semble qu'il ne puisse vivre qu'à une température inférieure à 27° C (fig.49).



Figure 43 : Moisissure du bois Fonction de son taux d'humidité. source ( site web info sinistar )

### Conclusion

Le transfert de chaleur et l'humidité dans les bâtiments sont des éléments essentiels à contrôler pour garantir le confort et la durabilité des structures. La chaleur se déplace par conduction, convection et rayonnement, influençant la température intérieure et la consommation énergétique. Une isolation thermique efficace et une ventilation adaptée permettent de minimiser les pertes de chaleur et d'éviter la condensation, qui peut engendrer des problèmes d'humidité et de moisissures. L'humidité excessive compromet la qualité de l'air et la résistance des matériaux, tandis qu'une gestion optimisée favorise des conditions saines et une meilleure performance énergétique. En intégrant ces principes dans la conception des bâtiments, il est possible d'assurer un environnement agréable, durable et économiquement avantageux.

## Chapitre IV

### Modélisation numérique du comportement hygrothermique d'un mur en bois isolé

#### 1. Introduction :

La modélisation numérique du comportement hygrothermique d'un mur en bois isolé vise à analyser les transferts de chaleur et d'humidité à travers la paroi, afin de garantir un confort thermique optimal et éviter les problèmes liés à la condensation ou à la dégradation des matériaux.

#### 2. Contexte :

Les bâtiments en bois sont de plus en plus utilisés dans la construction durable en raison de leurs performances thermiques et environnementales. Cependant, le bois est un matériau hygroscopique, ce qui signifie qu'il peut absorber et libérer de l'humidité. Une mauvaise gestion des flux hygrothermiques peut entraîner des dégradations comme des moisissures, la pourriture du bois ou une diminution de l'efficacité thermique de l'isolation.

#### 3. Objectifs de la simulation :

- **Modéliser le transfert de chaleur** à travers les différentes couches du mur, en tenant compte de la conduction, de la convection et du rayonnement thermique.
- **Analyser la diffusion de l'humidité** en utilisant le module de transport de soluté pour simuler les variations de teneur en eau dans le bois et l'isolant.
- **Évaluer le risque de condensation** en identifiant les zones critiques où l'humidité relative pourrait dépasser le seuil de saturation.
- **Optimiser la conception du mur** en testant différents matériaux et épaisseurs pour améliorer la performance hygrothermique et la durabilité.

#### 4. Méthodologie de simulation via COMSOL-Multiphysiques :

- **Définition du domaine** : Modélisation géométrique du mur avec ses différentes couches (bois, isolant, pare-vapeur, revêtement).
- **Paramétrage des propriétés des matériaux** : Conductivité thermique, capacité calorifique, perméabilité à l'humidité.
- **Application des conditions aux frontières** : Températures et humidités imposées en fonction du climat extérieur et intérieur.
- **Résolution numérique** : Utilisation de la méthode des éléments finis pour obtenir des résultats précis.
- **Analyse des résultats** : Visualisation des profils de température et d'humidité, interprétation des gradients thermiques et identification des zones sensibles.

COMSOL offre des outils puissants pour visualiser les résultats sous forme de graphiques et de cartes de distribution, ce qui permet d'adapter les conceptions de manière efficace.

#### 5. La méthode de Glaser :

Les murs existants sont respirants et peuvent résister aux précipitations, car ils sèchent tout au long de l'année. Rien n'est prévu pour arrêter ce mouvement de vapeur, que ce soit à l'extérieur ou à l'intérieur, que ce soit par un pare-vapeur ou un enduit.

La méthode Glaser est une procédure d'évaluation du risque d'accumulation d'humidité dans les structures monodimensionnelles des bâtiments. Elle pourrait être utilisée pour évaluer le risque de moisissures et de condensation interstitielle. Elle repose sur un modèle simplifié qui ne représente pas le phénomène réel et dont les limites sont bien connues qualitativement.

##### 5.1 But de la méthode :

La méthode de Glaser identifie la diffusion de vapeur, c'est-à-dire la facilité avec laquelle la vapeur d'eau peut traverser la structure du bâtiment. Cependant, cette approche présente des limites : Glaser suppose que la vapeur ne se déplace que dans un seul sens (de l'intérieur vers l'extérieur). Elle omet complètement la caractéristique essentielle de la pluie battante dans ses calculs, ne mesure ni l'absorption ni la porosité, et passe donc à côté du risque potentiel lié au stockage d'humidité.

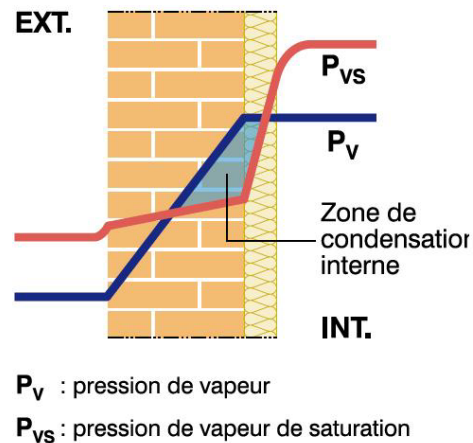


Figure 44 : Méthode de Glaser et condensation interne en hiver .source (guide ENR haute qualité environnement l'information HQE)

Le calcul de condensation que nous proposons a ses limites, dues à des contraintes physiques aussi bien qu'à la méthode Glaser elle-même. Ainsi

- La méthode ne convient pas aux parois constituées d'une seule couche.
- En présence d'une paroi non ventilée et protégée à la fois à l'intérieur et à l'extérieur par un matériau imperméable (deux plaques d'acier par exemple), la méthode Glaser est inapplicable. Dans une telle configuration, le degré d'hygrométrie à l'intérieur de la paroi ne pourrait être estimé qu'en faisant intervenir des éléments tels que les ponts thermiques et les conditions initiales.
- Les lames d'air n'interviennent que comme éléments statiques. Le transfert d'humidité dû à la ventilation de la paroi n'est pas pris en compte.
- L'influence d'un élément chauffant n'est pas prise en compte.
- Les ponts thermiques inclus dans la paroi ne sont pas pris en compte

## 5.2 Remarque

- La norme ISO 13788 décrit une méthode permettant d'établir le bilan hydrique annuel et de calculer la quantité maximale d'humidité accumulée due à la condensation interstitielle.

- Cette méthode est un outil d'évaluation plutôt qu'un outil de prédiction précis. Elle convient à la comparaison de différentes constructions et à l'évaluation des effets des modifications.

### 5.3 La norme EN 15026 :

La norme européenne EN 15026 fournit des critères minimaux pour les logiciels de simulation utilisés pour prédire le transfert transitoire unidimensionnel de chaleur et d'humidité dans les composants de construction multicouches exposés à des conditions climatiques transitoires des deux côtés.

La norme énumère les équations de modèle et les propriétés pertinentes des matériaux à utiliser pour calculer les phénomènes de transport de chaleur et d'humidité. Ces équations de modèle prennent en compte les phénomènes de stockage et de transport suivants :

- Stockage de chaleur par les matériaux secs et l'eau absorbée ;
- Transport de chaleur par conduction thermique dépendant de l'humidité ;
- Transfert de chaleur latente par diffusion de vapeur ;
- Stockage d'humidité par sorption de vapeur et forces capillaires ;
- Transport d'humidité par diffusion de vapeur ;
- Transport d'humidité par transport liquide (diffusion superficielle et écoulement capillaire) ;

Ainsi que les conditions limites suivantes :

- températures intérieures et extérieures
- humidité intérieure et extérieure
- rayonnement solaire et de grande longueur d'onde
- précipitations (normales et fortes pluies)

### 5.4 vitesse et direction du vent.

De plus, la norme adopte plusieurs hypothèses simplificatrices ; par exemple, les processus de gonflement et de retrait, les réactions chimiques et le vieillissement sont ignorés ; la fonction de stockage d'humidité est considérée comme indépendante de la température, etc.

Risque de condensation dans un mur à ossature bois

## 6. Le Risque de condensation dans un mur à ossature bois :

### 6.1 Introduction :

Ce tutoriel explique comment modéliser le transport de chaleur et d'humidité dans un mur à ossature bois afin d'évaluer le risque de condensation à l'intérieur. Différentes approches de conception et de modélisation sont comparées en conditions extérieures stationnaires. De plus, l'effet de la variation diurne de l'humidité extérieure sur la distribution de l'humidité dans le mur est calculé.

### 6.2 Modèle mathématique :

#### 6.2.1 Détermination des résistances thermiques

Chaque couche du mur possède une résistance thermique qui dépend de son épaisseur ( $e$ ) et de sa conductivité thermique ( $\lambda$ ) :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1)$$

La résistance thermique totale du mur est la somme des résistances de chaque couche. Cette étape permet de comprendre comment la chaleur se propage à travers le matériau.

L'humidité relative ( $\phi$ ) est le rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air et la quantité maximale qu'il peut contenir à une température donnée. Elle est exprimée en pourcentage et se calcule avec la formule suivante

$$\Phi = \frac{P_v}{P_s} \times 100 \quad (2)$$

Où :

- $P_v$  est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air,
- $P_s$  est la pression de saturation de la vapeur d'eau à la température ambiante.

Déterminer la pression de saturation ( $P_s$ ) à cette température à l'aide de la formule de Tetens :

$$P_s = 610.78 \times e^{\left(\frac{17.27 \times T}{T + 273.3}\right)} \quad (3)$$

### 6.2.2 Calcul des pressions partielles de vapeur d'eau :

L'air contient de la vapeur d'eau dont la pression varie à travers le mur. La pression partielle de vapeur  $P_v$  à une interface est déterminée par la loi de diffusion de Fick :

$$P_{v ; i} = P_{v .int} + (P_{v ; ext} - P_{v .int}) \times \frac{R_{vapeur.i}}{R_{vapeur.totale}} \quad (4)$$

Où :

$R_{vapeur}$  = est la résistance à la diffusion de vapeur de la couche en question

### 6.2.3 Modalisations dynamique du transport de chaleur et d'humidité :

Dans cette approche, le transport d'humidité liquide par capillarité et le transport de vapeur par diffusion sont calculés, et l'effet de chaleur latente dû à la diffusion de vapeur est modélisé. De plus, le stockage de chaleur et d'humidité est pris en compte, et les propriétés thermiques dépendantes de l'humidité sont utilisées. Les équations correspondantes, définies dans la norme EN 15026, sont résolues par défaut par les interfaces « Transport d'humidité équations (6) dans les matériaux de construction » et « Transfert de chaleur équations (5) dans les matériaux de construction ».

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} - \Delta \cdot (k_{eff} \Delta T + L_v \delta_p \Delta (\phi p_{sat})) = Q \dots\dots\dots (5)$$

$$\xi \frac{\partial \phi}{\partial t} - \Delta \cdot (\xi D_w \Delta \phi + \delta_p \Delta (\phi p_{sat})) = G \dots\dots\dots (6)$$

Ou :

- $(\rho C_p)_{eff}$  : J/(m<sup>3</sup>·K)) est la capacité thermique volumétrique effective à pression constante
- T : K est la température
- $k_{eff}$  : W/(m·K) est la conductivité thermique effective
- $L_v$  : (J/kg) est la chaleur latente d'évaporation
- $\delta_p$  est la perméabilité à la vapeur
- $\phi$  (sans dimension) est l'humidité relative
- $p_{sat}$  (Pa) est la pression de saturation de la vapeur
- Q : W/m<sup>3</sup>·s est la source de chaleur

- $\xi$  :  $\text{kg/m}^3$  est la capacité de stockage d'humidité
- $D_w$  :  $\text{m}^2/\text{s}$  est la diffusivité de l'humidité
- $G$  :  $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$  est la source d'humidité

#### 6.2.4 Modalisation statique de transport de chaleur et humidité :

En ignorant le stockage de chaleur et d'humidité, l'effet de chaleur latente et le transport capillaire de l'humidité liquide, les équations suivantes sont obtenues pour le transport de chaleur et d'humidité.

$$-\Delta \cdot (k_{\text{eff}} \Delta T) = Q \quad (7)$$

$$-\Delta \cdot (\delta_p \Delta (\phi p_{\text{sat}})) = G \quad (8)$$

Ces équations sont connues sous le nom de méthode de Glaser. Elles peuvent être résolues dans l'interface « Transport d'humidité dans les matériaux de construction » en définissant la diffusivité de l'humidité à 0, et dans l'interface « Transfert de chaleur dans les matériaux de construction » en définissant la perméabilité à la vapeur à 0.

L'avantage de cette seconde approche est qu'elle nécessite des propriétés de matériau moins hygroscopiques. En particulier, la diffusivité de l'humidité utilisée pour l'expression du flux de transport de liquide n'est pas requise. Cependant, pour des valeurs d'humidité relative élevées, Les simplifications mentionnées ci-dessus peuvent entraîner une surestimation de l'humidité relative et, par conséquent, un risque de condensation.

#### 6.2.5 Modélisation du pare-vapeur :

Les flux d'humidité ascendants et descendants, définis par  $\beta(\phi_d - \phi_u)$  et  $\beta(\phi_u - \phi_d)$  sont appliqués à l'interface entre le revêtement intérieur et l'isolant pour modéliser le pare-vapeur.

Le coefficient de transfert d'humidité  $\beta$  est défini comme suit :

$$\beta = \frac{\delta p_{\text{sat}}}{\mu ds} \quad (9)$$

Où  $\delta$  est la perméabilité à la vapeur de l'air immobile  $p_{\text{sat}}$  est la pression de saturation de la vapeur d'eau ( Pa),  $\mu$  est le facteur de résistance à la vapeur (sans dimension) et  $ds$  est l'épaisseur du pare-vapeur ( m).

Le comportement d'une paroi en régime transitoire dépend de plusieurs facteurs, notamment la conductivité thermique du matériau, la capacité thermique, les conditions aux limites et l'évolution des sollicitations au fil du temps. En général, une paroi exposée à des variations

thermiques transitoires peut subir des phénomènes de stockage et de dissipation de chaleur, influençant ainsi sa température interne et externe.

### 6.2.6 Variation diurnes des conditions extérieures

L'effet des conditions extérieures variables sur le risque de condensation est étudié à l'aide de données météorologiques typiques issues de la base de données ASHRAE. Les conditions ambiantes moyennes de température et d'humidité relative à Dublin du 15 au 17 avril sont utilisées pour définir les conditions de flux convectif sur la face extérieure du mur. La simulation est réalisée sur deux jours, les conditions de température et d'humidité relative étant présentées dans le graphique.

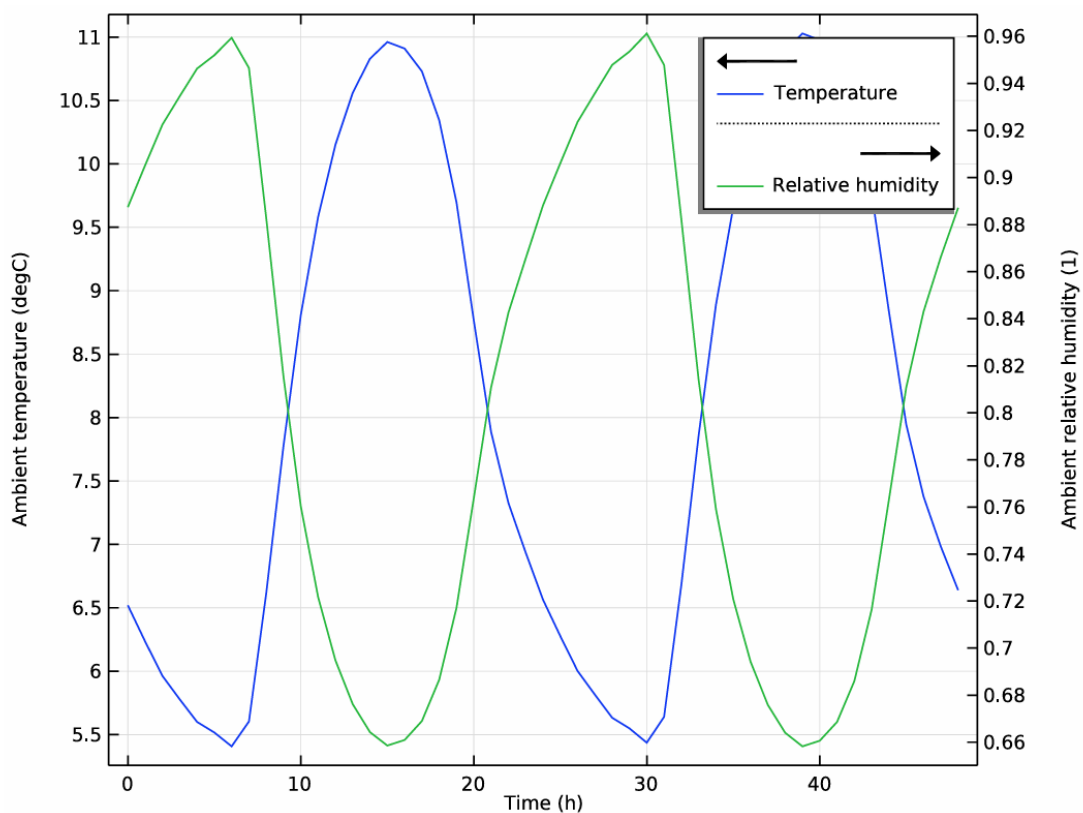


Figure 45 : Données ambiantes de température et d'humidité relative utilisées sur la face extérieure du mur

### Quelques aspects clés du comportement d'une paroi en régime transitoire :

- **Diffusion thermique** : La chaleur se propage progressivement dans le matériau, en fonction de sa diffusivité thermique.
- **Réponse temporelle** : La température évolue avec le temps jusqu'à atteindre un état stable ou périodique.

- **Effet de la capacité thermique** : Les matériaux ayant une grande capacité thermique emmagasinent plus de chaleur et réagissent plus lentement aux changements de température.
- **Conditions aux limites** : L'interaction avec l'environnement (échanges convectifs ou radiatifs) influence le comportement thermique.

### 6.3 Comparaison entre régime stationnaire et régime transitoire :

Le régime transitoire et le régime stationnaire décrivent deux comportements thermiques distincts d'une paroi ou d'un système soumis à des variations de température.

- **Régime transitoire** : Lorsqu'un système subit une variation de température, il traverse une phase transitoire où la température évolue avec le temps jusqu'à atteindre un équilibre. Durant cette période, les transferts thermiques sont dynamiques et dépendent des propriétés thermiques du matériau et des conditions extérieures.
- **Régime stationnaire** : Une fois l'équilibre atteint, la température ne varie plus avec le temps. Les flux de chaleur restent constants et les propriétés du système sont stabilisées. Dans ce cas, les équations de conduction thermique deviennent beaucoup plus simples à résoudre, car il n'y a plus de dépendance temporelle.

L'analogie pourrait être celle d'une tasse de café chaud : au départ, elle refroidit progressivement (régime transitoire). Après un certain temps, si elle reste dans un environnement constant, elle atteint une température stable (régime stationnaire).

### Conclusion

La modélisation numérique du comportement hygrothermique d'un mur en bois isolé permet de mieux comprendre les échanges de chaleur et d'humidité au sein de la structure. Ce chapitre met en évidence l'importance de ces simulations pour optimiser la conception des bâtiments et assurer une meilleure performance énergétique et un confort intérieur accru.

En conclusion, l'utilisation de modèles numériques offre une approche efficace pour prévoir les variations thermiques et hydriques dans les parois en bois, réduisant ainsi les risques de condensation et de dégradation des matériaux. Cette analyse contribue également à améliorer la durabilité des constructions et à promouvoir des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement.

## Chapitre V

### Résultats et discussions

#### 1. Introduction :

L'analyse des résultats et des discussions obtenus grâce à COMSOL permet de mieux comprendre les phénomènes hygrothermiques affectant la performance du mur en bois isolé. Ce chapitre se concentre sur l'interprétation des simulations numériques, mettant en lumière les tendances observées et leur impact sur la conception du bâtiment.

À travers l'étude des variations de température, de flux de chaleur et de transferts d'humidité, cette section vise à expliquer les mécanismes sous-jacents et à comparer les résultats aux données expérimentales disponibles. L'objectif est d'évaluer la pertinence du modèle utilisé et d'identifier les améliorations potentielles pour affiner la prédiction du comportement hygrothermique du système étudié.

#### 2. Géométrie du modèle :

##### 2.1 Géométrie de model 1

Le modèle étude est la représentation 2D d'une portion de mur à ossature en bois exposée entre différentes conditions extérieures et intérieures. Le risque de condensation dans le mur est évalué grâce au calcul couplé du transport de chaleur et d'humidité. Des valeurs d'humidité relative proches de l'unité indiquent un risque de condensation.

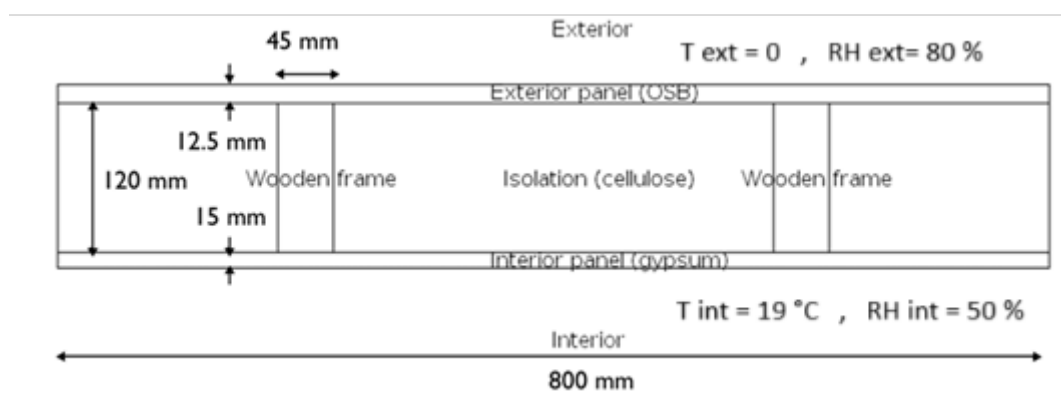


Figure 46: Géométrie du mur étudié.

### Le mur est composé des éléments suivants :

- Deux ossatures en bois pin.
- Trois panneaux isolants en cellulose
- Un contreventement en panneau de bois
- Un revêtement intérieur en plâtre de 800 mm de largeur.

De plus, un pare-vapeur en papier plastifié peut être placé entre le revêtement intérieur en plâtre et les panneaux isolants.

### 2.2 Géométrie de model 2 :

Cette simulation vise à déterminer quels paramètres des matériaux d'isolation thermique biogéniques utilisés dans un mur extérieur à ossature bois sans pare-vapeur ont la plus grande influence sur la performance à l'humidité.

De plus, l'objectif est de déterminer les caractéristiques de performance des matériaux importantes pour les matériaux d'isolation thermique biogéniques de classe d'humidité intérieure 3. Cette étude examine également les matériaux d'isolation thermique adaptés à un mur extérieur à ossature bois sans pare-vapeur traditionnel en polyéthylène (PE).

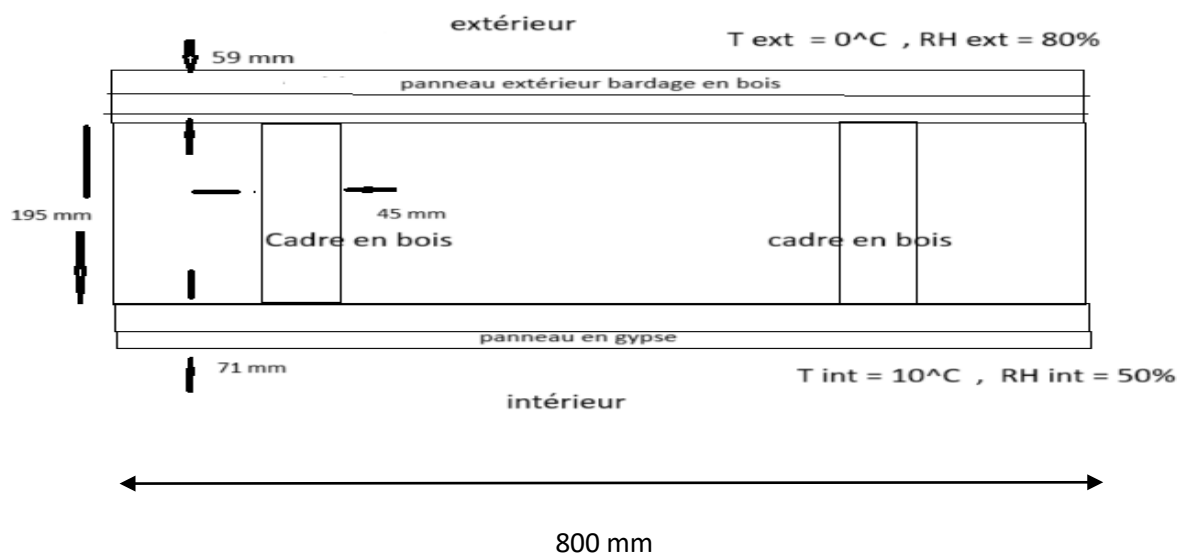


Figure 47: géométrie d'un mur étudié

### Le mur est composé des éléments suivants :

- Deux ossatures en bois pin.
- Trois panneaux isolants en cellulose

- Un contreventement en panneau de bois
- deux panneaux revêtement intérieur en plâtre de 800 mm de largeur.
- Cavité ventilé de 25 mm

De plus, un pare-vapeur en papier plastifié de 1 mm peut être placé entre le revêtement intérieur en plâtre et les panneaux isolants.

### 3. Conditions aux limites :

Des conditions de flux convectifs de chaleur et d'humidité sont appliquées aux limites supérieure et inférieure afin de modéliser les flux d'air extérieur et intérieur autour du mur. Les coefficients de transfert de chaleur extérieur et intérieur sont fixés à  $h_{\text{ext}} = 25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  et  $h_{\text{int}} = 8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

Les coefficients de transfert d'humidité extérieur et intérieur sont fixés à  $\beta_{\text{ext}} = 25 \cdot 10^{-8} \text{ s}/\text{m}$  et  $\beta_{\text{int}} = 8 \cdot 10^{-8} \text{ s}/\text{m}$ , conformément à l'analogie des couches limites de transfert de chaleur et de masse.

Les limites latérales sont supposées être totalement isolées de chaleur et d'humidité.

- Les conditions environnementales de fonctionnement étaient les suivantes :

$h_{\text{ext}}$	25 W/(m <sup>2</sup> ·K)	HT coefficient extérieur
$h_{\text{int}}$	8 W/(m <sup>2</sup> ·K)	HT coefficient intérieur
$T_{\text{ext}}$	273.15 K	Température extérieur
$T_{\text{int}}$	292.15 K	Température intérieur
$\Phi_{\text{ext}}$	0.8	Humidité relative extérieur
$\Phi_{\text{int}}$	0.5	Humidité relative intérieur

Tableau 22 : tableau exprimes Les conditions environnementales de fonctionnement

#### 4. Propriétés des matériaux :

Chaque matériau possède une densité et une capacité thermique spécifiques qui ne varient pas significativement sous des conditions normales de température et de pression. Ces valeurs sont déterminées expérimentalement et restent relativement stables.

##### 4.1 Propriété des matériaux Mur étudié (1<sup>ère</sup> variante) :

Couches	Densité thermique [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacité thermique [ J/(kg.K) ]	Facture de résistance e à la vapeur
Panneau extérieur (OSB )	646	1500	162
Isolation Cellulose	63	2000	2
Panneau intérieur (gypsum )	574	1100	6.9
Cadre en bois de pin	400	1880	/

Tableau 23 : Propriété des matériau de mur étudié (1<sup>ère</sup> variante)

##### 4.2 Propriétés des matériaux mur étudié (2<sup>ème</sup> variante) :

Couches	Densité thermique [kg/m <sup>3</sup> ]	Capacité thermique [ J/(kg.K) ]	Facture de résistance à la vapeur
Bardage en bois	420	1600	/
Isolations cellulose	63	2000	2
Cadre en bois de pin	400	1800	/
Panneau intérieur en gypse	574	1199	6.9

Tableau 24 : tableau de propreté des matériaux d'ossature en bois (2<sup>ème</sup> variante)

#### 5. Étude du mur (1<sup>ère</sup> variante) :

Le teneur en eau, la perméabilité a la vapeur et le coefficient de diffusion sont des paramètres essentiels pour comprendre le comportement hygrométrique d'une ossature en bois. Dans les figures suivantes, ces paramètres sont donnés sous forme de diagrammes :

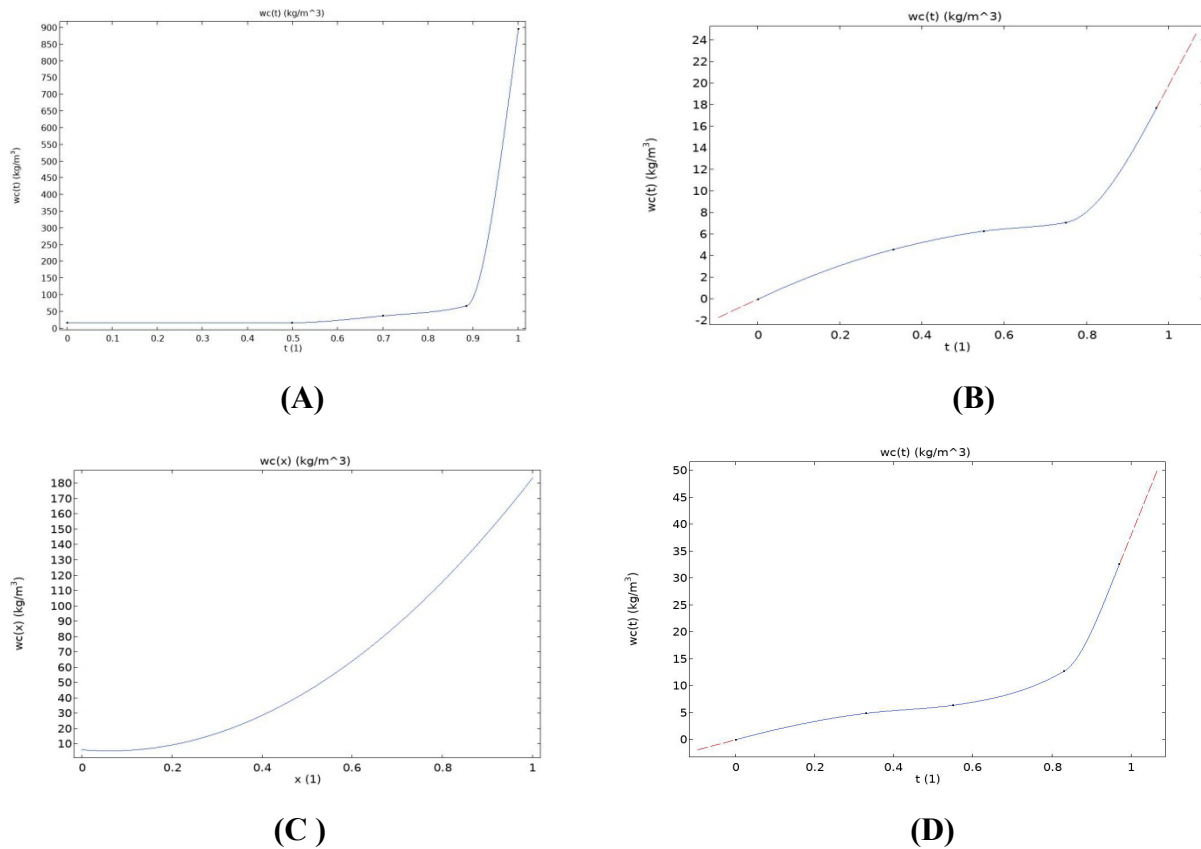


Figure 48 : Teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour les différents matériaux

- Diagramme (A) : la teneur en eau du bois de pin
- Diagramme (B) : la teneur en eau de panneau en gypse
- Diagramme (C) : la teneur en eau de panneau (OSB)
- Diagramme (D) : la teneur en eau d'isolation cellulosique

Le diagramme A B C et D de la teneur en eau illustre la quantité d'eau en fonction de l'humidité relative (%)

A titre d'exemple, La valeur de la teneur en eau est constante dans l'intervalle d'humidité relative  $\phi$ (%) compris entre ( 0 % à 60 % ). Lorsque  $\phi = 80 \%$  la valeur de la teneur en eau continue d'augmenter jusqu'à atteindre  $\phi = 100 \%$

$$W_c = 9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

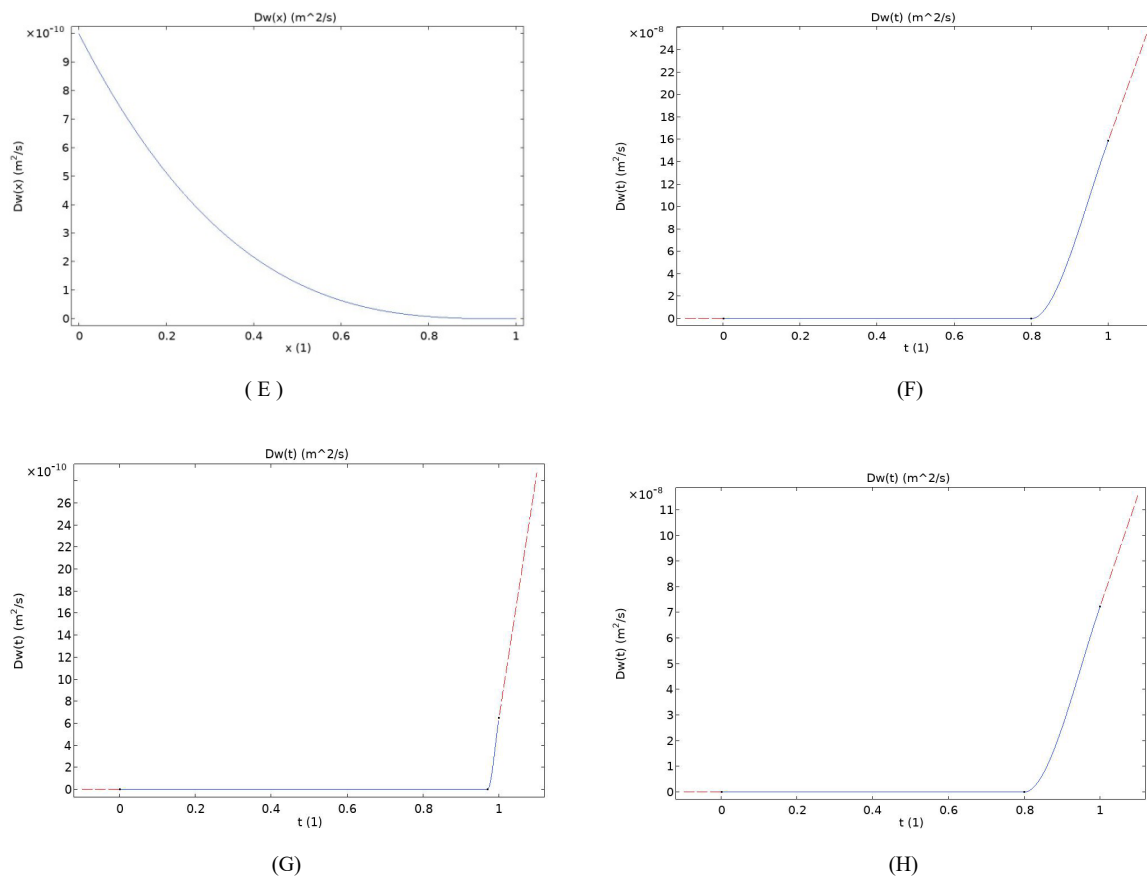


Figure 49 : Coefficient de diffusion en fonction de l'humidité relative pour les différents matériaux

**Diagramme (E)** : exprimé coefficient de diffusion en fonction de temps (s) illustre la capacité d'un matériau ou d'un fluide à laisser passer une substance (vapeur d'eau) sous l'effet d'un gradient de concentration.

À forte humidité relative, le bois absorbe plus d'eau, ce qui peut modifier son coefficient de diffusion

Lorsque les valeurs du coefficient de diffusion du bois de pin diminuent avec le temps, cela signifie que la capacité du matériau à **laisser passer la vapeur d'eau** ou d'autres substances ralentit.

- **Variation de l'humidité** : À mesure que la teneur en eau du bois augmente, ses pores peuvent se saturer, ce qui ralentit la diffusion de la vapeur d'eau.
- **Température plus basse** : Une température plus faible réduit l'agitation moléculaire, ce qui diminue la vitesse de diffusion.

- **Compression du matériau** : Un bois plus dense ou compacté voit ses espaces poreux réduits, ce qui limite la diffusion.
- **Traitements de surface** : Un revêtement hydrofuge ou un vernis peut ralentir la diffusion en réduisant la porosité du bois.
- **Orientation des fibres** : En direction radiale ou tangente, la diffusion est généralement plus faible qu'en direction longitudinale.

Et pour les diagrammes F G et H la courbe de variation du coefficient de diffusion est constante à l'intervalle ( 0 à 0.8 ) jusqu'à l'intervalle ( 0.8 à 1 ) commence à augmenter à cause de l'humidité

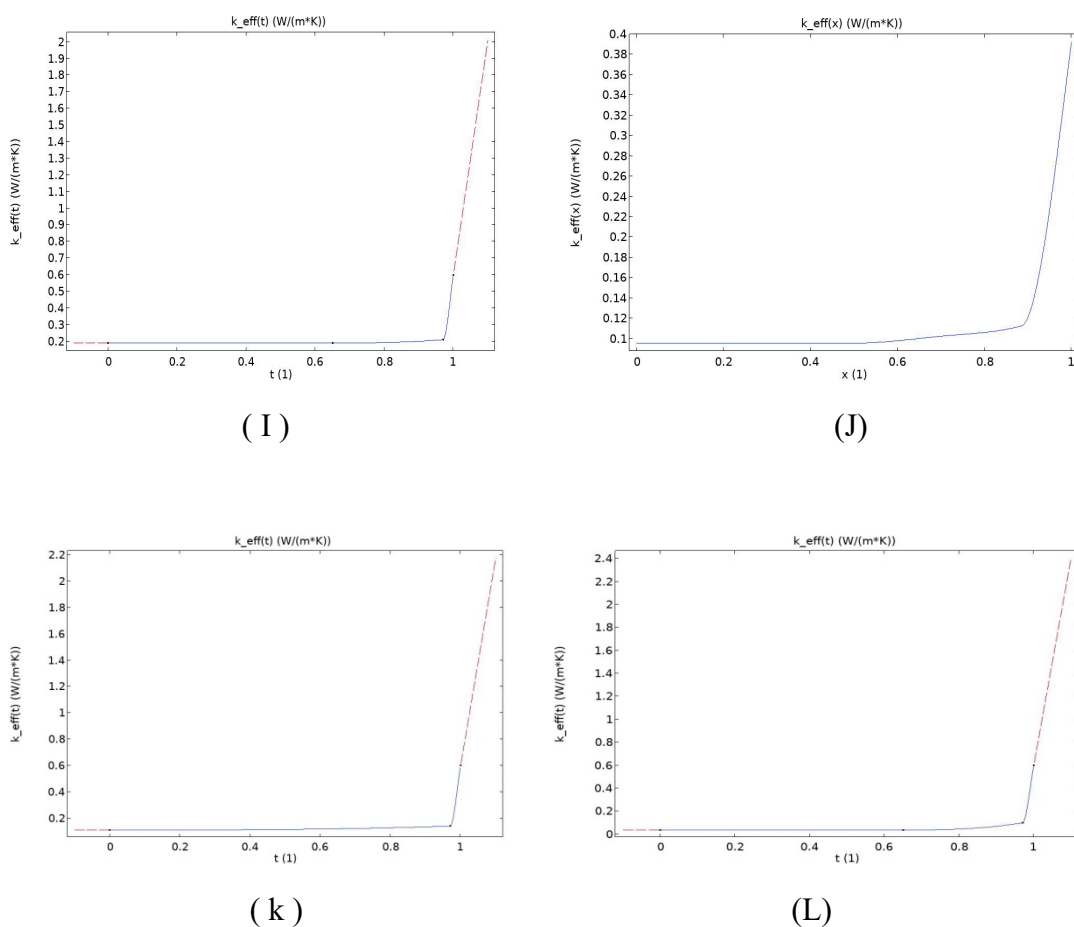


Figure 50 : Courbes de conductivité thermique en fonction de l'humidité relative pour les différents matériaux

- Diagramme (I) : la courbe de conductivité thermique de panneau en gypse
- Diagramme (J) : la courbe de conductivité thermique de bois pin
- Diagramme (K) : la courbe de conductivité thermique de panneau L'OSB
- Diagramme (L) : la courbe de conductivité thermique d'isolation cellulose

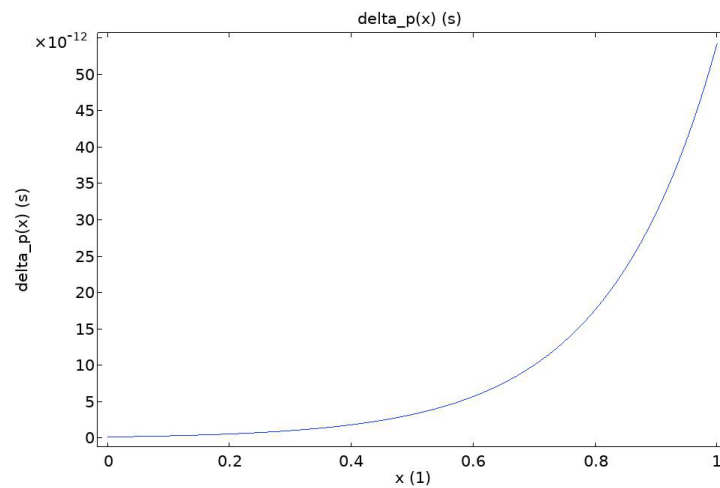


Figure 51 : Diagramme de perméabilité de la vapeur en fonction de l'humidité relative pour les différents matériaux

### 5.1 Distribution de température et de l'humidité sans pare-vapeur

Les distributions de température et d'humidité dues aux différentes conditions extérieures et intérieures sont présentées aux figures 3 et 4. Les valeurs d'humidité relative les plus élevées sont obtenues à proximité du contreventement.

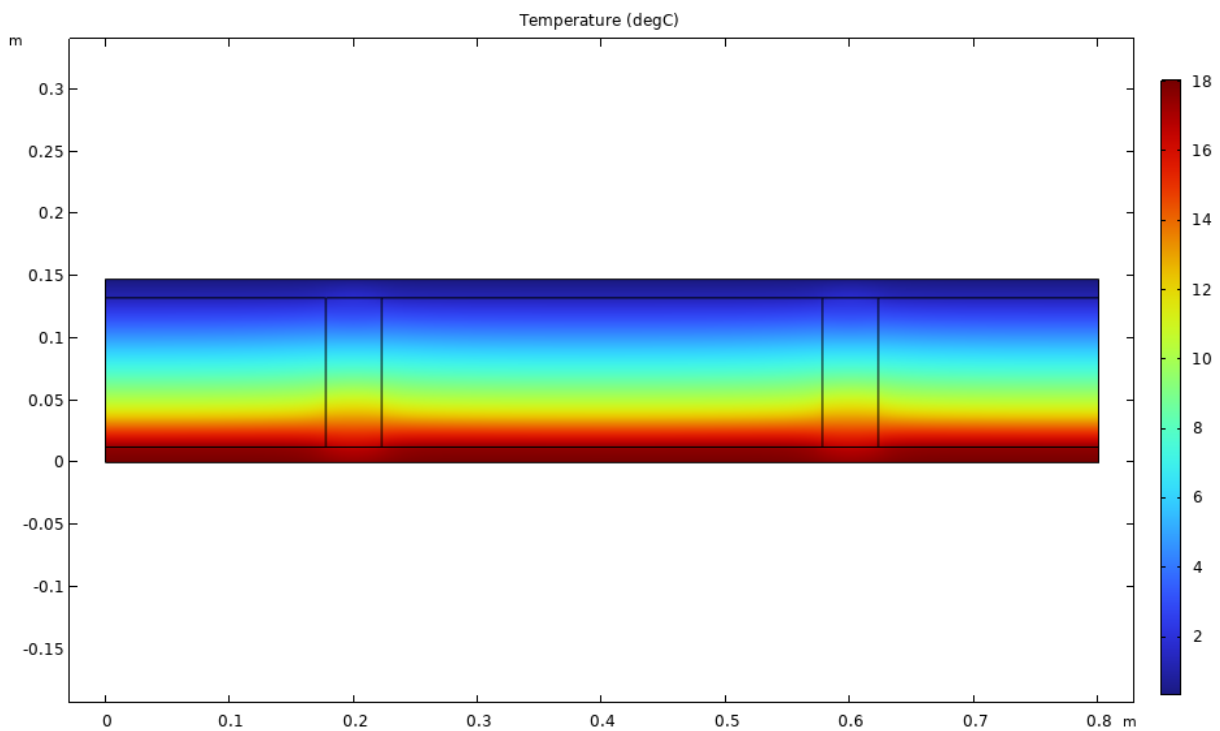


Figure 52 : Distribution de température, Régime stationnaire sans pare-vapeur mur 1

Dans un système stationnaire, la température à chaque point du mur reste constante dans le temps. Le flux de chaleur traverse les différentes couches en respectant leurs conductivités thermiques spécifiques.

## 5.2 Conductivité thermique des matériaux utilisés :

- **OSB (Oriented Strand Board)** : Matériau bois composite, il possède une conductivité thermique modérée. Il agit comme une barrière thermique intermédiaire, ralentissant légèrement le flux de chaleur.
- **Cellulose** : Souvent utilisée comme isolant thermique, la cellulose présente une faible conductivité thermique, ce qui en fait une excellente barrière contre les pertes de chaleur. Elle crée un gradient de température marqué dans sa couche
- **Plaque de gypse** : Avec une conductivité thermique relativement basse, elle agit comme un bon retardateur de chaleur, réduisant la transmission vers les zones intérieures.

### 2. Profil de température :

La température diminue progressivement à travers le mur, avec un gradient qui dépend des propriétés thermiques et de l'épaisseur des couches. La cellulose, étant un isolant, contribuera à une chute de température plus importante par rapport aux autres matériaux.

### 3. Résistance thermique :

Chaque matériau introduit une résistance thermique particulière qui influence la distribution globale. La résistance totale du mur est la somme des résistances des couches, ce qui détermine la quantité de chaleur transférée.

### 4. Conditions aux limites :

La température imposée sur les surfaces externe et interne du mur joue un rôle clé. Si, par exemple, l'extérieur est plus froid, le profil de température montrera une diminution rapide à travers les couches isolantes comme la cellulose.

En conclusion, l'OSB et la plaque de gypse jouent des rôles structurels et thermiques, tandis que la cellulose agit principalement comme un isolant thermique. L'étude des gradients de température et des flux thermiques pour ce type de mur est cruciale pour optimiser l'efficacité énergétique et le confort thermique.

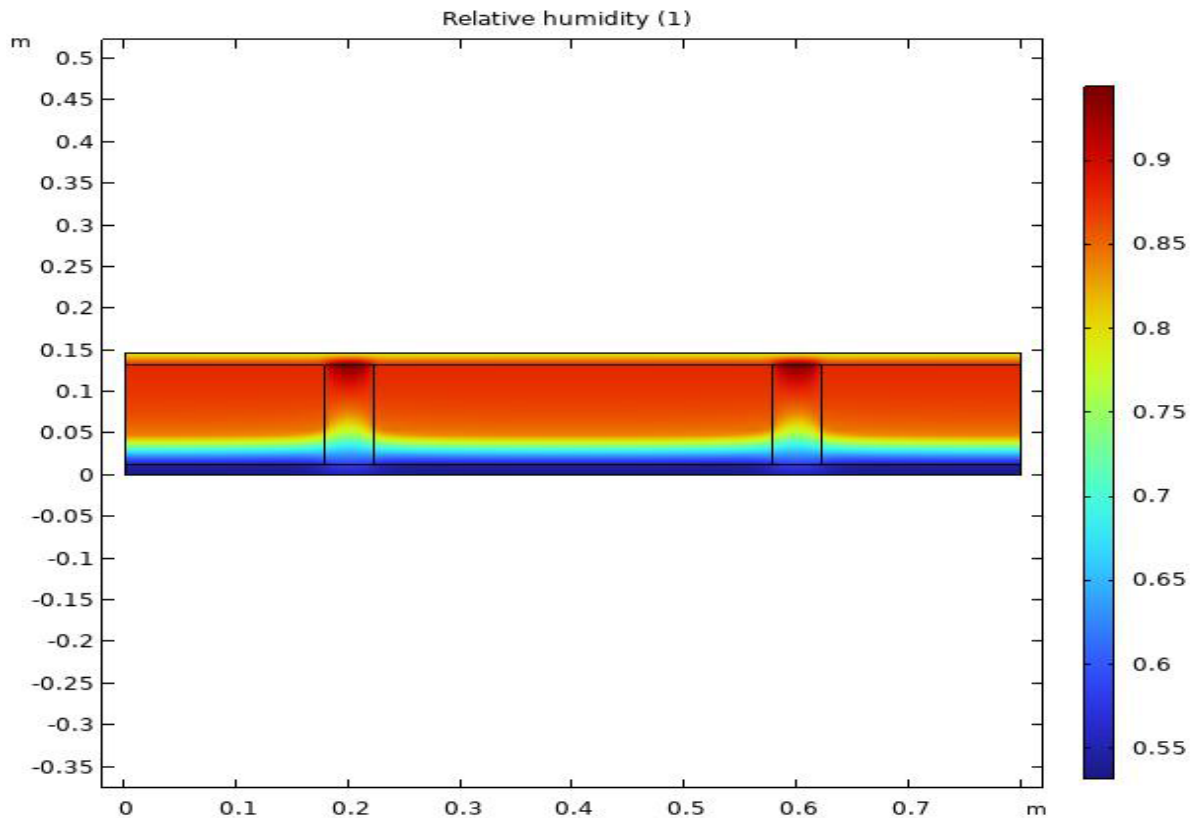


Figure 53 : Distribution de l'humidité relative, Régime stationnaire sans pare-vapeur.

La distribution de l'humidité dans figure 4 en régime stationnaire, est influencée par les propriétés hygroscopiques et la perméabilité à la vapeur d'eau des matériaux.

### 5.3 Propriétés des matériaux :

- **OSB (Oriented Strand Board)** : Ce matériau présente une perméabilité modérée à faible à la vapeur d'eau, ce qui en fait une barrière partielle. Cependant, en présence d'humidité prolongée, il peut absorber de l'eau, ce qui peut entraîner une dégradation structurale.
- **Cellulose** : Ce matériau isolant hygroscopique a la capacité de capter et de relâcher l'humidité en fonction des variations environnementales. Cela contribue à une régulation de l'humidité à travers le mur, mais une surcharge en humidité peut réduire ses propriétés isolantes.

- **Plaque de gypse** : Relativement perméable à la vapeur d'eau, elle facilite la diffusion de l'humidité. Toutefois, elle est sensible à une humidité excessive, ce qui peut conduire à des dommages comme la formation de moisissures.
- **Cadres en bois de pin maritime** : Ce bois, bien que relativement robuste, est fortement hygroscopique. Il absorbe et relâche l'humidité, mais une exposition prolongée à une humidité élevée peut provoquer un gonflement, une déformation ou même un pourrissement

#### 5.4 Diffusion de la vapeur d'eau :

En régime stationnaire, la vapeur d'eau se déplace d'une région de forte humidité vers une région de faible humidité selon un gradient. Les cadres en pin maritime peuvent perturber localement la distribution de l'humidité en raison de leur capacité à absorber l'eau. Cela pourrait entraîner des variations d'humidité non uniformes à travers les différentes couches.

##### 5.4.1 Risques de condensation :

Si la température chute suffisamment dans les couches, le point de rosée peut être atteint, particulièrement dans les zones proches de l'OSB ou des cadres en bois. Une condensation interne peut entraîner des dégradations, notamment dans les matériaux sensibles comme le pin maritime ou l'OSB.

##### 5.4.2 Gestion de l'humidité et solutions :

- L'ajout d'une membrane pare-vapeur côté intérieur (côté chaud) peut réduire les flux de vapeur d'eau à travers le mur, diminuant les risques de condensation.
- Un traitement hydrofuge du bois de pin maritime peut améliorer sa résistance à l'humidité.
- Une ventilation adéquate de l'environnement intérieur peut également limiter l'accumulation excessive d'humidité.

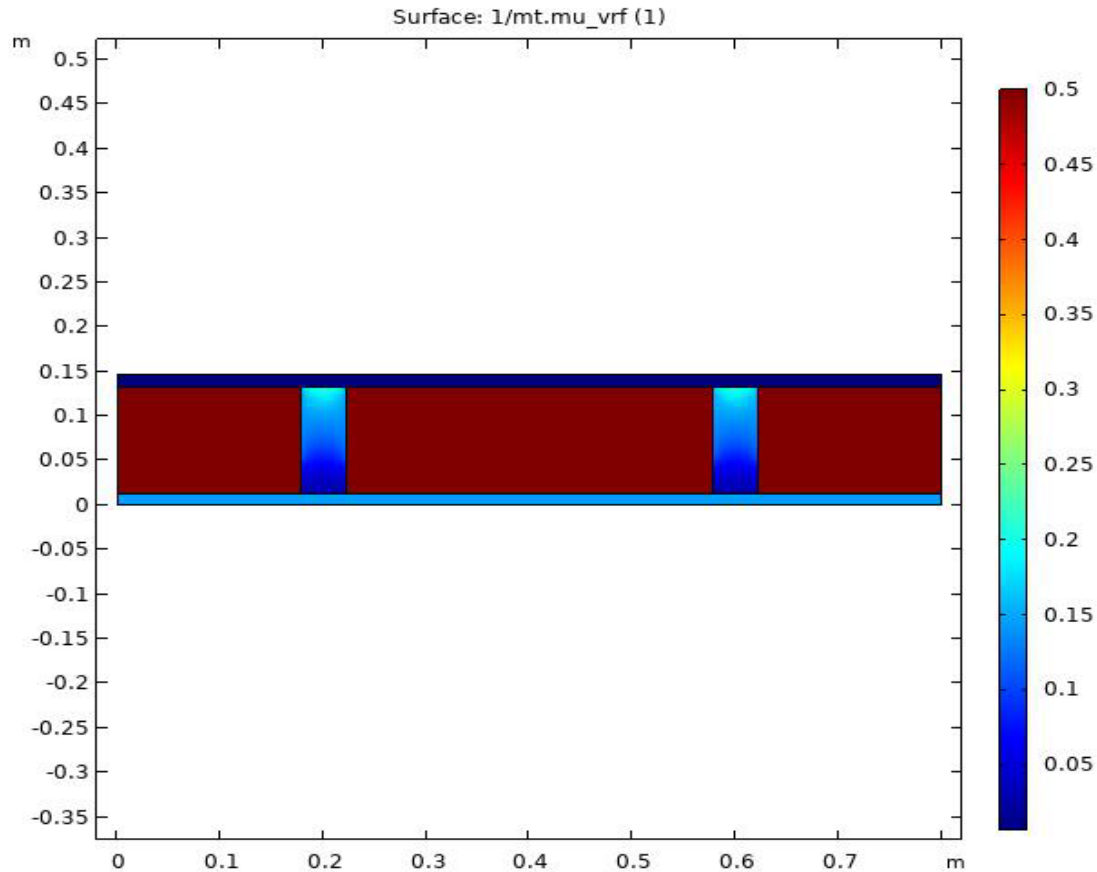


Figure 54 : perméabilité à la vapeur (sans pare-vapeur) mur 1

La cellulose est hygroscopique, c'est-à-dire qu'elle peut absorber et relâcher de la vapeur d'eau. Cela la rend idéale pour réguler l'humidité à l'intérieur du mur, tout en réduisant les risques de condensation. Cependant, elle doit être bien protégée contre une accumulation excessive d'humidité.

### 5.5 Effet du pare-vapeur sur la distribution de la chaleur et de l'humidité

Le graphique de la figure 55 montre que l'ajout d'un pare-vapeur entre le revêtement intérieur et l'isolant réduit le risque de condensation à l'interface entre l'ossature bois/l'isolant et le contreventement.

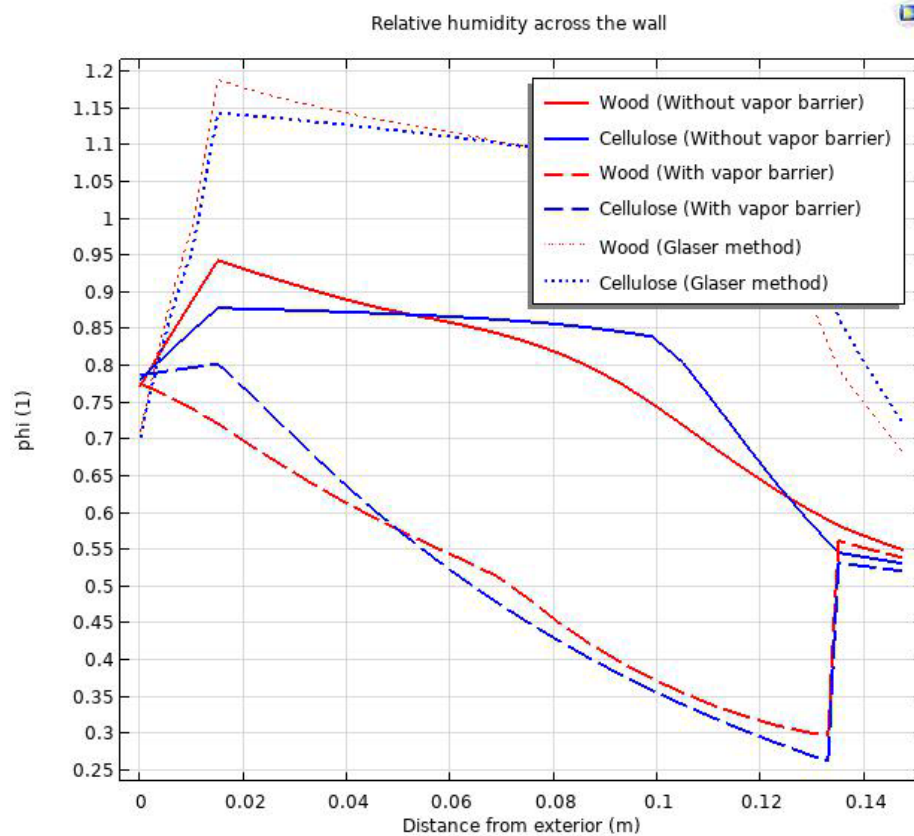


Figure 55 : Effet du pare-vapeur sur la répartition de l'humidité relative à travers le mur, dans la charpente en bois et dans l'isolation. L'effet sur la distribution de la température est illustré.

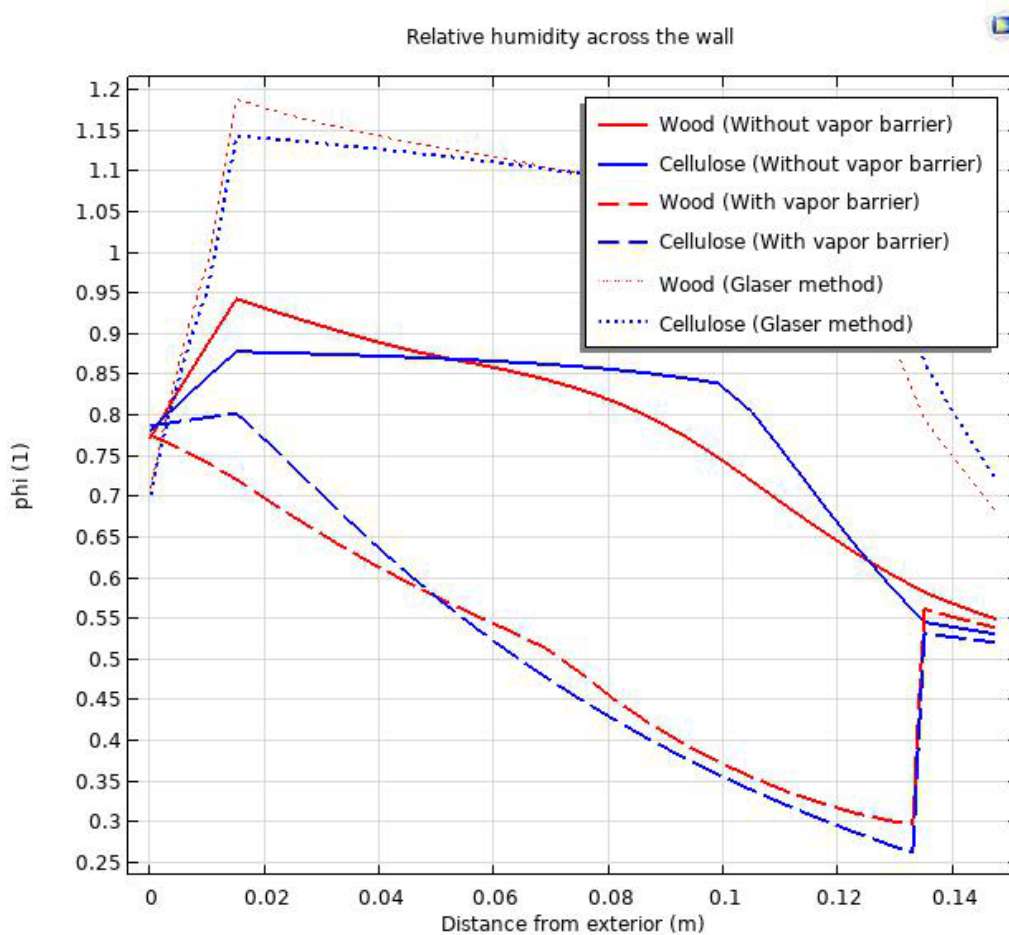


Figure 56 : Effet du pare-vapeur sur la répartition de la température à travers le mur, dans la structure en bois et dans l'isolation

### 5.6 Comparaison des approches de modélisation :

La méthode de Glaser surestime l'humidité relative et donc le risque de condensation, en ne prenant pas en compte le transport liquide, qui devient important lorsque l'humidité relative est élevée, à proximité du contreventement. L'effet sur la température et la distribution de l'humidité est illustré aux figures 7 et 8.

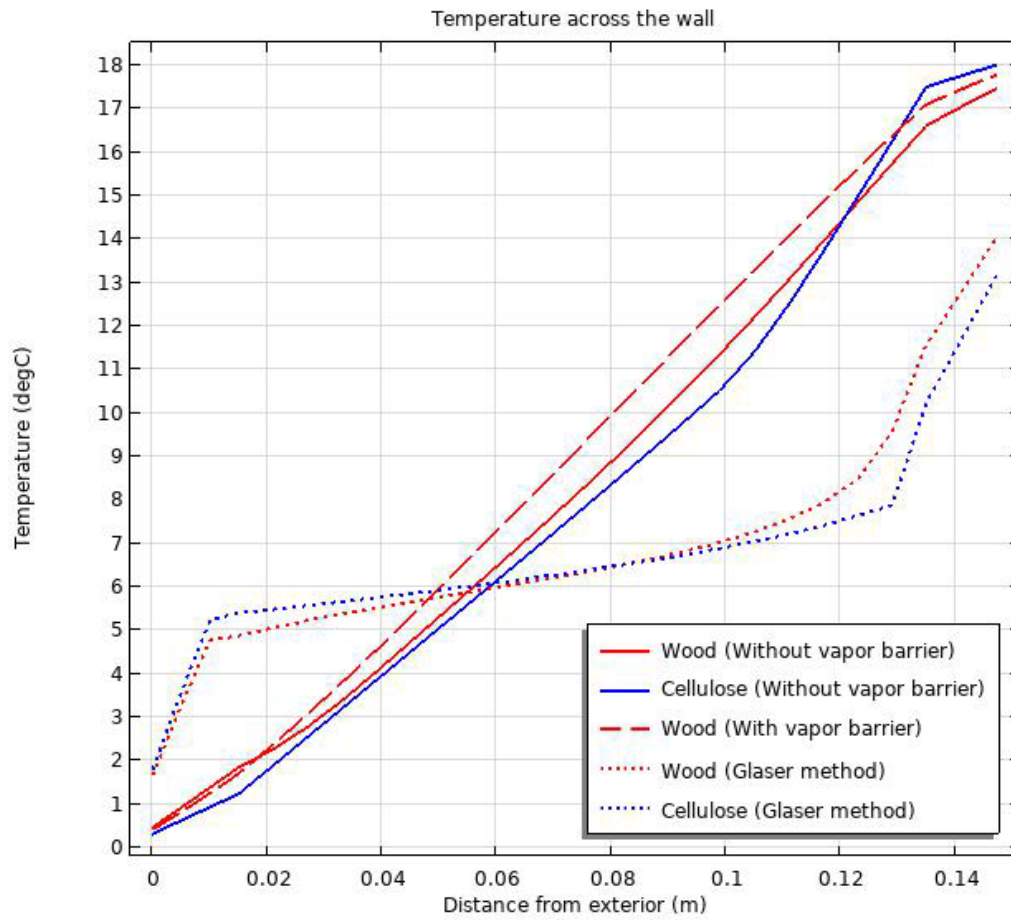


Figure 57 : Comparaison des approches de modélisation de la distribution de la température à travers le mur, dans la structure en bois et dans l'isolation.

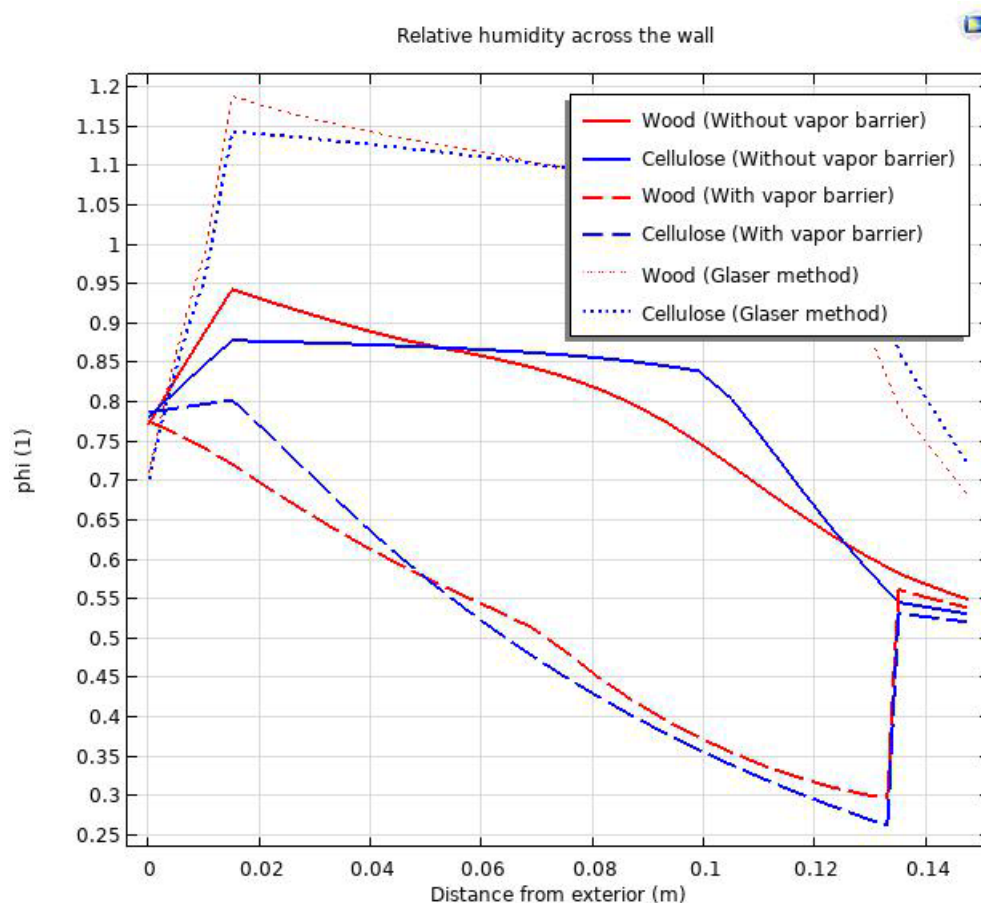


Figure 58 : Comparaison des approches de modélisation de la distribution de l'humidité relative à travers le mur, dans l'ossature bois et dans l'isolation

La comparaison de la température et de l'humidité relative dans un mur multicouche composé d'OSB, de cellulose, de plaque de gypse, avec des cadres en bois de pin maritime, en régime stationnaire, révèle des interactions complexes qui influencent la performance thermique et hygroscopique du système.

## 1. Température :

**1.1 Gradients thermique :** La distribution de la température est principalement dictée par les propriétés thermiques des matériaux.

- **Cellulose :** En tant qu'isolant, elle crée une chute de température marquée, ralentissant le flux de chaleur et jouant un rôle central dans l'efficacité thermique globale du mur.
- **OSB et Plaque de gypse :** Ces matériaux introduisent des gradients thermiques modérés, permettant une transition de la chaleur plus progressive.

- **Cadres en bois de pin maritime** : Leur conductivité intermédiaire peut engendrer des variations localisées dans le profil thermique.

**1.2 Impact sur les performances** : Les zones contenant des cadres en pin maritime peuvent présenter des températures légèrement différentes des couches homogènes, ce qui peut modifier la répartition thermique globale du mur.

## 2. Humidité relative :

### 2.1. Hygroscopicité des matériaux :

- **Cellulose** : Sa capacité à absorber et à relâcher l'humidité contribue à une régulation uniforme de l'humidité relative, mais elle peut être affectée en cas d'humidité excessive.
- **OSB et Plaque de gypse** : Modérément perméables à la vapeur d'eau, ces matériaux influencent le flux d'humidité à travers le mur. Cependant, une accumulation prolongée d'humidité pourrait entraîner des risques de dégradation, notamment dans l'OSB.
- **Cadres en bois de pin maritime** : En raison de leur forte hygroscopicité, les cadres en pin maritime peuvent absorber l'humidité environnante, avec des risques de gonflement ou de pourrissement si l'humidité est mal gérée
- **Cellulose** : Sa capacité à absorber et à relâcher l'humidité contribue à une régulation uniforme de l'humidité relative, mais elle peut être affectée en cas d'humidité excessive.
- **OSB et Plaque de gypse** : Modérément perméables à la vapeur d'eau, ces matériaux influencent le flux d'humidité à travers le mur. Cependant, une accumulation prolongée d'humidité pourrait entraîner des risques de dégradation, notamment dans l'OSB.
- **Cadres en bois de pin maritime** : En raison de leur forte hygroscopicité, les cadres en pin maritime peuvent absorber l'humidité environnante, avec des risques de gonflement ou de pourrissement si l'humidité est mal gérée

### 3. Comparaison des interactions :

- **Corrélation température-humidité** : Les zones à faible température sont souvent celles où l'humidité relative est plus élevée, en raison de la réduction de la capacité de l'air à retenir la vapeur d'eau. Cela augmente le risque de condensation.
- **Effet des matériaux** : Les matériaux isolants comme la cellulose jouent un rôle clé dans la gestion thermique, tandis que les cadres en pin maritime et l'OSB demandent une attention particulière pour éviter des problèmes liés à l'humidité

### 5.7 Distribution de température et de l'humidité régime variable

Le régime variable désigne une situation où les conditions de fonctionnement d'un système évoluent au fil du temps, contrairement à un régime permanent où les paramètres restent constants. Dans le contexte du comportement hygrothermique d'un mur en bois isolé, l'étude du régime variable permet de comprendre comment les flux de chaleur et d'humidité réagissent aux changements environnementaux, tels que les variations de température et d'humidité extérieure.

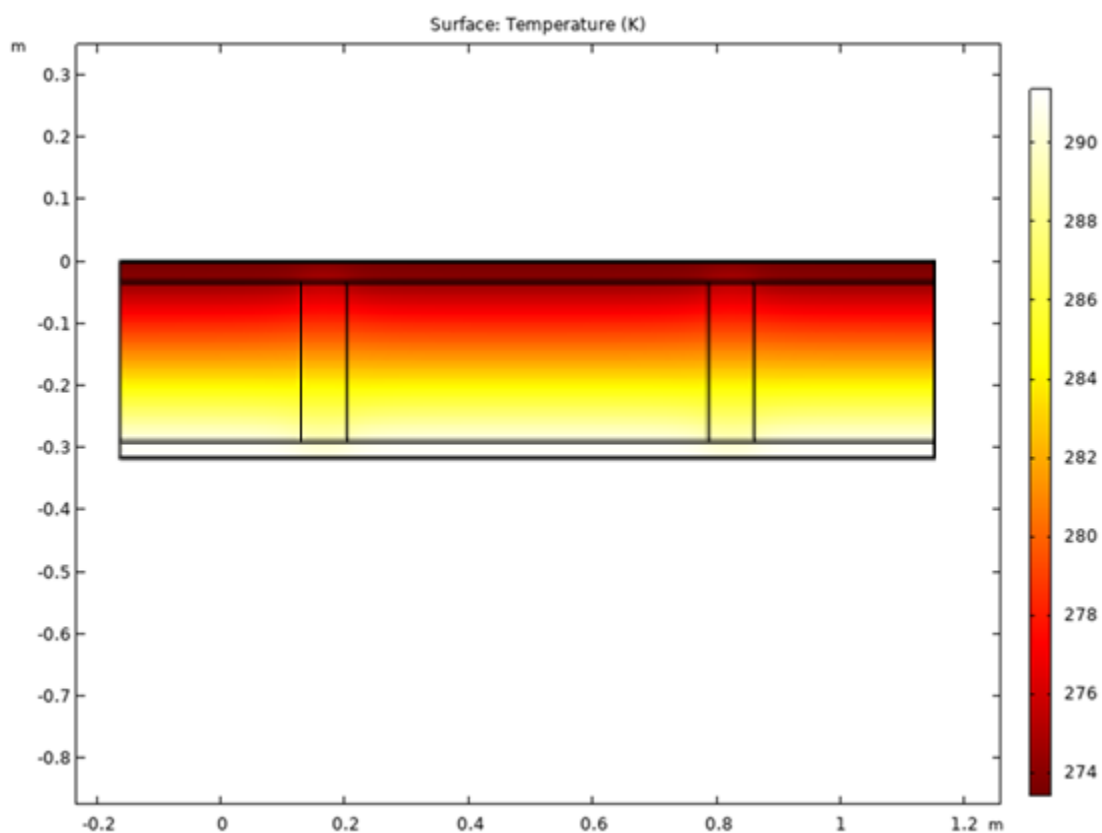


Figure 59 : distribution de la température étude régime variable

L'analyse du diagramme de distribution de la température dans l'étude du régime variable permet d'identifier les fluctuations thermiques au sein du mur en bois isolé. Ce diagramme met en évidence les variations spatiales et temporelles de la température en fonction des conditions environnementales changeantes.

1. **Gradient thermique à travers les matériaux** : Chaque couche joue un rôle spécifique dans la régulation de la température. L'OSB peut retenir une certaine chaleur, tandis que l'isolation en cellulose limite les pertes thermiques et améliore l'inertie thermique du mur. Les panneaux en gypse influencent la répartition interne de la température en offrant une certaine capacité d'absorption thermique
2. **Influence du régime variable** : Lorsqu'il y a des fluctuations de température, les variations sont plus prononcées au niveau des interfaces entre les différents matériaux. Une bonne conception permet de minimiser ces variations et d'améliorer le confort thermique à l'intérieur du bâtiment.
3. **Effet de l'isolation en cellulose** : Cette couche agit comme un tampon thermique, réduisant les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur. Son efficacité dépend de sa densité et de sa conductivité thermique.

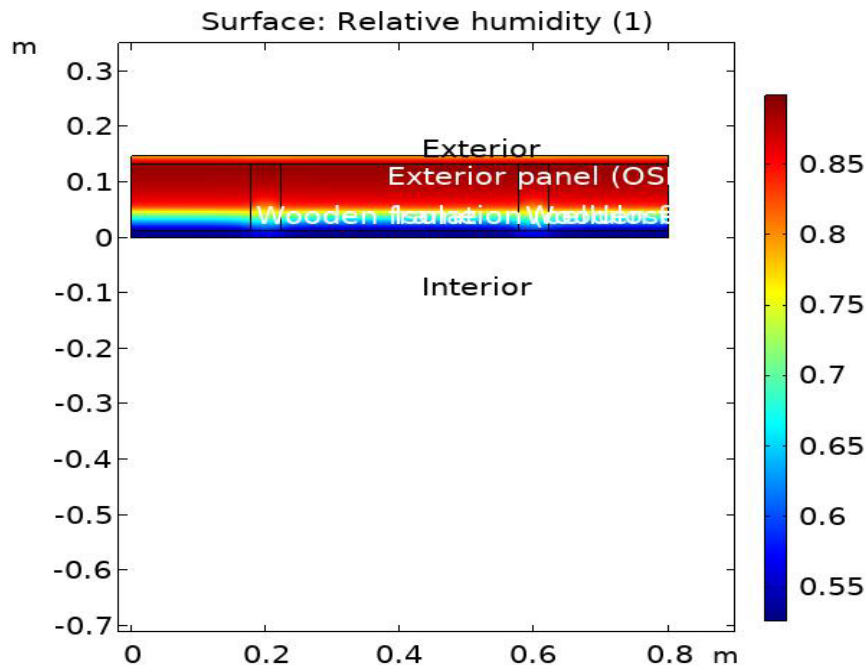


Figure 60 : distribution de la relative humidité étude régime variable

L'analyse de la distribution de l'humidité relative dans l'étude du régime variable met en évidence les variations hygrométriques à travers les différentes couches du mur multicouche. Ces fluctuations sont essentielles pour comprendre les effets des changements environnementaux sur la performance globale du mur.

### **Analyse du diagramme :**

1. **Répartition de l'humidité à travers les matériaux** : Chaque matériau réagit différemment à l'humidité. L'OSB, avec sa perméabilité modérée, influence la diffusion de la vapeur d'eau, tandis que l'isolation en cellulose joue un rôle tampon en absorbant et restituant l'humidité selon les variations hygrométriques.
2. **Effet du régime variable** : Les variations de température et d'humidité modifient les conditions internes du mur. Une humidité excessive peut être problématique, notamment en cas de condensation dans les zones sensibles.
  1. **Zones à risque de condensation** : Les interfaces entre matériaux aux propriétés de l'interface entre l'OSB et l'isolant en cellulose, ou entre l'isolation et les panneaux de gypse, mérite une attention particulière pour éviter l'accumulation d'humidité.
  2. **Impact sur la durabilité du mur** : Une mauvaise gestion de l'humidité peut provoquer des dégradations prématurées des matériaux, telles que le développement de moisissures ou la détérioration des performances thermiques. Un bon équilibre entre étanchéité et perméabilité à la vapeur est donc crucial.

L'interprétation de ce diagramme est essentielle pour ajuster la conception des structures et limiter les effets négatifs liés aux variations hygrométriques.

### **6. Maillage :**

Le maillage de la géométrie étudié comprend 530 domaines, 264 frontières pour une qualité de maillage moyenne de 0.3794

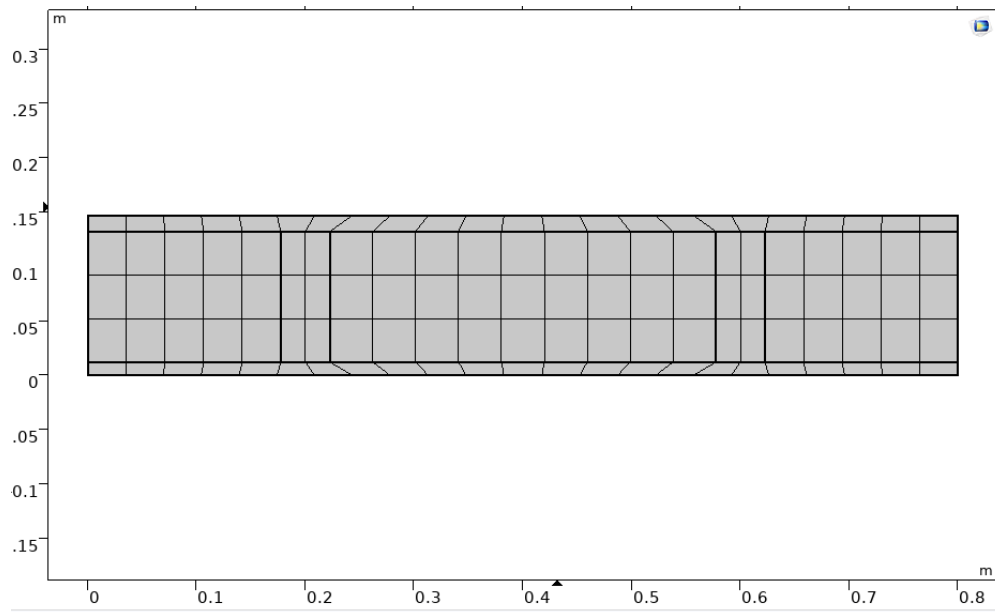


Figure 61 : Maillage d'étude mur étudié (1<sup>ère</sup> variante)

## Conclusion

La gestion conjointe de la température et de l'humidité relative dans ce mur multicouche nécessite une conception précise et une intégration de membranes pare-vapeur pour minimiser les risques de condensation et améliorer la durabilité des matériaux.

## 7. Étude du mur (2<sup>ème</sup> variante) :

Le teneur en eau, la perméabilité a la vapeur et le coefficient de diffusion sont des paramètres essentiels pour comprendre le comportement hygrométrique d'une ossature en bois.

Dans les figures suivantes, ces paramètres sont donnés en formes de diagrammes

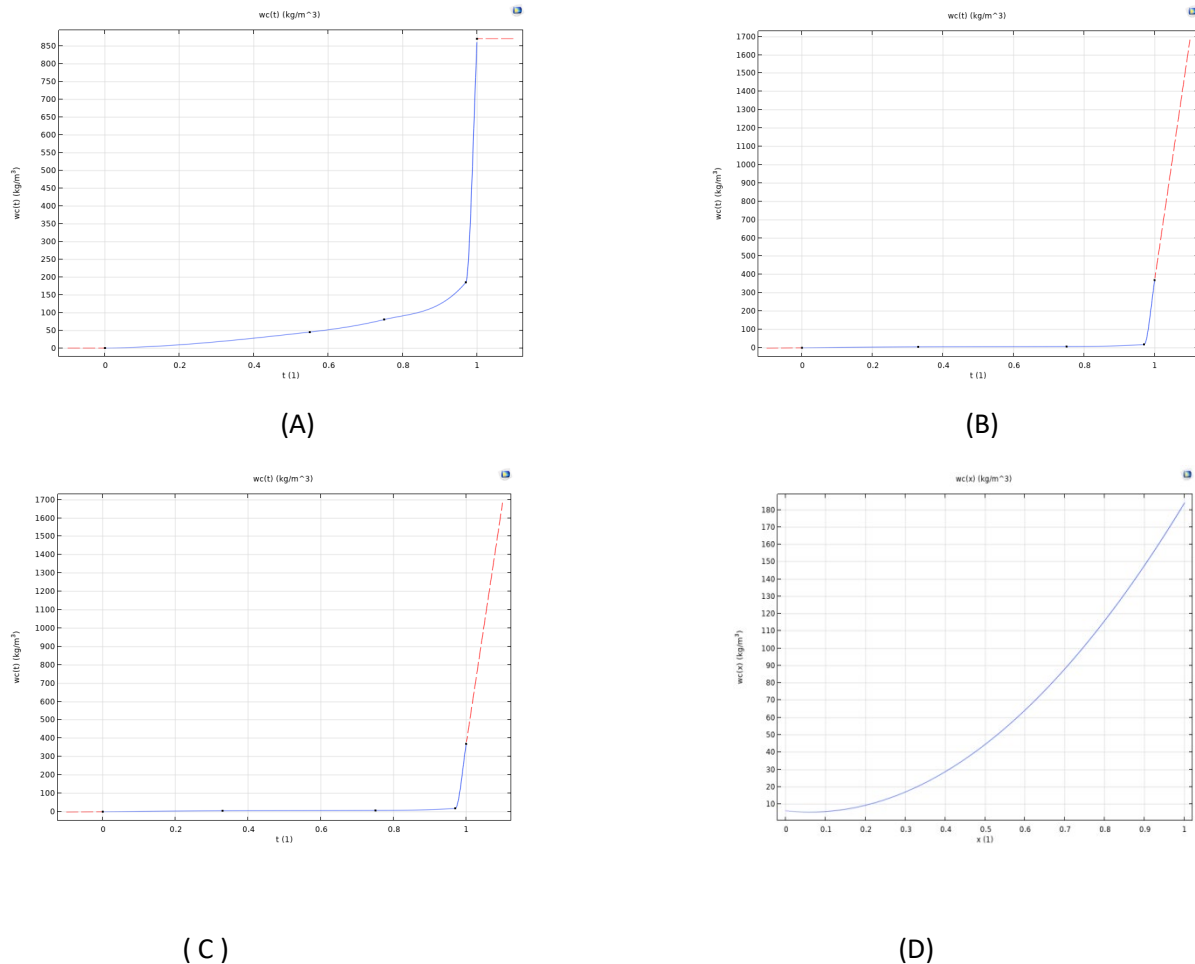


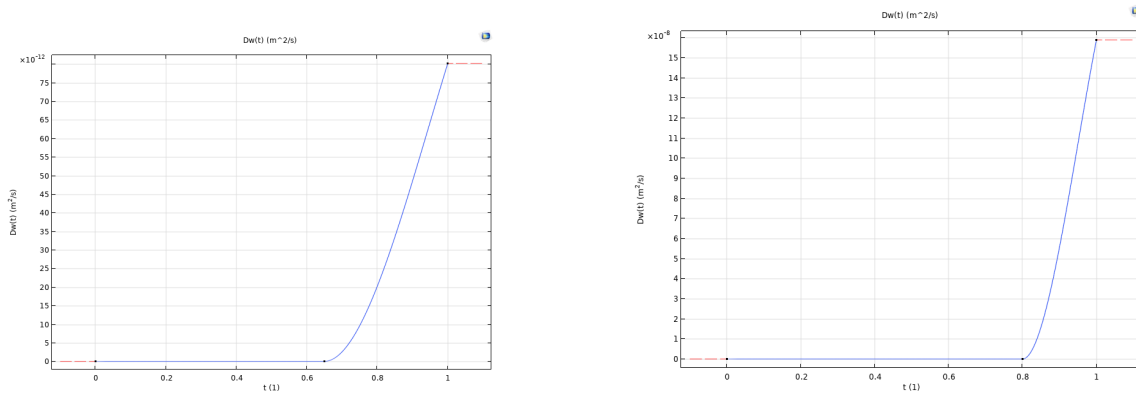
Figure 62 : Teneur en eau en fonction de l'humidité relative pour les différents matériaux

**Diagramme (A) :** la courbe de la teneur en eau en fonction de temps (s) de couche cadre en bois pi,

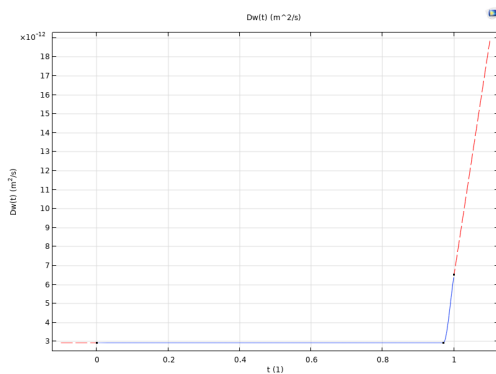
**Diagramme (B) :** la courbe exprime la courbe de la teneur en eau de couche cellulose

**Diagramme (C) :** la courbe de la teneur en eau en fonction de temps (s) du couche de panneau en gypse

**Diagramme D :** la courbe de la teneur en eau en fonction de temps du couche de panneau de revêtement en bois



( E )



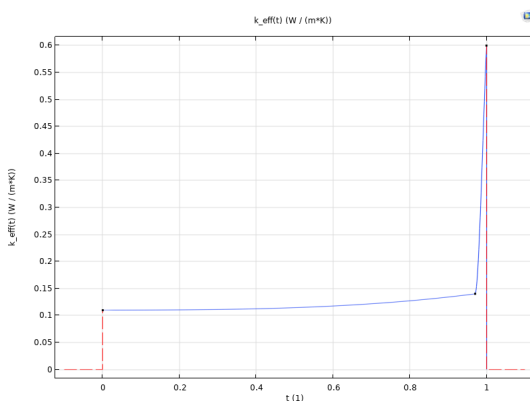
( G )

Figure 63 : Coefficient de diffusion en fonction de l’humidité relative pour les différents matériaux

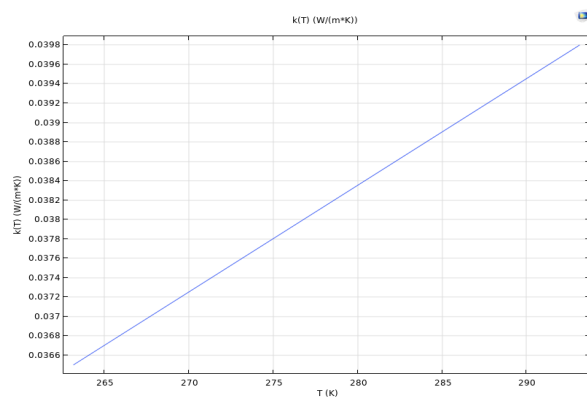
**Diagramme (E) :** la courbe de coefficient de diffusion en fonction de temps (s) des cadres en bois

**Diagramme (F) :** la courbe de coefficient de diffusion en fonction de temps (s) d’isolation cellulose

**Diagramme (G) :** la courbe de coefficient de diffusion en fonction de temps (s) de panneau de revêtement en bois



( H )



( I )

Figure 64 : Courbes de conductivité thermique en fonction de la température

Diagramme (H) : la courbe de conductivité thermique en fonction de temps (s) de panneau revêtement en bois

Diagramme (I) : la courbe de conductivité thermique en fonction de temps (s) des cadres bois pin

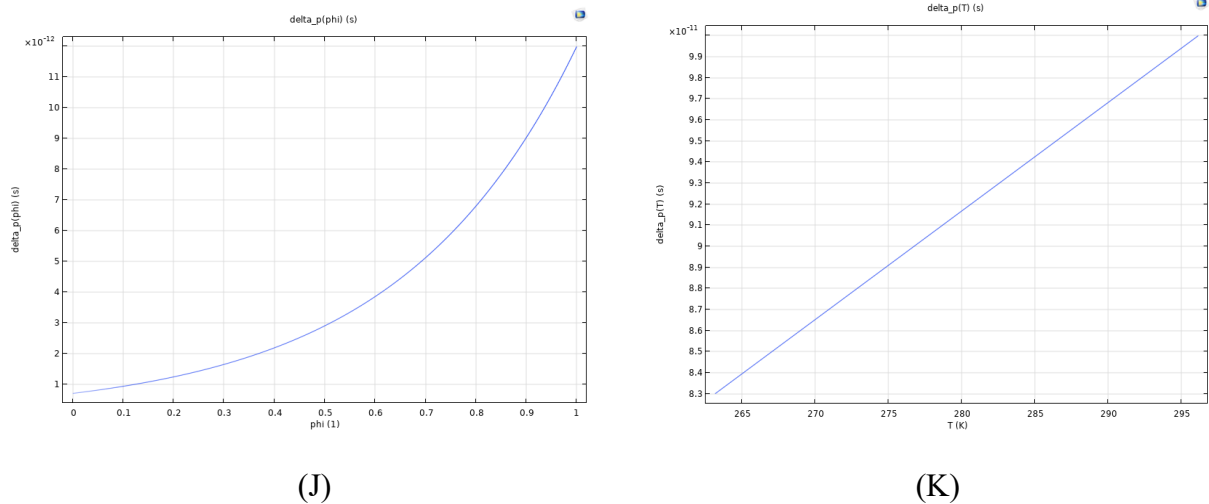


Figure 65: les diagrammes (J) et (K) les courbe de la perméabilité de la vapeur en fonction de l'humidité relative

**Diagramme (J)** : la courbe de la perméabilité de la vapeur des cadres en bois pin

**Diagramme (K)** : la courbe de permeabilité en fonction de l'humidité relative de panneau revêtement en bois

### 6.1 Distribution de température et de l'humidité sans pare-vapeur :

Les distributions de température et d'humidité dues aux différentes conditions extérieures et intérieures sont présentées aux figures 66 et 67. Les valeurs d'humidité relative les plus élevées sont obtenues à proximité du contreventement.

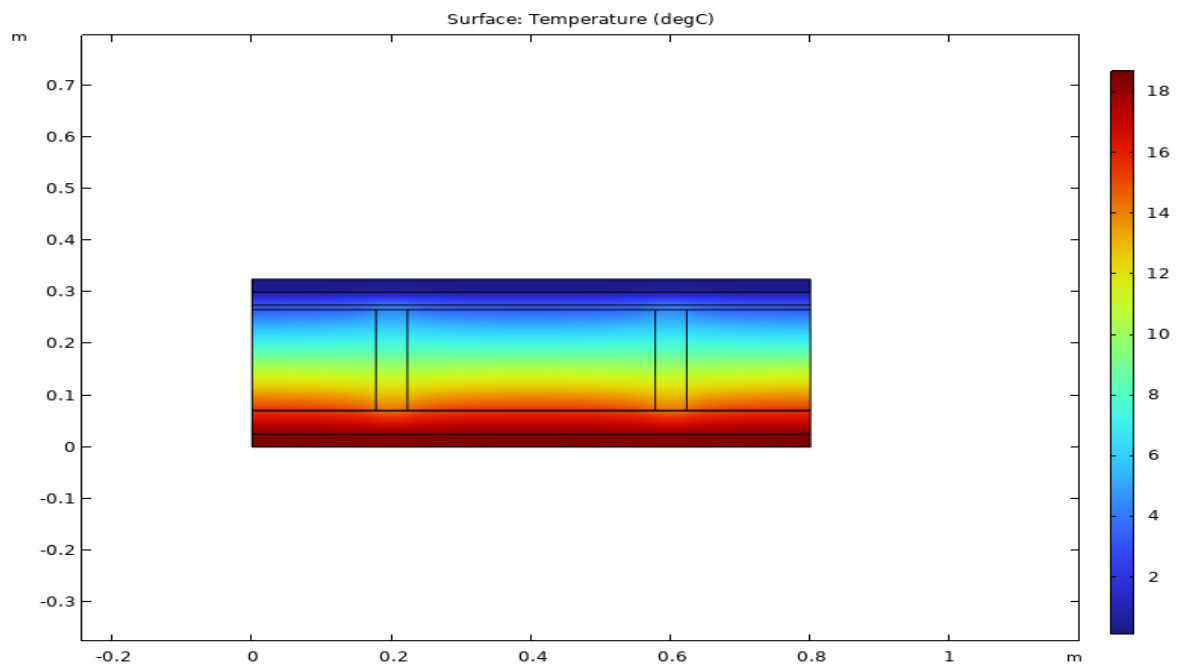


Figure 66 : Distribution de température, étude stationnaire sans pare-vapeur

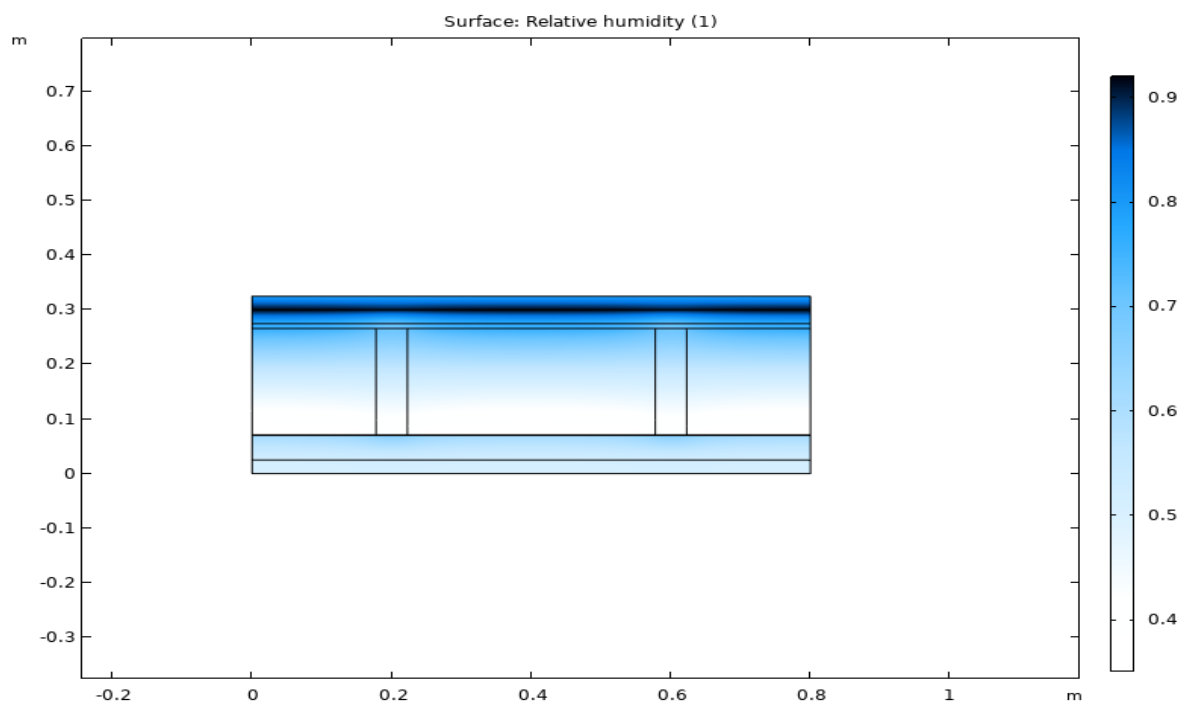


Figure 67 : Distribution de l'humidité relative , étude stationnaire sans pare-vapeur

## 6.2 Distribution de température et de l'humidité avec pare-vapeur :

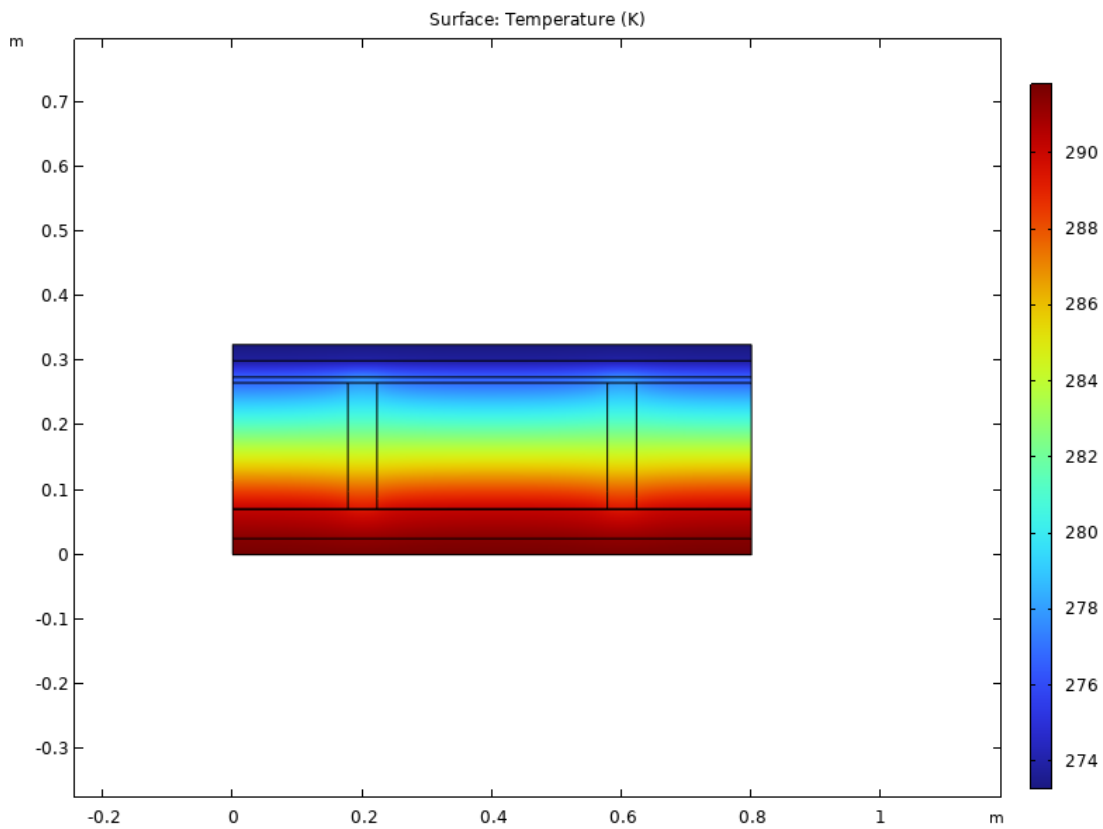


Figure 68 : Distribution de température, étude stationnaire avec pare-vapeur

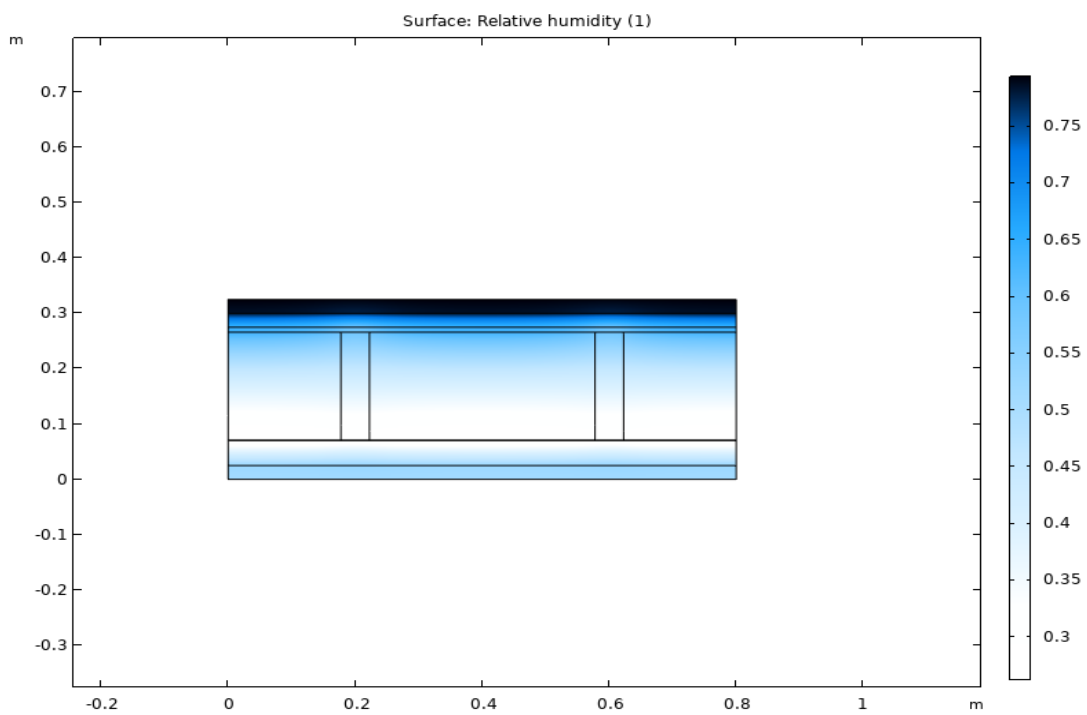


Figure 69 : Distribution de l'humidité relative, étude stationnaire avec pare-vapeur

### 6.3 Comparaison des approches de modélisation :

La méthode de Glaser surestime l'humidité relative et donc le risque de condensation, en ne prenant pas en compte le transport liquide, qui devient important lorsque l'humidité relative est élevée, à proximité du contreventement. L'effet sur la température et la distribution de l'humidité est illustré aux figures 70 et 71 .:

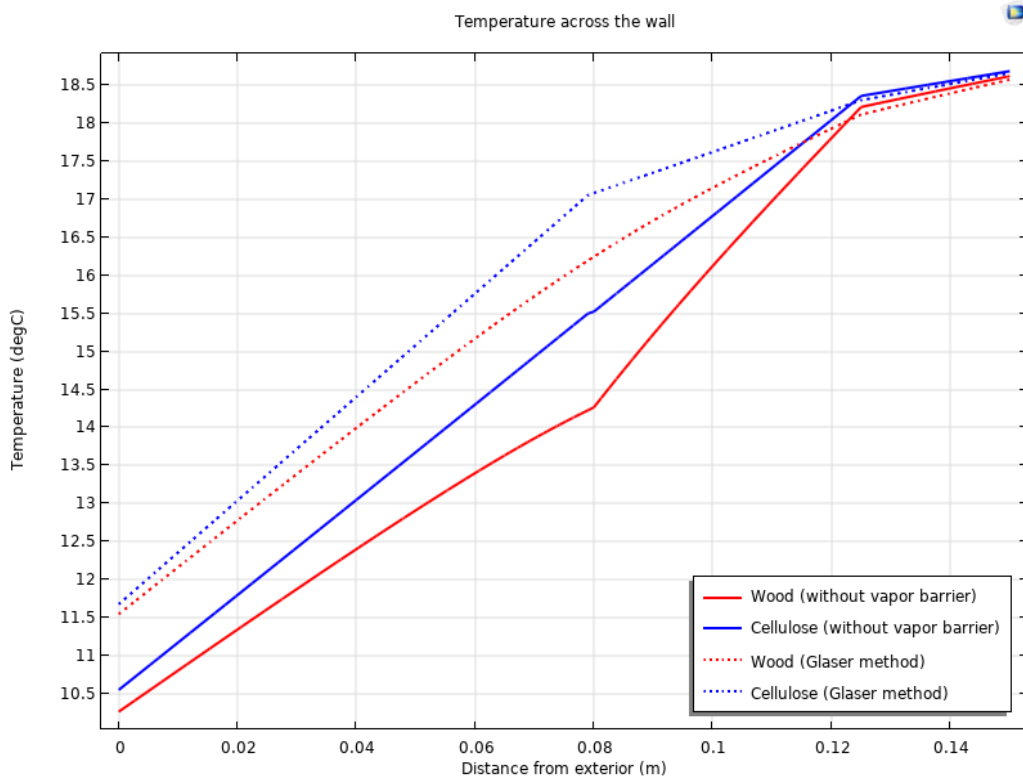


Figure 70 : Comparaison des approches de modélisation de la distribution de la température à travers le mur, dans la structure en bois et dans l'isolation

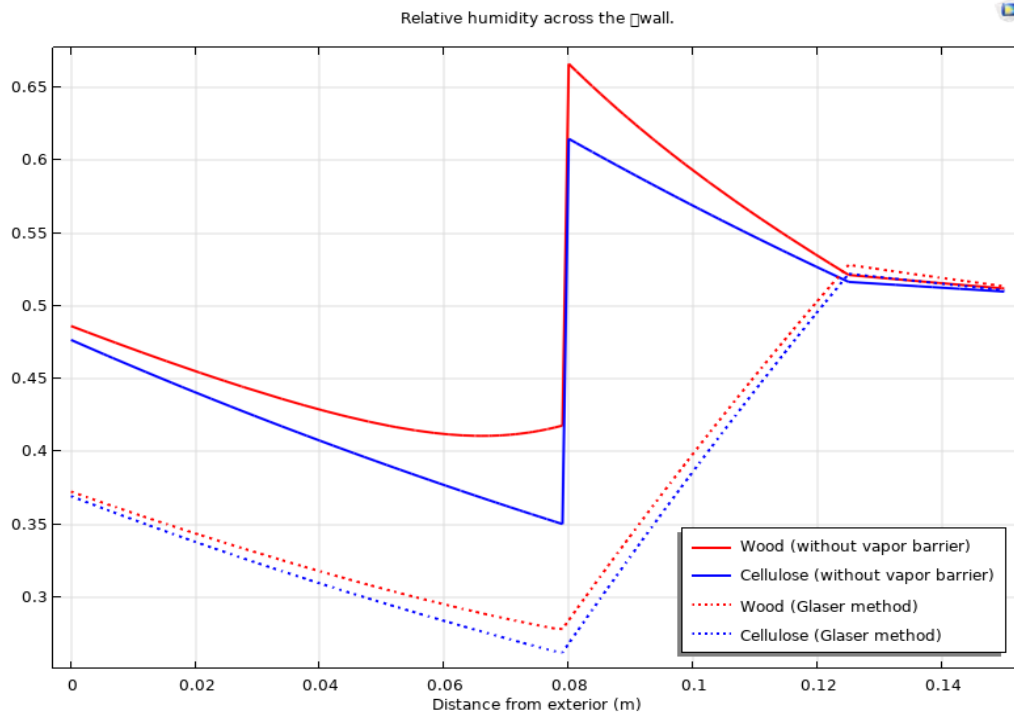


Figure 71 : Comparaison des approches de modélisation de la distribution de l'humidité relative à travers le mur, dans l'ossature bois et dans l'isolation

#### 6.4 Distribution de température et de l'humidité régime variable

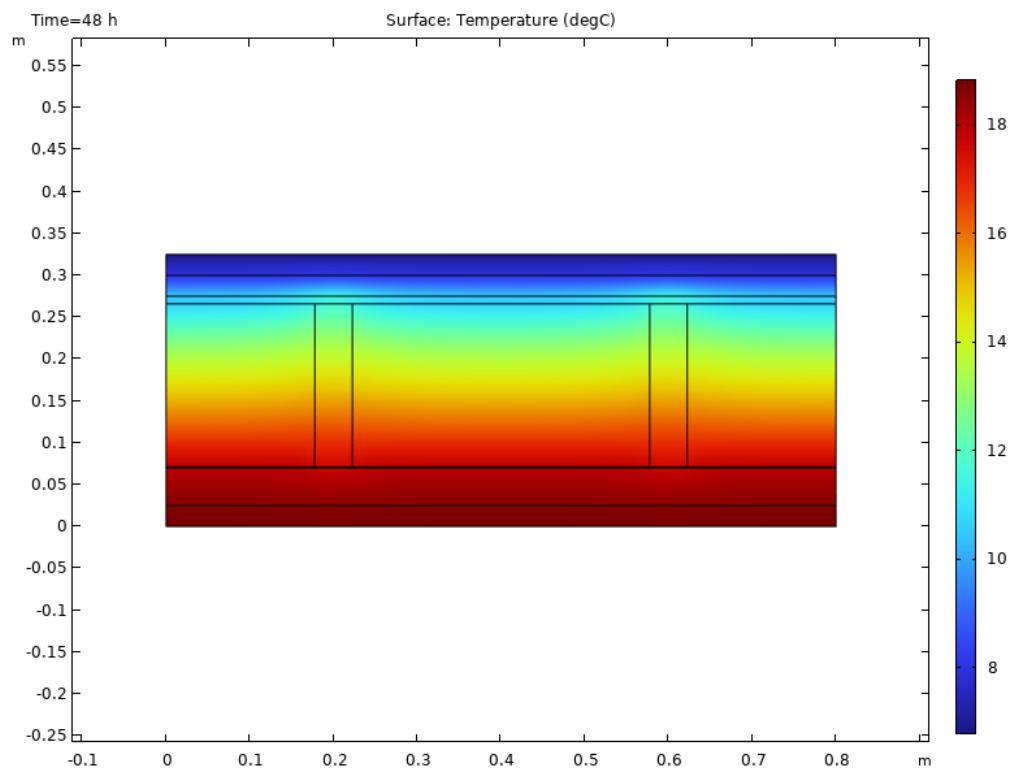


Figure 72 : Distribution de température, étude régime variable (2<sup>ème</sup> variante)

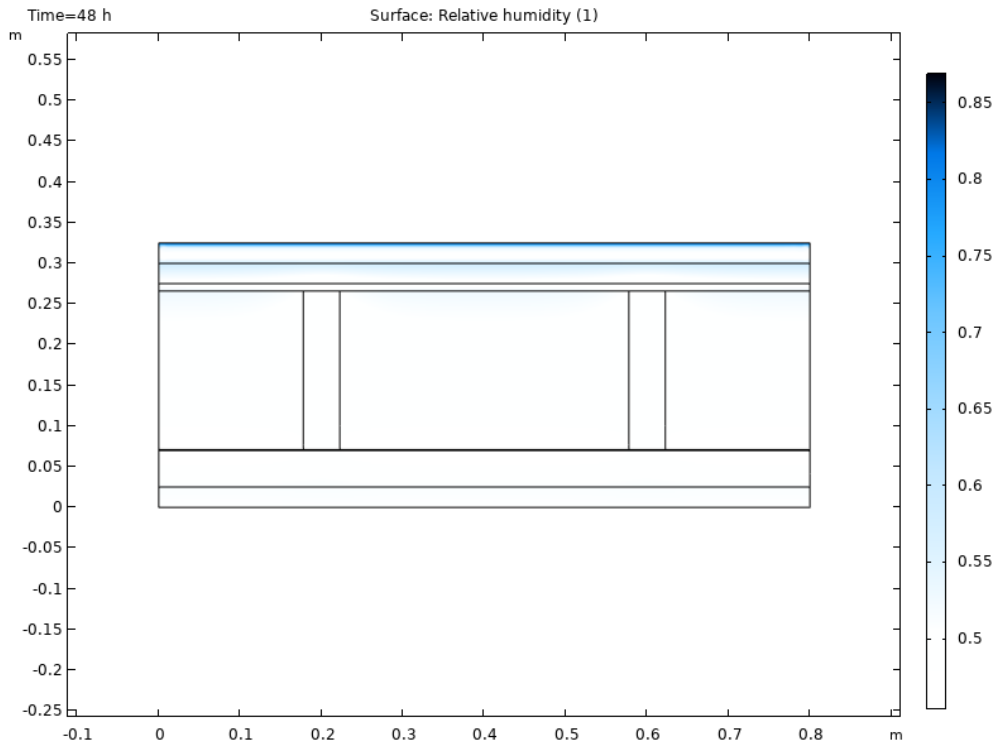


Figure 73 : Distribution de l'humidité relative, étude régime variable (2<sup>ème</sup> variante)

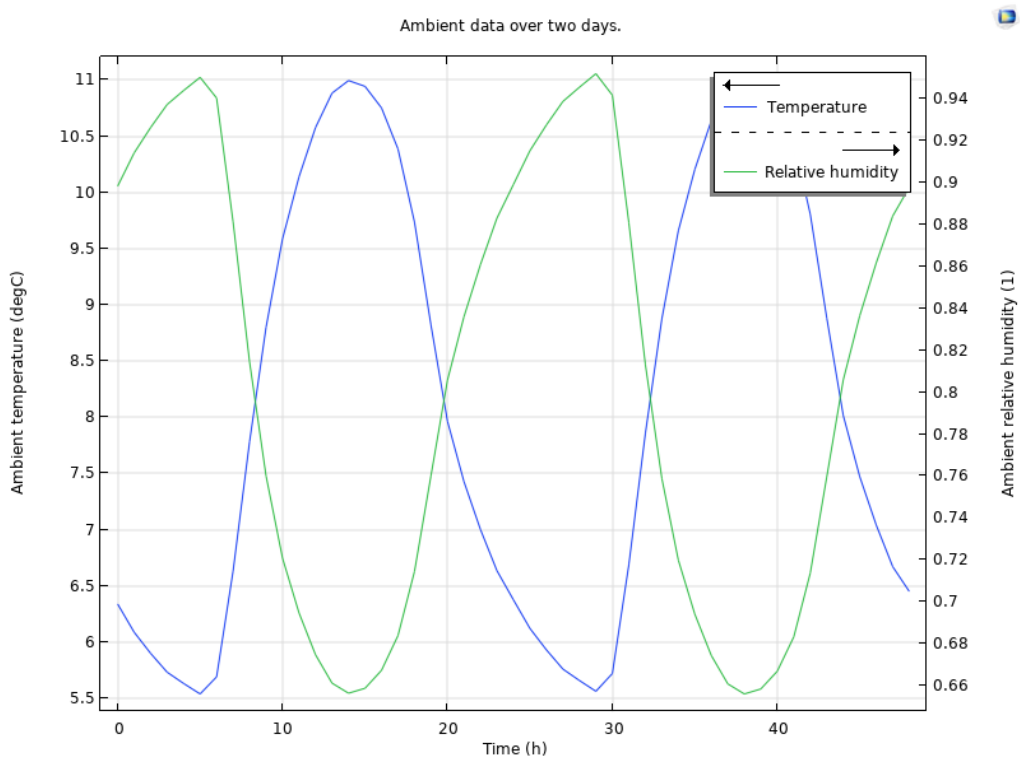


Figure 74 : Données ambiantes de température et d'humidité relative utilisées sur la face extérieure du mur

## 7. Maillage

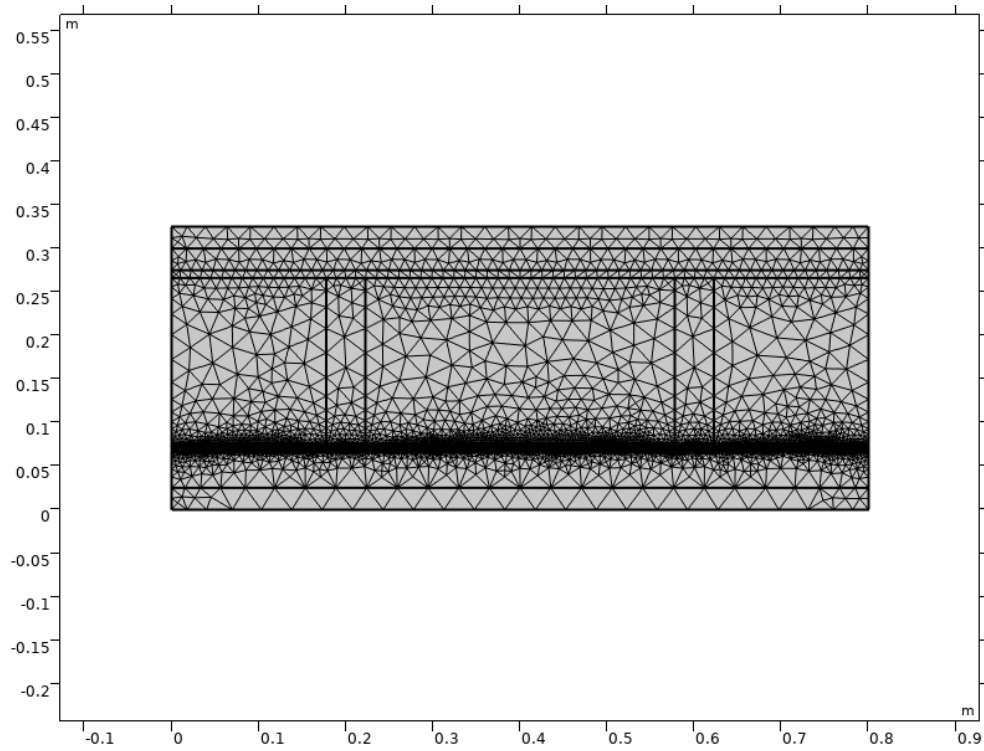


Figure 75 : Maillage du mur étudié (2<sup>ème</sup> variante)

## Conclusion générale

Cette étude, consacrée à l'analyse numérique du risque de condensation dans un mur à ossature bois, a permis d'identifier les principaux enjeux liés au comportement hygrothermique des matériaux et leur influence sur la durabilité des structures. Grâce à une modélisation fine des transferts de chaleur et de vapeur d'eau, les simulations numériques ont offert une évaluation rigoureuse des conditions propices à la condensation, apportant ainsi des éléments essentiels pour une conception plus fiable.

Les résultats soulignent l'impact critique de plusieurs paramètres :

- Le choix et l'agencement des matériaux : Certains isolants et parements, sensibles aux variations hygrométriques, exigent une sélection minutieuse pour éviter les désordres.
- Les conditions climatiques : Les gradients de température et d'humidité entre les environnements intérieur et extérieur jouent un rôle clé dans l'apparition de la condensation.
- La gestion de la ventilation et de l'étanchéité à l'air : Une conception optimisée des flux d'air limite l'accumulation d'humidité et améliore l'efficacité énergétique du bâtiment.

Pour assurer la pérennité des constructions en ossature bois, une approche proactive s'impose.

Parmi les solutions prometteuses figurent :

- L'intégration de membranes pare-vapeur adaptées aux spécificités du projet,
- L'emploi de matériaux hygrorégulateurs capables de modérer les variations d'humidité,
- L'adoption de dispositifs de monitoring pour un suivi en temps réel des performances hygrothermiques.
- Ces mesures, combinées à une modélisation prévisionnelle rigoureuse, contribuent à minimiser les risques de condensation tout en renforçant la durabilité et le confort des bâtiments. Cette recherche ouvre également des perspectives pour de futures études, notamment sur l'optimisation des assemblages constructifs ou l'impact des changements climatiques sur le comportement des enveloppes bois.

➤ *Perspectives et recommandations*

Afin d'améliorer les prévisions du comportement hygrothermique des parois en bois, plusieurs pistes peuvent être envisagées :

- **Développement de modèles numériques plus avancés**, intégrant des paramètres
- **Développement de modèles numériques plus avancés**, intégrant des paramètres dynamiques pour anticiper les variations climatiques.
- **Expérimentation et validation sur des cas réels**, permettant de confronter les résultats théoriques avec des données de terrain.
- **Mise en place de normes plus strictes**, favorisant l'adoption de techniques constructives adaptées à la gestion de l'humidité dans les bâtiments à ossature bois.

En conclusion, cette étude souligne l'importance d'une conception rigoureuse et d'une gestion proactive de l'humidité pour assurer **la durabilité, la sécurité et la performance énergétique** des constructions en bois.

## Références biographiques

Aziz Melianiet al. « Cartographie des déterminants de l'invasion par le pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., de la subéraie de Haddada dans le nord-est de l'Algérie » étude Les dynamiques forestières

Hens, H. (2007). *Building Physics - Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst & Sohn.  
Simulation numérique en hygrothermie

Trechsel, H.R. (Ed.) (2001). *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*. ASTM International.

Künzel, H.M. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*. Fraunhofer IRB Verlag.

Collet, F., et al. (2017). *Hygrothermal properties of bio-based materials: Impact of moisture on thermal conductivity*. *Energy and Buildings*, 154, 573–585.

Sedlbauer, K., et al. (2001). *Prediction of mould growth by hygrothermal calculation*. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 24(4), 321–336.

Mukhopadhyaya, P., et al. (2014). *Durability and hygrothermal performance of wood-frame wall systems: A North American perspective*. *Building and Environment*, 81, 40–52.

NF EN 15026 (2007). *Hygrothermal performance of building components - Assessment of moisture transfer by numerical simulation*.

DTU 31.2 (2020). *Règles de construction des maisons et bâtiments à ossature bois*.

Cerema (2019). *Étude des pathologies des bâtiments bois et solutions correctives*.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.

### **Ressources numériques :**

[https://www.liberte-algerie.com/#google\\_vignette](https://www.liberte-algerie.com/#google_vignette)

<https://franceboisforet.fr/>

<https://slideplayer.fr/>

<https://www.assistancescolaire.com/>

<https://woodpartners.fr/nous-contacter>

<https://girondevigilante.canalblog.com/archives/2021/11/10/39214144.html>

<https://www.anovabois.com/fr/>

<https://www.researchgate.net/login>

[https://lms.fun-mooc.fr/c4x/lorraine/30003S02/asset/MOOC\\_Anatomie\\_du\\_bois\\_chapitre\\_7\\_partie1.pdf](https://lms.fun-mooc.fr/c4x/lorraine/30003S02/asset/MOOC_Anatomie_du_bois_chapitre_7_partie1.pdf)

<https://www.houtinfobois.be/>

<https://www.frenchtimber.com/>

<https://www.hqe.guidenr.fr/cible-2-hqe/validation-performance-hygrothermique-paroi-isolation-interieure.php>