

GUIDE

DÉTERMINATION DES HYPOTHÈSES POUR LES SIMULATIONS DE TRANSFERTS COUPLÉS TEMPÉRATURE / HUMIDITÉ DANS LES PAROIS DE BÂTIMENT

OCTOBRE 2021

● NEUF ● RÉNOVATION



PROGRAMME D'ACTION POUR LA QUALITÉ DE LA CONSTRUCTION ET DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

AVANT-PROPOS

Programme PACTE

Le Programme d'Action pour la qualité de la Construction et la Transition Énergétique a pour objectif d'accompagner la montée en compétences des professionnels du bâtiment dans le champ de l'efficacité énergétique dans le but d'améliorer la qualité dans la construction et les travaux de rénovation.

Financé par les Pouvoirs publics, le programme PACTE s'attache depuis 2015 à favoriser le développement de la connaissance, la mise à disposition de référentiels techniques et d'outils pratiques modernes adaptés aux pratiques des professionnels et, à soutenir les territoires dans toutes leurs initiatives dans ce champ.

Les actions menées s'inscrivent dans la continuité des travaux de modernisation des Règles de l'art initiés dans le cadre du programme RAGE.

Les Rapports PACTE

Les Guides PACTE sont des documents techniques sur une solution technique innovante améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur objectif est de donner aux professionnels de la filière les règles à suivre pour assurer une bonne conception, ainsi qu'une bonne mise en œuvre et réaliser une maintenance de la solution technique considérée. Ils présentent les conditions techniques minimales à respecter. Ils n'ont pas vocation à se substituer aux textes de références en vigueur (NF, DTU, ATec ou DTA, etc.).

Retrouvez gratuitement la collection sur www.programmepacte.fr

UNE COLLECTION
UNIQUE



PROGRAMME D'ACTION POUR LA QUALITÉ DE LA CONSTRUCTION ET DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

SOMMAIRE

01 • Introduction	4
02 • Domaine d'application	5
03 • Généralités	6
04 • Conditions aux limites intérieures	7
05 • Conditions aux limites extérieures et modèles auxiliaires	15
06 • Autres paramètres	26
07 • Matériaux	28
08 • Exploitation des résultats de simulation	35
09 • Base de données Matériaux	38
ANNEXE 1 • Références bibliographiques	41
ANNEXE 2 • Nuancier de couleurs extérieures	43
ANNEXE 3 • Modèle d'infiltration d'air simplifié	45
ANNEXE 4 • Caractéristiques de succion et redistribution d'eau liquide par défaut pour panneaux dérivés de bois	47
ANNEXE 5 • Variabilité des propriétés physiques	49
• Table des matières	51
• Table des tableaux	52
• Table des figures	53

AVERTISSEMENT



Le présent guide ne se substitue en aucun cas aux textes de référence, qu'ils soient réglementaires (lois, décrets, arrêtés...), normatifs (normes, DTU, Règles Professionnelles, Recommandations Professionnelles RAGE et PACTE ou règles de calcul) ou codificatifs (Avis Techniques, Cahiers des Prescriptions Techniques...) qui doivent être consultés.

Le CSTB décline toute responsabilité quant aux conséquences directes ou indirectes de toute nature qui pourraient résulter de toute interprétation erronée du contenu de ce guide.



VERSION	DATE DE LA PUBLICATION	MODIFICATIONS
1	Octobre 2021	Première version du document

01 INTRODUCTION



Le présent guide a pour objectif de proposer les hypothèses de calcul pour l'estimation des risques de pathologies liées à l'humidité dans les parois des bâtiments. Elles doivent être applicables de manière non-ambiguë et reproductible par tout utilisateur souhaitant estimer ces risques.

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

Ce document s'adresse aux utilisateurs réalisant régulièrement des estimations de risques liés à l'humidité dans les parois par calcul dynamique (bureaux d'études, évaluateurs...). **Une connaissance des transferts hygrothermiques est indispensable pour bien utiliser ce document.**



Le présent guide définit la méthodologie et les données d'entrée ainsi que les règles d'interprétation des résultats, nécessaires à l'estimation des risques liés à l'humidité réalisée au moyen de simulations numériques couplant les transferts thermiques et hygriques. De ce fait, **ce document constitue un complément national français de la norme NF EN 15026** et n'entre pas en contradiction avec les recommandations normatives propres à ce document. Les hypothèses non spécifiées dans le présent document sont donc précisées dans la norme NF EN 15026.

Le présent document est applicable à toutes les zones climatiques françaises à l'exclusion des zones de climat tropical ou équatorial. Le domaine d'application ne couvre donc pas les départements et régions d'outre-mer.

Le présent guide permet de justifier la limitation du risque de pathologie lié à l'humidité lors de la conception de parois / composants d'enveloppe de bâtiment, destinés à être utilisés sur le territoire national (hors territoire ultra-marin).

Ce guide s'applique :

- aux ouvrages neufs ;
- aux parties d'ouvrage neuf mis en œuvre sur les éléments existants couverts par un Document Technique Unifié, une Règles Professionnelles ou une Recommandation Professionnelle RAGE ou PACTE.

Dans le cas d'une rénovation, ce guide **ne s'applique pas** :

- aux éléments existants non couverts par un Document Technique Unifié, une Règle Professionnelle ou une Recommandation Professionnelle RAGE ou PACTE (par exemple, pisé / terre crue / joints chaux) ;
- aux parois existantes présentant des pathologies ;
- aux parois existantes comportant, avant rénovation, les matériaux suivants : panneaux à base de bois, membranes d'étanchéité, membranes pare-vapeur, écran de sous toiture HPV, écran pare-pluie, isolants hygroscopiques, matériaux capillaires (tels que définis aux paragraphes 7.2 et 7.3).

NOTE

Dans ce cas, une dépose de ces éléments peut être réalisée avant rénovation pour permettre l'application du présent Guide.

Les recommandations de ce document ne s'appliquent pas aux planchers bas, ni aux parois en contact avec le sol ou un local non chauffé (vide-sanitaire, garage...), qui doivent faire l'objet d'études spécifiques en termes de conditions aux limites extérieures notamment (remontées capillaires, ventilation du vide-sanitaire...).

Ce Guide n'est pas conçu pour fournir une méthodologie d'investigation pour l'analyse des causes d'une pathologie avérée constatée sur le terrain.

De manière à faciliter l'utilisation du présent document, deux situations d'usage doivent être distinguées :

- l'estimation du risque visant un procédé dont la mise en œuvre est restreinte à un chantier spécifique, donc pour un type de bâtiment et une localisation géographique connus ;
- l'estimation du risque visant un procédé destiné à être diffusé sur tout le territoire de France Métropolitaine, pour un domaine d'emploi défini.

Ces deux situations conduisent à des hypothèses différentes, en particulier concernant les conditions aux limites intérieures et extérieures.

04

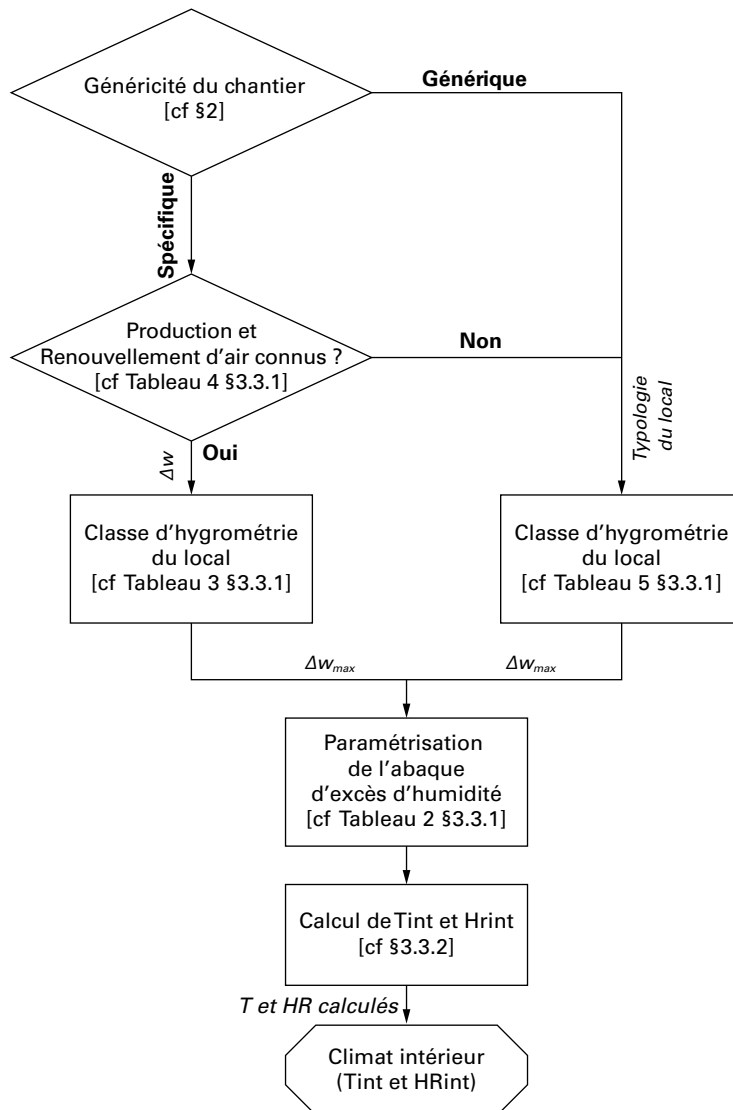
CONDITIONS AUX LIMITES INTÉRIEURES



L'objectif de ce chapitre est de définir les climats intérieurs, en température et humidité, qui doivent être utilisés pour mener à bien une simulation de transferts couplés – température et humidité – dans les parois de bâtiments. La procédure de définition du climat intérieur est résumée dans le logigramme de la Figure 1.

Après passation du marché et préalablement au chantier, c'est le Maître d'œuvre en accord avec le Maître d'ouvrage qui définit la classe d'hygrométrie, les sources internes de production de vapeur d'eau, les taux de renouvellement d'air en fonction de l'usage du local. A partir de ces informations, le bureau d'étude réalisant le calcul définit le climat intérieur en suivant cette arborescence. Si un procédé constructif utilisé est sous ATEc/ATex, c'est le climat défini dans le domaine d'emploi de cet ATEc/ATex qui doit être choisi.

Figure 1 – Arbre décisionnel de calcul du climat intérieur



Chacune des étapes est détaillée dans les paragraphes suivants.

4.1 Sources des données

A partir des normes internationales en vigueur (NF EN 15026 ou ANSI/ASHRAE standard 160-2016), il est prévu deux cas de figure distincts pour la définition du climat intérieur :

- le bâtiment est équipé d'un système de conditionnement d'air ou d'un système de rafraîchissement intermittent, auquel cas les valeurs de consignes de ces systèmes en température et/ou en humidité doivent être choisies ;
- le bâtiment n'est pas équipé de système de conditionnement d'air, auquel cas le climat intérieur est calculé à partir du climat extérieur à l'aide des fonctions de transferts présentées dans le Tableau 1.

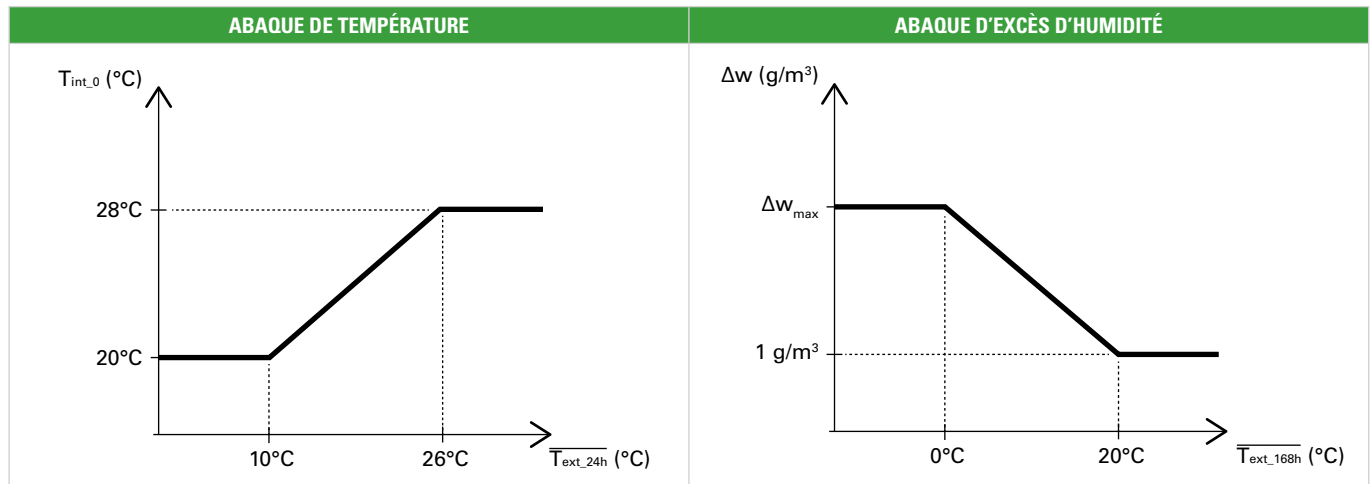
4.2 Consignes de systèmes

Dans cette configuration, le bâtiment est équipé de systèmes de conditionnement d'air en température et humidité fonctionnant en permanence, et le climat intérieur du local est alors constitué des valeurs de consigne de ces systèmes.

4.3 Abaques

Dans ce cas, la température et l'humidité intérieures en évolution libre sont définies à partir de la température et de l'humidité extérieures via les abaques détaillées dans le Tableau 1.

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



4.3.1 Définition de l'abaque d'excès d'humidité

Si l'abaque permettant de quantifier la température intérieure à chaque pas de temps est entièrement définie, celle concernant l'excès d'humidité suppose de connaître le palier haut, nommé $\Delta w_{\max}$, en fonction de la classe d'hygrométrie du local comme indiqué dans le Tableau 2 :

Tableau 2 — $\Delta w_{\max}$ en fonction de la classe d'hygrométrie du local

CLASSE D'HYGROMÉTRIE	$\Delta w_{\max}$
Faible	2,5 g/m ³
Moyenne	5 g/m ³
Forte	7,5 g/m ³

La caractérisation de la classe à laquelle appartient le local étudié peut se faire de deux manières.

- La **première** consiste à utiliser après les avoir justifiés, le débit de renouvellement d'air n (m³/h) et la production horaire moyenne W (g/h) estimés du local en période de chauffe. Le rapport des deux valeurs est l'excès d'humidité du local, nommé Δw ou W/n (en gramme de vapeur d'eau par mètre cube d'air). Il permet alors de déterminer la classe d'hygrométrie du local à partir du Tableau 3. La valeur de $\Delta w_{\max}$ à utiliser sur l'abaque du Tableau 1 sera la borne haute de la classe d'hygrométrie du local. Pour un $\Delta w_{\max}$ calculé supérieur à 7,5 g/m³, la valeur sera choisie telle quelle dans l'abaque.

Tableau 3 — Définition de la classe d'hygrométrie du local à partir de l'excès d'humidité moyen du local

Δw ou W/n	CLASSE D'HYGROMÉTRIE
$\Delta w \leq 2,5 \text{ g/m}^3$	Faible
$2,5 \text{ g/m}^3 < \Delta w \leq 5 \text{ g/m}^3$	Moyenne
$5 \text{ g/m}^3 < \Delta w \leq 7,5 \text{ g/m}^3$	Forte

A titre d'information, le Tableau 4 indique les différentes sources possibles d'un bâtiment et les valeurs de production de chacune telles qu'extraites du guide technique « Transferts d'humidité à travers les parois », édité par le CSTB.

Tableau 4 – Exemple de production d'humidité pour un logement

ACTIVITÉ	UNITÉ	VALEUR MINIMALE	VALEUR MAXIMALE
Personne au repos	g/h/pers	40	60
Personne en activité	g/h/pers	80	250
Lessive, toilette & cuisine	kg/j pour 4 pers	5	20
Total apports journaliers du logement	kg/j pour 4 pers	10	25

- La **seconde** méthode consiste à définir la classe d'hygrométrie en fonction de la typologie du local à partir du Tableau 5, tiré du DTU 31.2.

Tableau 5 – Classement des locaux par classes d'hygrométrie selon le DTU 31.2

CLASSE D'HYGROMÉTRIE	TYPE DE LOCAUX
Faible	– Immeubles de bureaux non conditionnés, externats scolaires, logements équipés de ventilations mécaniques contrôlées et de systèmes propres à évacuer les pointes de production de vapeur d'eau, dès qu'elles se produisent, (hottes, etc...) – Bâtiments industriels à usage de stockage, ateliers mécaniques, sans production de vapeur d'eau – Locaux sportifs sans public (sauf piscine ou patinoires)
Moyenne	– Bâtiments d'habitation, y compris les cuisines et salles d'eau, correctement chauffés et ventilés, sans suroccupation
Forte	– Bâtiments d'habitation médiocrement ventilés et suroccupés – Locaux avec forte concentration humaine ou animale (bâtiments d'élevage, manèges couverts de chevaux, certains ateliers etc...) – Locaux à atmosphère humide contrôlée pour les besoins de la fabrication des produits (boulangeries et pâtisseries industrielles, imprimeries, tannage des cuirs, certains ateliers de peinture, de photographie, ateliers de traitement des tabacs, etc...) – Locaux avec forte production de vapeur d'eau (piscines, conserveries, teintureries, papeteries, laiteries industrielles, ateliers de lavage de bouteilles, brasseries, ateliers de polissage, cuisines collectives, blanchisseries industrielles, ateliers de tissage, filatures etc...) – Locaux chauffés par panneaux radiants à combustible gaz
Très forte	– Locaux spéciaux tels que locaux nécessitant le maintien d'une humidité relativement élevée, locaux sanitaires de collectivités d'utilisation très fréquente

4.3.2 Calcul de la température et de l'humidité relative intérieures

Une fois les abaques totalement définis, le calcul de la température et de l'humidité intérieures du local peut être réalisé. La procédure est valable pour le cas d'un local en évolution libre ou en présence de système de climatisation et/ou de déshumidification. Dans ce cas, **l'ordre des différentes étapes doit être respecté** :

- 1°) Calcul de la température intérieure en évolution libre ;
- 2°) En présence de climatisation, calcul de la température intérieure du local climatisé ;
- 3°) Calcul de l'humidité relative intérieure en évolution libre ;
- 4°) En présence de climatisation et/ou déshumidification, calcul de l'humidité relative intérieure du local climatisé et/ou déshumidifié.

Chacune des étapes est détaillée par la suite. Les valeurs horaires des conditions extérieures à considérer sont celles définies au paragraphe 5.

4.3.2.1 CALCUL DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE EN ÉVOLUTION LIBRE (CHAUFFAGE INCLUS) $T_{int,0}$

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

$$\overline{T_{ext}}_{24h}(h) = \frac{1}{24} \int_{h-23}^h T_{ext}(h) dt \quad (1)$$

NOTE

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

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

4.3.2.2 CALCUL DE LA TEMPÉRATURE INTÉRIEURE T_{int}

En présence d'un système de climatisation dans le local d'étude, la température intérieure en évolution libre est limitée par la température de consigne du système. Ainsi l'algorithme de calcul est le suivant :

SI présence climatisation à une température de consigne T_{cons} :

$$T_{int} = \begin{cases} T_{cons} & \text{si } T_{int,0} > T_{cons} \\ T_{int,0} & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

SINON :

$$T_{int} = T_{int,0} \quad (3)$$

4.3.2.3 CALCUL DE L'HUMIDITÉ RELATIVE INTÉRIEURE EN ÉVOLUTION LIBRE (CHAUFFAGE INCLUS) $HR_{int,0}$

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

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

NOTE

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

À partir de cette température moyenne, l'abaque présentée dans le Tableau 1 et définie au chapitre 4.3.1 permet de calculer l'excès d'humidité intérieure Δw à chaque heure.

L'humidité absolue intérieure en évolution libre ($w_{int,0}$) est alors calculée de la manière suivante :

$$w_{int,0}(h) = \overline{w_{ext}}_{168}(h) + \Delta w(h) \quad (5)$$

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

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

Avec

$$w_{ext}(h) = \frac{p v_{sat}(T_{ext}(h)) \cdot HR_{ext}(h) \cdot M_{eau}}{R \cdot T_{ext}(h)} \quad (7)$$

Et

$$p v_{sat}(T_{ext}(h)) = \begin{cases} 610.5 \exp\left(21.875 \frac{T_{ext}(h)}{(265.5 + T_{ext}(h))}\right) & \text{si } T_{ext}(h) < 0^\circ C \\ 610.5 \exp\left(17.269 \frac{T_{ext}(h)}{(237.3 + T_{ext}(h))}\right) & \text{si } T_{ext}(h) \geq 0^\circ C \end{cases} \quad (8)$$

NOTE

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

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

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

Avec

$$p v_{sat}(T_{int}(h)) = \begin{cases} 610.5 \exp\left(21.875 \frac{T_{int}(h)}{(265.5 + T_{int}(h))}\right) & \text{si } T_{int}(h) < 0^\circ C \\ 610.5 \exp\left(17.269 \frac{T_{int}(h)}{(237.3 + T_{int}(h))}\right) & \text{si } T_{int}(h) \geq 0^\circ C \end{cases} \quad (10)$$

4.3.2.4 CALCUL DE L'HUMIDITÉ RELATIVE INTÉRIEURE HR_{int}

En présence d'un système de climatisation ou de déshumidification dans le local d'étude, l'humidité relative intérieure est limitée. Dans ce cas, deux modes de gestion des systèmes sont proposés :

- si le système régule l'humidité relative intérieure à partir d'une consigne donnée, celle-ci sera la valeur limitante. Si la valeur de consigne n'est pas connue, une consigne de 50 % est imposée ;
- dans le cas où le système est régulé sur la température (évolution libre de l'humidité relative), comme pour la climatisation, la déshumidification générée par le système est évaluée en fonction d'une température de batterie froide T_{bf} supposée connue.

L'algorithme de calcul est donc le suivant :

SI présence climatisation ou déshumidification

SI HR_{int} régulée par une consigne HR_{cons} :

SI HR_{cons} est connue

$$HR_{int} = \begin{cases} HR_{cons} & \text{si } HR_{int_0} > HR_{cons} \\ HR_{int_0} & \text{sinon} \end{cases} \quad (11)$$

SINON (HR_{cons} inconnue)

$$HR_{int} = \begin{cases} 50 \% & \text{si } HR_{int_0} > 50 \% \\ HR_{int_0} & \text{sinon} \end{cases} \quad (12)$$

SINON (HR_{int} non régulée) :

Calcul de la température de soufflage

$$T_{souf} : T_{souf} = \begin{cases} T_{bf} & \text{si } T_{int}(h) < T_{int_0}(h) \\ T_{int} & \text{sinon} \end{cases} \quad (13)$$

$$w_{int} = \begin{cases} \frac{w_{int_0} - w_{sat}(T_{souf})}{T_{int_0} - T_{souf}} (T_{int} - T_{souf}) + w_{sat}(T_{souf}) & \text{si } T_{int}(h) < T_{int_0}(h) \\ w_{int_0} & \text{sinon} \end{cases} \quad (14)$$

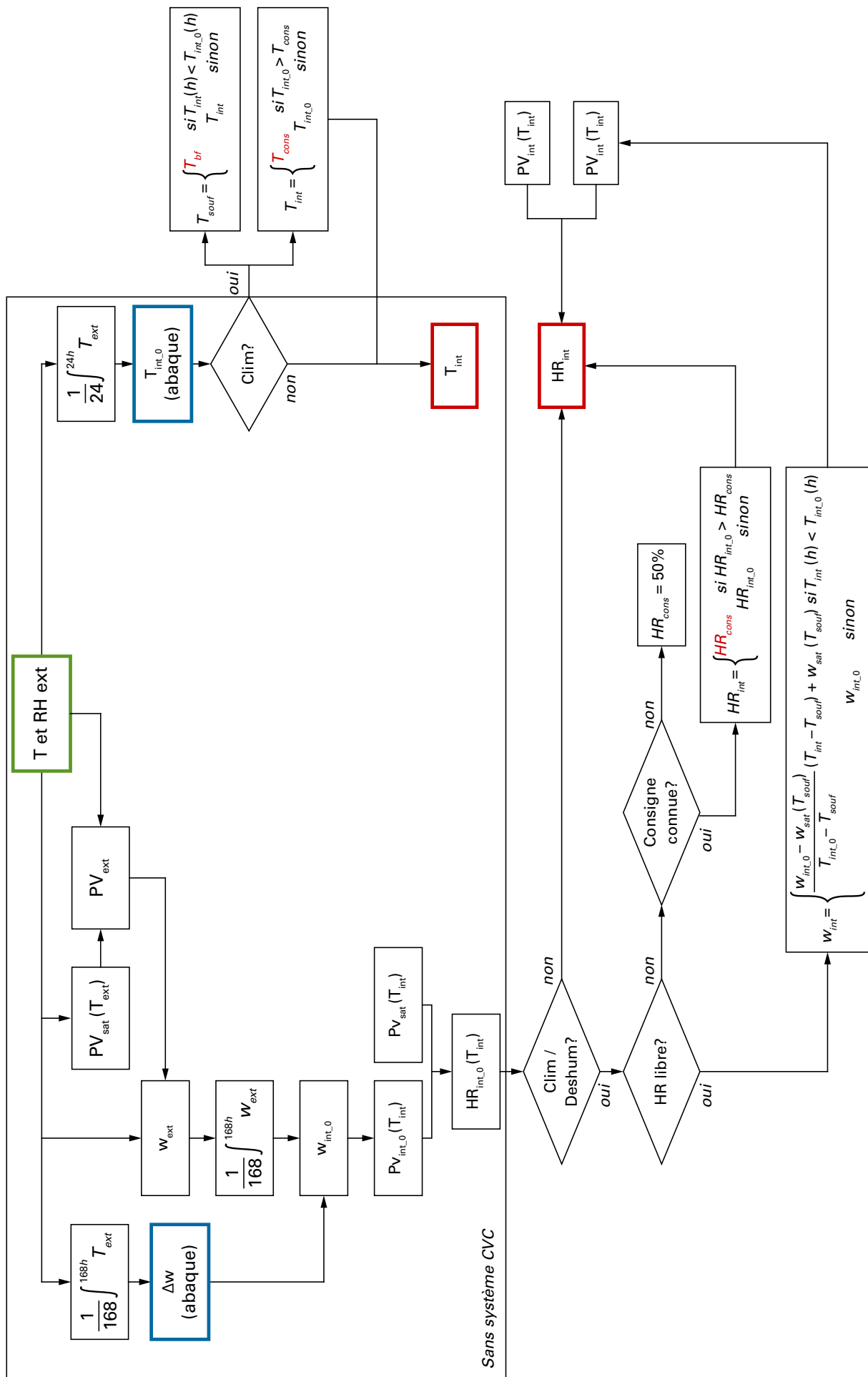
Puis calcul de $HR_{int}(h)$ à partir de $w_{int}(h)$ et $T_{int}(h)$ de manière analogue à (9) et (10)

SINON (pas de climatisation ou déshumidification)

$$HR_{int} = HR_{int_0} \quad (15)$$

Toute la procédure de calcul de la température et de l'humidité relative intérieures est présentée sous la forme d'un arbre décisionnel sur la Figure 2. Un diagramme d'air humide est présenté en Annexe 5. Il permet de comprendre le mode de calcul de l'humidité intérieure en présence d'un système de climatisation régulé en température seule.

Figure 2 – Arbre décisionnel pour le calcul de la température et de l'humidité relative intérieures



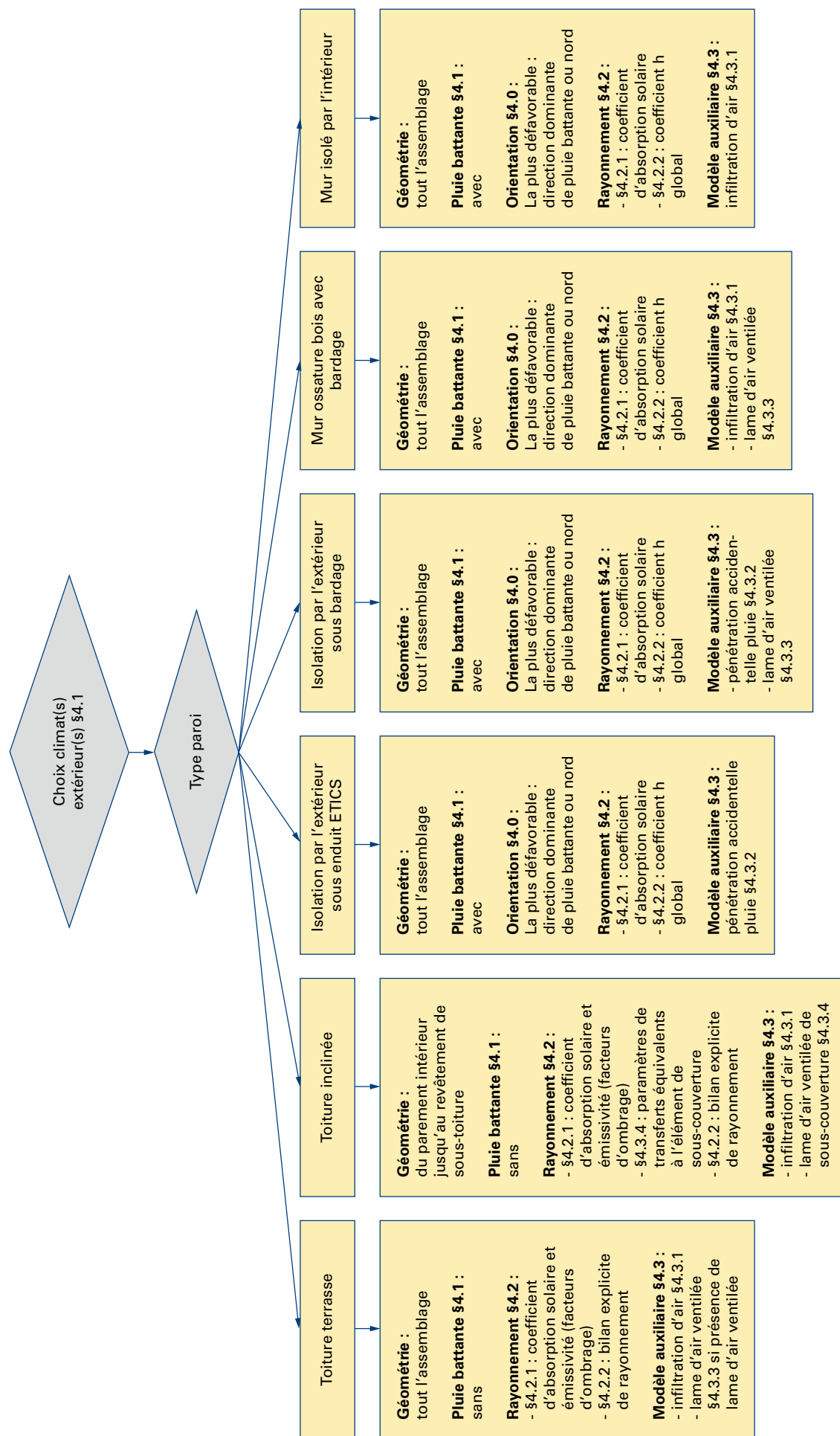


L'objectif de ce chapitre est de définir les conditions aux limites extérieures et les modèles auxiliaires qui peuvent être utilisés pour mener à bien une simulation de transferts couplés température / humidité dans les parois de bâtiments.

Avant même de commencer à définir les conditions extérieures, il convient de déterminer l'orientation de paroi à traiter. Si celle-ci n'est pas connue, il convient de déterminer celle qui est **la plus défavorable** vis-à-vis des risques hygrothermiques en réalisant un calcul en 1D pour choisir entre l'orientation nord (séchage minimal), et l'orientation dominante de pluie battante (apport d'eau liquide maximal), en fonction de la typologie de la paroi.

L'arbre décisionnel suivant permet de synthétiser l'approche et renvoie vers les paragraphes pertinents pour plus de précisions. Le présent guide ne s'applique qu'aux cas listés ci-dessous. Les parois présentées sont conformes aux référentiels techniques dont elles relèvent (DTU, CPT, AT/DTA, ATEx, Règles Professionnelles, Recommandations Professionnelles RAGE ou PACTE).

Figure 3 – Arbre décisionnel de choix des conditions aux limites extérieures et modèles auxiliaires pour les parois les plus courantes



NOTE

Les panneaux CLT constituent un support pour procédé d'isolation par l'extérieur ou par l'intérieur.

Conformément aux normes en vigueur (NF EN 15026, Normes ANSI/ASHRAE standard 160-2016 et WTA 6-2), le fichier climat extérieur doit inclure au pas de temps horaire les paramètres suivants :

- la température sèche de l'air ;
- la pression de vapeur, ou tout autre paramètre permettant de la calculer (ex : humidité relative ou absolue) ;
- le rayonnement solaire direct et diffus ;
- le rayonnement grande longueur d'onde émis par la voûte céleste, ou tout autre paramètre permettant de le calculer (ex : température de ciel et nébulosité) ;
- la vitesse et la direction du vent mesurées en champ libre.

Les précipitations mesurées sur un plan horizontal.

De tels fichiers peuvent être récupérés sur des bases de données météorologiques. Certaines plateformes telles *Meteonorm* permettent de télécharger un fichier météo dans un format utilisable directement par les logiciels hygrothermiques du marché.

Les paramètres listés ci-dessus permettent de calculer les conditions aux limites extérieures et d'alimenter les modèles auxiliaires qui sont détaillés dans la suite.

5.1 Pluie battante

Ce paragraphe s'applique à toutes les parois donnant sur l'extérieur, exceptés les toitures terrasses étanchées (DTU 43.1 et 43.3), les couvertures (DTU de la série 40) et les bardages métalliques.

La pluie battante est la quantité de pluie qui atteint une surface verticale. Elle est due à l'action du vent qui dévie les gouttelettes d'eau de leur trajectoire verticale, et peut être influencée entre autres par l'environnement proche et le bâtiment lui-même.

La quantité de pluie battante incidente à une surface doit être calculée par une approche simplifiée à partir d'un modèle de pluie battante développé par H. Künzle et intégré à la plupart des logiciels de transferts hygrothermiques du marché (Straube, 2010). Il se calcule comme suit :

$$\text{Quantité de pluie battante incidente} = R_h \cdot (R_1 + R_2 \cdot u_{\text{vent}})$$

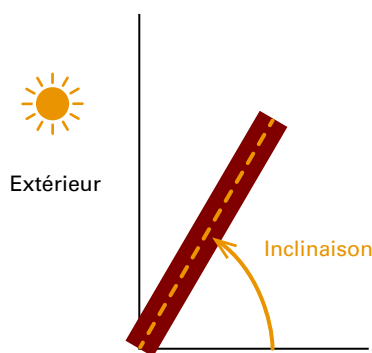
Avec :

R_h : précipitation sur un plan horizontal

R_1, R_2 : coefficients de pluie battante

u_{vent} : vitesse moyenne du vent

Figure 4 – Angle d'inclinaison d'une paroi en coupe verticale



Les coefficients de pluie battante prennent différentes valeurs suivant les cas de figure :

- pour une inclinaison $< 90^\circ$, $R_1 = 1$ et $R_2 = 0$;
- pour une inclinaison $= 90^\circ$ (façade verticale), $R_1 = 0$ et R_2 est calculé selon le Tableau 6 ;
- pour une inclinaison $> 90^\circ$, on admet que la surface n'est pas exposée à la pluie battante et on considère $R_1 = R_2 = 0$.

Tableau 6 – Coefficient de pluie battante

	R_2
Bâtiment peu élevé ($H \leq 10$ m)	0,07
Bâtiments élevés ($H > 10$ m)	0,2

Lors de l'impact des gouttelettes de pluie battante sur la surface, une partie est perdue par rejaillissement. Le facteur de réduction de la pluie battante traduit ce phénomène :

$$\begin{aligned} & \text{pluie battante incidente disponible pour absorption à la surface} \\ &= a_r \cdot \text{pluie battante incidente} \end{aligned}$$

Une valeur de $a_r = 0,7$ est utilisée pour les surfaces verticales, (70 % de la pluie battante incidente est disponible pour absorption par la surface), tandis qu'une valeur de $a_r = 1$ est choisie pour les surfaces d'inclinaison inférieures à 90° .

La quantité d'eau disponible pour absorption à la surface sera le plus souvent supérieure à celle pouvant être effectivement absorbée par la façade (à l'exception notamment des murs maçonnés et des murs en pierre sans enduit).

La prédiction de la pluie battante absorbée par une surface donnée est plus particulièrement sensible aux deux paramètres suivants :

- la durée des épisodes pluvieux. Il est donc essentiel de disposer de données au pas de temps horaire pour décrire ces épisodes de manière fine. Un pas de temps supérieur aurait tendance à moyenner les quantités de précipitation et donc à surestimer la quantité d'eau absorbée ;
- la capacité d'absorption liquide du revêtement de façade. Cette propriété doit être mesurée selon la norme NF EN ISO 15148, ou la méthode par spectroscopie RMN, décrite dans (Krus, 1996).

Le DTU 40.21 définit trois zones dites de concomitance pluie-vent sur le territoire français, chaque zone étant caractérisée par une même occurrence de pluie et vent moyens.

B.1 Zones

La France est divisée en trois zones d'application (eu égard à la concomitance vent-pluie).

B.1.1 Zone I

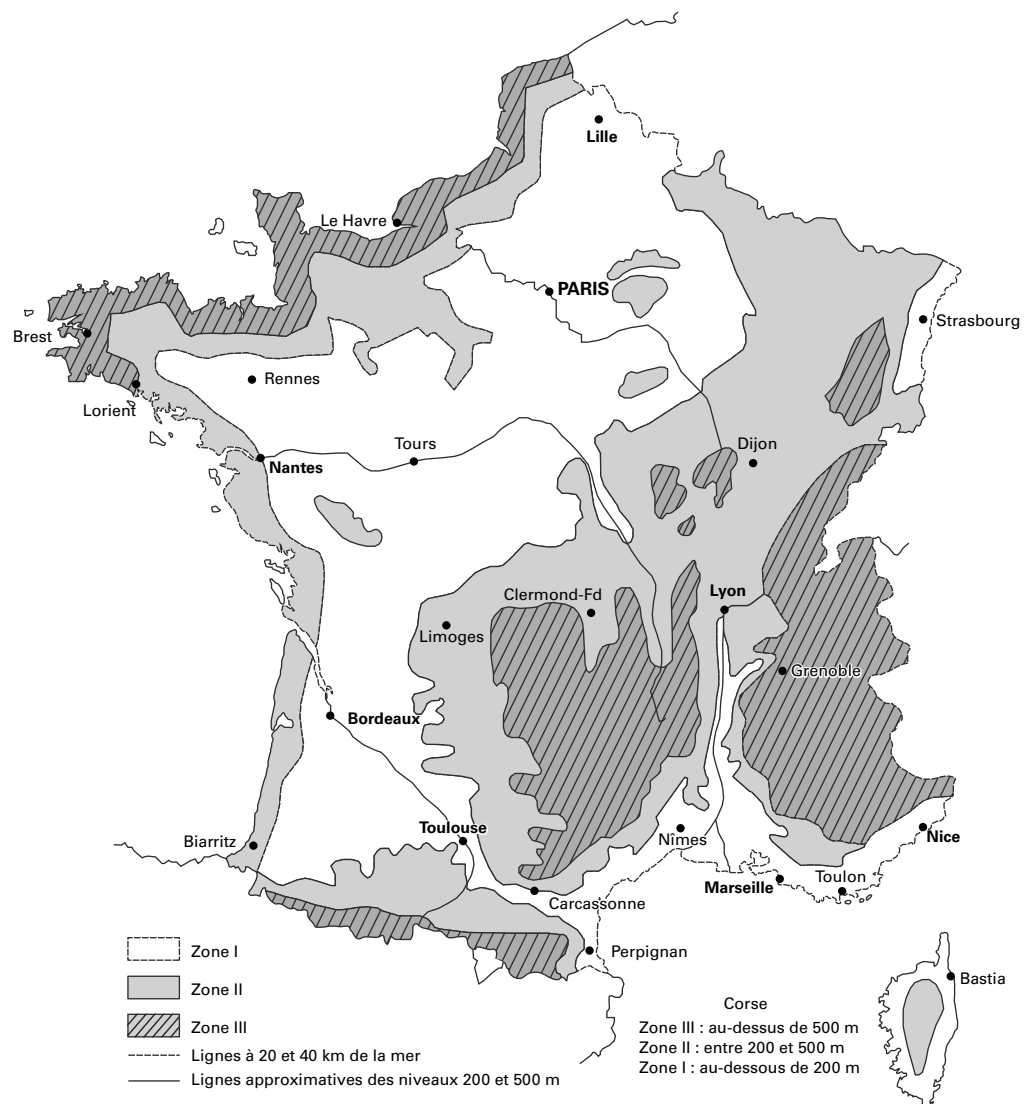
Tout l'intérieur du pays ainsi que la côte méditerranéenne, pour les altitudes inférieures à 200 m.

B.1.2 Zone II

- Côte Atlantique sur 20 km de profondeur, de Lorient à la frontière espagnole ;
- Bande située entre 20 et 40 km de la côte, de Lorient à la frontière belge ;
- Altitudes comprises entre 200 et 500 m.

B.1.3 Zone III

Figure 5 – Zones climatiques dites de concomitance pluie-vent et carte associée (extrait du DTU 40.21)



Pour un calcul hygrothermique dans **un lieu spécifique**, le fichier météo choisi doit être celui de la localité la plus proche située dans la même zone de concomitance pluie vent.

Si l'étude hygrothermique vise un **procédé générique** diffusable sur toute la France métropolitaine, les données météo à considérer dépendent du domaine d'emploi visé :

- Nancy et Brest pour le climat de plaine ;
- La Chaux de Fonds pour le climat de montagne (1020 m) ;
- Nice pour les locaux climatisés.

Si tout le territoire est a priori visé, les 4 climats précédents doivent être à minima considérés.

5.2 Rayonnement

5.2.1 Rayonnement solaire (courte longueur d'onde)

Ce paragraphe s'applique à toute paroi en contact avec l'air extérieur.

Le rayonnement courte longueur d'onde est celui émis par le soleil. Le rayonnement global (direct et diffus) incident à une surface peut être calculé avec les équations permettant de définir la position de la terre par rapport au soleil et à partir du rayonnement solaire global horizontal, de l'inclinaison et de l'orientation de cette surface, ainsi que de l'albédo du sol.

Le rayonnement solaire absorbé par une surface dépend de sa couleur qui définit son coefficient d'absorption solaire (aussi appelé absorptivité courte longueur d'onde) :

$$\text{flux solaire absorbé} = \text{flux solaire incident} * \text{coefficient d'absorption solaire}$$

Pour un calcul hygrothermique dans **un lieu spécifique**, le fichier météo choisi doit être celui de la localité la plus proche située dans la même zone de concomitance pluie vent (détaillé au paragraphe 5.1).

Si l'étude hygrothermique vise un **procédé générique** diffusable sur toute la France métropolitaine, les données météo à considérer dépendent du domaine d'emploi visé :

- Nancy et Brest pour le climat de plaine ;
- La Chaux de Fonds pour le climat de montagne (1020 m) ;
- Nice pour les locaux climatisés.

Si tout le territoire est a priori visé, les 4 climats précédents doivent à minima être considérés.

Le **coefficient d'absorption solaire extérieur** se mesure à l'état neuf avec la norme NF EN 14500. A défaut de valeur mesurée, le nuancier de l'annexe 2 doit être utilisé pour déterminer un niveau de teinte (gradué de 1 à 5). Le coefficient d'absorption solaire associé à chaque niveau est donné par le Tableau 7.

Tableau 7 – Correspondance entre niveau de teinte et coefficient d'absorption solaire

NIVEAU LU SUR LE NUANCIER DE L'ANNEXE 2	COEFFICIENT D'ABSORPTION SOLAIRE (-)
1	0,3
2	0,45
3	0,6
4	0,75
5	0,9

Pour un calcul hygrothermique de toiture dans **un lieu spécifique avec ombrage**, les coefficients d'absorption solaire et émissivité suivants devront être pris en compte (se reporter au § 5.2.2 pour plus de détails sur le rayonnement grande longueur d'onde et l'émissivité) :

Tableau 8 — Prise en compte des ombrages

	COEFFICIENT D'ABSORPTION ÉQUIVALENT COURTE LONGUEUR D'ONDE (a_e)	EMISSIVITÉ ÉQUIVALENTE GRANDE LONGUEUR D'ONDE (ε_e)
Ombrage vertical (maisons, arbres, garde-corps, acrotères,...)	$0,35 * a_{\text{étanchéité}}$	$1,00 * \varepsilon_{\text{étanchéité}}$
Ombrage causé par les panneaux photovoltaïques	$0,30 * a_{\text{étanchéité}}$	$0,50 * \varepsilon_{\text{étanchéité}}$
Ombrage horizontal (platelage de terrasse...)	$0,35 * a_{\text{étanchéité}}$	$0,45 * \varepsilon_{\text{étanchéité}}$

Sont aussi indiquées les émissivités équivalentes, dont la définition générale est donnée en partie 4.2.2.

Si l'étude hygrothermique vise un **procédé générique** diffusable sur toute la France métropolitaine, ou si l'information liée à l'ombrage n'est pas connue ou incertaine, on supposera un ombrage vertical et les coefficients a_e et ε_e à utiliser seront :

$$a_e = 0,35 * a_{\text{étanchéité}}$$

$$\varepsilon_e = 1,00 * \varepsilon_{\text{étanchéité}}$$

Dans ce dernier cas, le fonctionnement du procédé avec un ombrage causé par des panneaux photovoltaïques n'est pas assuré.

5.2.2 Rayonnement grande longueur d'onde

Ce paragraphe doit s'appliquer à toute paroi en contact avec l'environnement extérieur. Le rayonnement infrarouge est celui émis par le bâtiment lui-même et par l'environnement proche.

Deux cas sont à considérer.

Murs verticaux :

Pour les murs verticaux, l'échange radiatif grande longueur d'onde peut être groupé avec l'échange convectif via un coefficient h global :

$$h = h_a + h_r$$

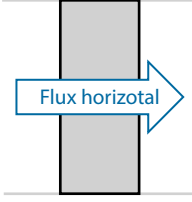
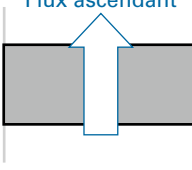
On considère les valeurs tabulées issues des règles Th-Bât Fascicule « Méthodes – Généralités », édition 2017, avec :

$$h_i = \frac{1}{R_{si}}$$

$$h_e = \frac{1}{R_{se}}$$

Les résistances superficielles sont obtenues par le Tableau 1 du Fascicule « Méthodes – Généralités » des Règles Th-Bât édition 2017, repris ci-dessous :

Tableau 9 – Résistances thermiques superficielles à considérer (source : Fascicule « Méthodes – Généralités » des Règles Th-Bât édition 2017)

Paroi donnant sur : – l'extérieur – un passage ouvert – un local ouvert (1)		R _{si} m².K/W	R _{se} (2) m².K/W	R _{si} + R _{se} m².K/W
Paroi verticale (inclinaison > 60°)		0,13	0,04	0,17
Paroi Horizontale (inclinaison < 60°)		0,10	0,04	0,14

(1) Un local est dit ouvert si le rapport de la surface de ses ouvertures sur l'extérieur, à son volume, est égal ou supérieur à 0,005 m²/m³. Ce peut être le cas, par exemple, d'une circulation à l'air libre, pour des raisons de sécurité contre l'incendie.
(2) Si la paroi donne sur un autre local non chauffé, un comble ou un vide sanitaire, R_{si} s'applique des deux côtés

Surfaces inclinées :

Pour les surfaces inclinées comme les toitures (inclinaison < 90°), la perte de chaleur nocturne par rayonnement grande longueur d'onde vers la voûte céleste par temps clair refroidit la surface en dessous de la température de l'air extérieur. Ce refroidissement nocturne peut créer des condensations en surface et augmenter la quantité d'eau présente dans les matériaux proches de la surface extérieure.

Dans ce cas, un bilan explicite de rayonnement à la surface est à prendre en compte (activer l'option « bilan explicite » du logiciel). Il faut alors veiller à enlever la part radiative du coefficient de transfert thermique global utilisé dans le cas général, ce qui revient à considérer un coefficient d'échange convectif extérieur tel que :

$$h_{ce} = (h_e - 7,0 \times \varepsilon) \text{ W/m}^2.\text{K}$$

Où ε (-) est l'émissivité grande longueur d'onde de la surface. Cette valeur sera prise à 0,9.

Pour un calcul hygrothermique de toiture avec bilan explicite de rayonnement :

- pour un **lieu spécifique avec ombrage**, les émissivités équivalentes doivent être prises en compte (voir Tableau 8) ;
- pour un **procédé générique** diffusable sur toute la France métropolitaine, ou si l'information liée à l'ombrage n'est pas connue ou incertaine, le coefficient à utiliser est :

$$\varepsilon = 1,00 * \varepsilon_{\text{étanchéité}}$$

5.3 Modèles auxiliaires 1D

Les modèles auxiliaires permettent de prendre en compte de manière simplifiée en une dimension des phénomènes multidimensionnels complexes à modéliser de manière détaillée. Ces modèles, bien que simplifiés, permettent

d'augmenter la fiabilité des résultats des simulations, et sont raisonnablement sécuritaires par rapport au risque lié à l'humidité. Pour une description détaillée de chacun de ces modèles et leur validation expérimentale, se reporter au WTA 6-2 et aux ressources bibliographiques présentées en Annexe 3.

5.3.1 Modèle d'infiltration d'air

Même en cas de bonne mise en œuvre¹, un bâtiment possède une perméabilité à l'air non-nulle, résultante de fins défauts d'étanchéité inévitables qui subsistent dans les parois, et à travers lesquels de l'humidité intérieure est transportée par mouvement d'air appelé convection. Cette convection peut transporter des quantités d'humidité dans la paroi qui dépassent celles apportées par diffusion de plusieurs ordres de grandeur. Ainsi, des condensations supplémentaires liées à la convection d'air humide peuvent s'ajouter à celles liées à la diffusion de vapeur. Des sinistres ont par le passé été recensés sur des parois ne présentant pourtant pas de risque de condensation liée à la diffusion.

Un modèle d'infiltration possible, créé par l'institut Fraunhofer IBP et implémenté depuis dans les logiciels commerciaux de transferts hygrothermiques WUFI et DELPHIN, vise à prendre en compte de manière simplifiée² ce phénomène via l'ajout d'une source d'humidité, pour évaluer la résilience de la paroi vis-à-vis de cet apport d'eau par convection.

Cette source est une représentation d'un phénomène de condensation à l'intérieur de la paroi dû à l'infiltration d'air depuis l'intérieur, localisé derrière la couche isolante. La quantité d'air qui circule ainsi est calculée pour être réaliste vis-à-vis d'une mise en œuvre considérée comme correcte, c'est-à-dire sans défaut majeur.

Il est dès lors possible d'utiliser les options pré-calculées dans les outils WUFI et DELPHIN, ou bien de calculer soi-même la source à implanter suivant la méthode décrite dans le WTA 6.2 et rappelée en Annexe 3.

Sans information sur le niveau d'étanchéité à l'air du bâtiment, la valeur de la source d'humidité doit être dimensionnée pour une étanchéité à l'air réglementaire³ de $Q_{4Pa,surf} = 0,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$, $Q_{50} = 2,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$, et une hauteur de colonne d'air de 5 m.

Cette source d'humidité doit être affectée à l'endroit où se produira vraisemblablement la condensation, c'est-à-dire au 5 mm du premier plan froid rencontré par l'air lors d'un cheminement de l'intérieur vers l'extérieur de la paroi (exfiltration).

Dans le cas où le premier plan froid rencontré est très étanche à la vapeur d'eau (ex : métal), ou si le plan froid est une membrane (ex : pare pluie), la source doit être affectée aux 5 mm de l'isolant en contact avec le plan froid.

Par exemple, pour une paroi ossature bois, avec contreventement extérieur, ce plan froid est le panneau de contreventement (voile travaillant), donc la source doit être positionnée dans les 5 mm de panneau en contact avec l'isolant côté intérieur. Si le contreventement est à l'intérieur, ce plan froid est le pare pluie HPV en contact avec l'isolant et la source doit être positionnée dans les 5 mm de l'isolant en contact avec le pare pluie.

Pour une paroi isolée par l'intérieur, ce plan froid est le mur porteur, et la source est à positionner dans les 5 mm de mur en contact avec l'isolant.

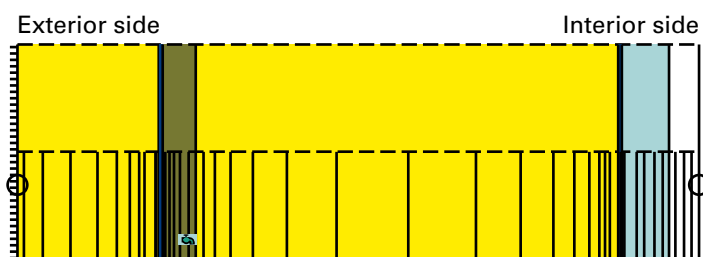
Si un niveau d'étanchéité à l'air inférieur à $Q_{4Pa-surf} = 0,6 \text{ m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ est revendiqué, la valeur de Q_{50} et la hauteur de colonne d'air sont à justifier à l'aide des CCTP.

¹ Notamment au niveau des membranes, qui doivent être posées conformément au DTU 31.2

² Une modélisation détaillée du transfert d'air est possible mais ne fournit pourtant pas un gain en précision sur la prédiction du risque car le chemin réel emprunté par l'air est le plus souvent inconnu. L'approche simplifiée par source fournit donc une précision suffisante dans ce contexte.

³ On prendra garde aux surfaces de référence utilisées pour exprimer ces indicateurs. Pour le $Q_{4Pa-surf}$, il s'agit de la somme des surfaces des parois froides hors plancher bas (appelé $AT_{bât}$). Pour le Q_{50} , il s'agit de la somme des surfaces des parois froides avec plancher bas (la surface d'enveloppe)

Figure 6 – Source d'humidité affectée aux cinq premiers millimètres du panneau de contreventement placé côté extérieur. Composition de l'intérieur vers l'extérieur : Parement, lame d'air, pare-vapeur, isolant, panneau bois, isolant, pare-pluie



Dans le cas où la géométrie de la paroi oblige de réaliser une simulation en 2D, la source peut être précalculée sur une partie courante 1D puis intégrée dans l'assemblage 2D sous forme de fichier source.

5.3.2 Modèle de pénétration accidentelle de pluie battante

Ce modèle s'applique exclusivement aux parois isolées par l'extérieur.

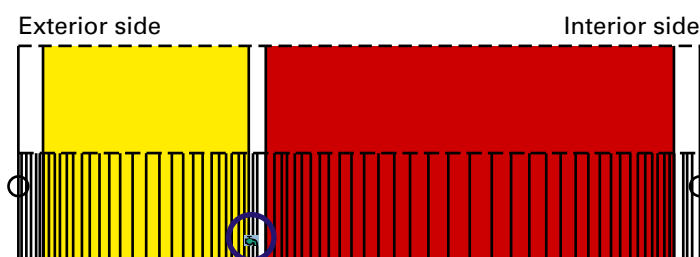
Si les détails de jonctions et leur mise en œuvre permettent de démontrer que cette étanchéité à l'eau est garantie, alors cette source de pénétration d'eau de pluie peut être considérée comme nulle.

Suite à des dommages liés à la pénétration de pluie battante à travers des défauts ponctuels du revêtement extérieur ce modèle a été proposé dans l'ASHRAE 160P.

Ce standard propose d'inclure une pénétration d'eau de pluie résiduelle dans l'assemblage, pour reproduire le fait que les joints et les liaisons (ex : jonctions avec menuiseries) peuvent être des points d'entrée localisés pour la pluie battante, malgré une bonne mise en œuvre. Le but de ce modèle est d'évaluer la robustesse des assemblages vis-à-vis de cet apport d'eau liquide.

Pour utiliser ce modèle, il est préconisé par la norme ASRHAE 160P de placer une source d'humidité sur les 5 mm derrière l'isolant extérieur (généralement dans la couche de colle ou le mur support, selon le mode de fixation de l'isolant), correspondant à 1 % de la quantité de pluie battante reçue par la façade.

Figure 7 – Source d'humidité placée derrière l'ITE dans les cinq premiers millimètres de la couche de colle.



Dans le cas où la géométrie de la paroi oblige à réaliser une simulation en 2D, cette source peut être pré calculée sur une partie courante 1D puis intégrée dans l'assemblage 2D sous forme de fichier source.

5.3.3 Modèle de lame d'air ventilée (ou modèle de renouvellement d'air)

Ce modèle ne s'applique qu'aux parois concernées par la pluie battante au paragraphe 5.1, et ne s'applique pas aux couvertures.

Ce modèle permet de prendre en compte l'effet d'échange d'humidité et de chaleur dans une lame d'air ventilée sur l'extérieur pour une paroi verticale.

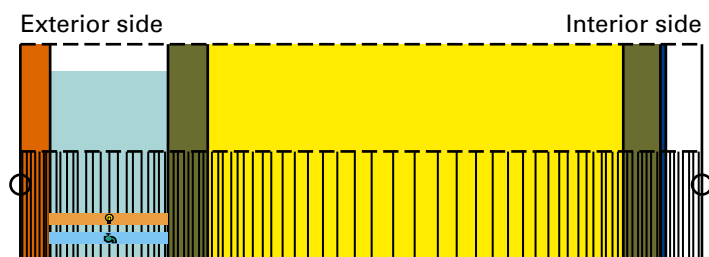
En 1D, les flux de chaleur et d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur sont perpendiculaires à la paroi, tandis que le flux d'air dans la lame d'air est parallèle à la paroi. Par conséquent, l'échange d'humidité dû à la lame d'air est modélisé par des termes source/puits pour la chaleur et l'humidité. Une

hypothèse importante de ce modèle est que l'air extérieur est instantanément mélangé dans la lame d'air de sorte que sa température et son humidité soient uniformes.

Les termes sources de chaleur et d'humidité sont affectés à l'épaisseur de la lame d'air ventilée.

Le paramètre d'entrée essentiel de ce modèle est le taux de renouvellement d'air de la lame d'air.

Figure 8 – Affectation d'une source de chaleur et d'humidité à l'épaisseur de la lame d'air ventilée



Les valeurs suivantes de taux de renouvellement d'air selon la configuration de lame d'air devront être testées pour choisir la plus défavorable vis-à-vis du risque hygrothermique :

Tableau 10 – Gammes de taux de renouvellement d'air dans la lame d'air en fonction des configurations

CONFIGURATION DE LA LAME D'AIR VENTILÉE	TAUX DE RENOUVELLEMENT D'AIR [VOL/H]
Façade ou bardage ventilé	3 – 20 – 200
Double mur maçonné avec ventilation	1 – 5
Toiture froide du DTU 43.4 (pente de 3 à 5 %)	0,5 – 1

Pour une configuration donnée de lame d'air, il convient de tester les différents taux de renouvellement d'air suggérés pour choisir celui qui est le plus défavorable vis-à-vis du risque hygrothermique.

Dans le cas où la géométrie de la paroi oblige de réaliser une simulation en 2D, ces sources de chaleur et d'humidité peuvent être précalculées sur une partie courante 1D puis intégrée dans l'assemblage 2D sous forme de fichier source.

5.3.4 Modèle de lame d'air ventilée de sous couverture

Pour les toitures inclinées avec lame d'air ventilée de sous couverture ou lame d'air ventilée sous l'écran de sous toiture, il est préférable d'utiliser des paramètres de transfert équivalents et pour modéliser la couverture et la lame d'air. Ces paramètres sont appliqués directement en conditions aux limites sur la couche de sous couverture (écran de sous-toiture par exemple) sans modéliser la couverture ni la lame d'air ventilée :

$$h_{conv,eq} = [W/m^2.K-1]$$

$$a_{eq} = 0,9 * a$$

$$\varepsilon_{eq} = \varepsilon = 0,9$$

a [–] est le coefficient d'absorption solaire du revêtement de toiture, à déterminer avec le nuancier présenté au paragraphe 5.2.1.



6.1 Domaine de calcul – Maillage

Les équations de conservation de la chaleur et de l'humidité sont résolues par des méthodes numériques sur un domaine de calcul pendant un temps donné. A partir d'une géométrie, il est pertinent de réduire au maximum le domaine de calcul en repérant les symétries.

Il est important de vérifier le comportement de la paroi en partie courante en monodimensionnel, avant d'examiner les points singuliers en bidimensionnel, afin de mieux appréhender leur impact.

Ce domaine de calcul doit être discrétisé spatialement à l'aide d'un maillage. Le système d'équations couplées sera résolu à chaque pas de temps sur les nœuds de ce maillage.

Une grille trop grossière peut avoir pour conséquences un nombre important d'erreurs de convergence et un différentiel hydrique excessif en fin de calcul (voir partie 7).

De manière générale, on retiendra les bonnes pratiques suivantes lors de la construction du maillage :

- raffiner le maillage aux interfaces (matériau-matériau ou matériau-ambiance) et plus particulièrement au niveau des zones de fort gradient des paramètres du modèle. Ces zones de fort gradient apparaissent par exemple à l'interface entre deux matériaux de propriétés très différentes (exemple : métal-isolant) ;
- s'assurer que chaque couche de matériau est subdivisée en suffisamment de mailles (au moins 5) ;
- tester l'indépendance de la solution au maillage en comparant une des grandeurs de sortie globale (ex : teneur en eau moyenne globale) et locale (ex : teneur en eau locale dans une zone de fort gradient).

6.2 Discrétisation temporelle et méthode numérique

Les calculs de transfert hygrothermiques doivent être réalisés au pas de temps horaire avec des données d'entrée échantillonnées avec ce même pas de temps. Les données météo extérieures doivent être mesurées au pas de temps horaire (ne pas interpoler au pas de temps horaire des données hebdomadaires par exemple).

La méthode numérique de résolution est propre à chaque logiciel. Il faut être vigilant à la valeur de la tolérance relative qui caractérise l'écart maximal admissible entre les résultats de deux itérations successives. Pour un pas de temps donné, il arrive que ce critère ne soit pas satisfait alors que le nombre maximal d'itérations est atteint, ce qui conduit à une erreur de convergence.

La plupart des logiciels du marché utilisent un pas de temps adaptatif pour faciliter la convergence à chaque pas de temps horaire.

6.3 Durée de la simulation

La simulation devra débuter le premier octobre ou le premier décembre, et sa durée sera de 3 ans au minimum. Elle doit permettre d'aboutir à la stabilisation de la teneur en eau totale de l'assemblage d'une année sur l'autre. Dans certains assemblages avec un faible potentiel de séchage, une simulation de 10 ans ou plus peut être nécessaire pour atteindre cette stabilisation. On considère que la stabilisation est atteinte quand l'écart de teneur en eau d'une année sur l'autre ne dépasse pas 2 %.

6.4 Conditions initiales

Les conditions initiales sont les valeurs de température et d'humidité indiquées en début de simulation. Pour tous les matériaux constituant les parois à simuler, on choisira une température initiale de 20°C et une humidité relative initiale de 80 %.

L'humidité initiale peut être néanmoins différente d'un matériau à l'autre, notamment lors d'une mise en œuvre par voie humide (ex : béton, chape liquide, etc.), mais d'après les critères de l'Annexe 1, l'analyse des résultats des simulations se fait uniquement sur la dernière année après stabilisation de la teneur en eau totale d'une année sur l'autre.

Dans ce contexte, la teneur en eau et la température initiales des matériaux n'auront pas un rôle discriminant sur l'estimation du risque lié à l'humidité, bien qu'elles aient un impact direct sur le temps de séchage de l'assemblage.

Le but de ce guide est bien est de traiter la pérennité de l'ouvrage à long terme, pas de prédire finement la durée de séchage initial.

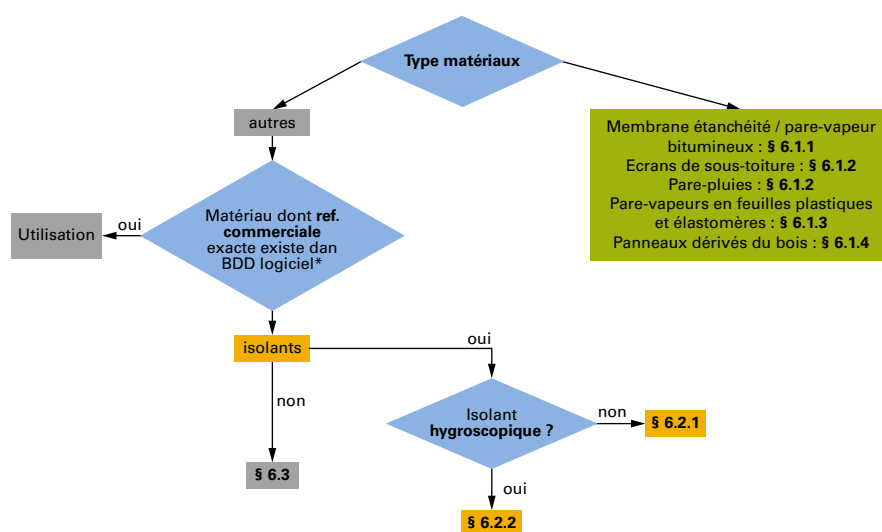
Malgré l'absence de critère d'évaluation sur le temps de séchage dans ce guide, il convient de rappeler que la non-protection d'un matériau contre les intempéries sur le chantier (notamment les isolants fibreux, biosourcés, ainsi que le bois), peut mener à des teneurs en eaux proches de la saturation capillaire à l'état initial, rendant le séchage ultérieur très lent ou impossible.



Le paragraphe suivant définit la méthodologie pour justifier l'utilisation des propriétés hygrothermiques des différents types de matériaux dans les simulations pour l'estimation des risques liés à l'humidité. Cette méthode n'est à utiliser que dans ce cadre et n'est par exemple pas adaptée aux calculs de consommations d'énergie qui sont à mener conformément aux règles Th-Bât. Lors d'un calcul pour investiguer les risques liés à l'humidité, pour une propriété donnée, il convient de tester les deux valeurs bornes encadrants la valeur déclarée.

L'arbre décisionnel suivant permet de synthétiser l'approche et renvoie vers les paragraphes pertinents pour plus de précisions :

Figure 9 – Arbre décisionnel pour la détermination des propriétés physiques des matériaux



* **BDD Logiciel** contenant des valeurs mesurées conformément au paragraphe 7.3 du présent document.

7.1 Membranes et panneaux dérivés du bois

Du fait de la relative disparité des propriétés de transmission de la vapeur d'eau de ces produits, et de leur impact majeur sur les risques liés à l'humidité, il n'est pas possible de définir pour ce type de produit des valeurs génériques, en particulier concernant le S_d .

Ainsi, pour toute simulation hygrothermique réalisée dans le cadre d'une estimation d'un risque de condensation, l'utilisation d'une membrane ou d'un panneau dérivé de bois doit être associée à une référence commerciale précise sur ces produits.

En outre, certains paramètres physiques à utiliser pour les calculs pour ces produits (dont le S_d) se déterminent selon les recommandations ci-dessous.

7.1.1 Membrane d'étanchéité et pare-vapeur bitumineux

Sont visés dans le présent paragraphe les pare-vapeurs bitumineux conformes à la norme produit NF EN 13970:2005 et les membranes d'étanchéité conformes à la norme produit NF EN 13707:2014 et NF EN 13956:2013.

La valeur du S_d se détermine par un essai conforme à la norme NF EN 1931.

En particulier pour les membranes d'étanchéité bitumineuses conformes à la norme produit NF EN 13707:2014, la déclaration du coefficient de transfert de vapeur d'eau μ dans le cadre d'un marquage CE n'est pas obligatoire. Le cas échéant des valeurs par défaut, potentiellement non sécuritaires, sont utilisables dans le cadre du marquage CE pour ce type de produit. Ainsi pour ce type de produit, l'utilisation d'une valeur de μ (ou S_d) déclarée par le fabricant dans le cadre d'un marquage CE doit être complétée pour la justification d'un rapport d'essai conforme à NF EN 1931.

Les autres propriétés des panneaux (masse volumique, porosité, conductivité, capacité thermique, diffusion d'eau liquide) peuvent indifféremment être :

- issue d'une mesure spécifique rattachée à la référence commerciale du panneau. Les mesures sont à réaliser conformément au § 7.3 ;
- les valeurs par défaut suivantes :

Tableau 11 – Propriétés par défaut utilisables pour les membranes d'étanchéité et pare-vapeur bitumineux

MASSE VOLUMIQUE [kg/m³]	POROSITÉ e [-]	CONDUCTIVITÉ λ [W/(m.K)]	CAPACITÉ THERMIQUE C_p [J/(kg.K)]	DIFFUSION LIQUIDE (D_{ww} et D_{ws}) [m²/s]
2000	0,001	0,5	1000	0

7.1.2 Ecrans souples de sous-toiture et pare-pluies

Sont visés dans le présent paragraphe les écrans souples de sous-toiture conformes à la norme produit NF EN 13859-1:2014 et les pare-pluies conformes à la norme produit NF EN 13859-2:2014.

Dans le cas d'un écran de sous-toiture non perméable à la vapeur d'eau, c'est-à-dire pour une valeur de S_d déclarée supérieure à 0,18 m, la mise en œuvre doit se faire en ménageant une lame d'air ventilée sur l'extérieur en sous face de l'écran. Aucune valeur de S_d n'est donc requise dans la simulation (cf. § 5.3.4 pour la méthode à utiliser pour modéliser ce cas).

Pour des écrans ou pare-pluie perméables ou hautement perméables à la vapeur d'eau, la valeur de S_d est déclarée par le fabricant conformément aux normes NF EN 13859-1 et -2. Cette valeur déclarée et le contrôle de production en usine doivent faire l'objet d'un suivi. Il est réalisé par un organisme tierce partie indépendant accrédité par le COFRAC ou un membre de l'*European Accreditation* selon la norme NF EN ISO/CEI 17065. La fréquence de suivi se détermine par l'organisme tierce partie indépendant et ne doit pas être inférieure à 3 ans. Cette fréquence peut être modulée en fonction notamment du dispositif d'autocontrôle mis en place, des fréquences de production, etc.

Par ailleurs, les mesures $S_{d_a}(t)$ sont réalisées dans le cadre du suivi conformément à la norme NF EN ISO 12572 conditions C et 5 éprouvettes et sont conformes si :

$$S_{d_a}(t) \leq S_d$$

Les autres propriétés des panneaux (masse volumique, porosité, conductivité, capacité thermique, diffusion d'eau liquide) peuvent indifféremment être :

- issues d'une mesure spécifique rattachée à la référence commerciale du panneau. Les mesures sont à réaliser conformément au § 7.3 ;
- les valeurs par défaut suivantes :

Tableau 12 – Propriétés par défaut utilisables pour les écrans souples de sous toitures et pare pluies

MASSE VOLUMIQUE [kg/m³]	POROSITÉ e [-]	CONDUCTIVITÉ λ [W/(m.K)]	CAPACITÉ THERMIQUE Cp [J/(kg.K)]	DIFFUSION LIQUIDE (D _{ww} et D _{ws}) [m²/s]
600	0,001	2	2000	0

7.1.3 Pare-vapeurs en feuilles plastiques et élastomères

Sont visés dans le présent paragraphe les pare-vapeurs conformes à la norme produit NF EN 13984:2013.

Pare-vapeur dont aucune hygrovariabilité n'est revendiquée par le fabricant

La valeur de $S_{d,d}$ est déclarée par le fabricant conformément à la norme produit NF EN 13984:2013. Cette valeur déclarée et le contrôle de production en usine doivent faire l'objet d'un suivi. Il est réalisé par un organisme tierce partie indépendant accrédité par le COFRAC ou un membre de l'*European Accreditation* selon la norme NF EN ISO/CEI 17065. La fréquence de suivi se détermine par l'organisme tierce partie indépendant et ne doit pas être inférieure à 3 ans. Cette fréquence peut être modulée en fonction notamment du dispositif d'autocontrôle mis en place, des fréquences de production, etc.

Par ailleurs, les mesures $S_d(t)$ sont réalisées dans le cadre du suivi conformément à la norme NF EN 1931 et sont conformes si :

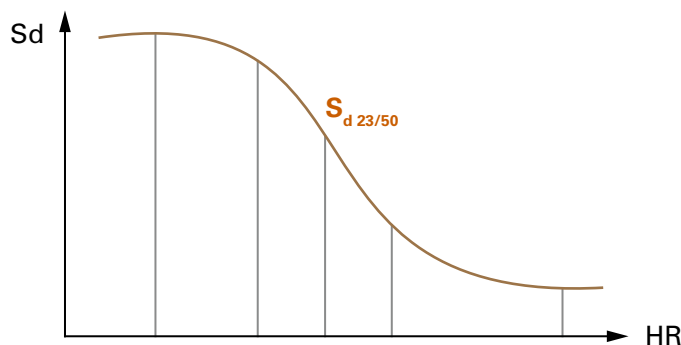
$$S_{d,d} \leq S_d(t) \leq 1,3 \cdot S_{d,d}$$

Pare-vapeur dont le caractère hygrovariable est revendiqué par le fabricant

La caractéristique hygrovariable du pare-vapeur, revendiqué par le fabricant, doit avoir fait l'objet d'un essai réalisé par un organisme indépendant du fabricant permettant de mesurer la variation du S_d en fonction de l'humidité relative. La courbe doit être caractérisée par au minimum :

- un point de mesure à 23°C et HR moyen de la membrane de 50 % ;
- quatre points de mesure supplémentaires à 23°C. Les humidités relatives moyennes à appliquer sont à déterminer par l'organisme indépendant en fonction notamment du domaine d'emploi revendiqué par le fabricant.

Figure 10 – Illustration du caractère hygrovariable des pare-vapeurs – Convention pour le suivi du S_d



La valeur de $S_{d,d}$ déclarée par le fabricant conformément à la norme NF EN 13984 correspond à la mesure à 23°C et 50 % d'humidité relative. Cette valeur déclarée et le contrôle de production en usine doivent faire l'objet

d'un suivi. Il est réalisé par un organisme tierce partie indépendant accrédité par le COFRAC ou un membre de l'European Accreditation selon la norme NF EN ISO/CEI 17065. La fréquence de suivi se détermine par l'organisme tierce partie indépendant et ne doit pas être inférieure à 3 ans. Cette fréquence peut être modulée en fonction notamment du dispositif d'autocontrôle mis en place, des fréquences de production, etc.

Par ailleurs, les mesures S_d 23/50 (t) sont réalisées dans le cadre du suivi conformément à la norme NF EN 1931 et sont conformes si :

$$S_d < S_{d23/50}(t) \leq 1,3 \cdot S_d$$

En outre, le caractère hygrovariable doit être suivi par reproduction par l'organisme tierce partie indépendant des essais caractérisant la courbe $S_d = f(HR)$, au minimum tous les 5 ans. L'adéquation entre chaque courbe de suivi est laissée à l'appréciation de l'organisme tierce partie indépendant.

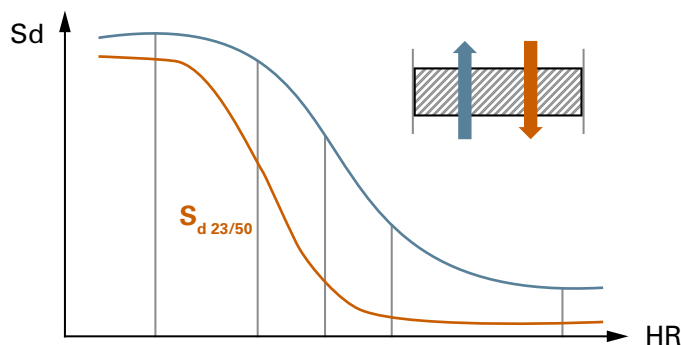
Les essais sont à réaliser selon la norme NF EN 1931.

Pare-vapeur dont les caractères hygrovariable et directionnel sont revendiqués par le fabricant

Les caractères hygrovariable et directionnel du pare-vapeur, revendiqués par le fabricant, doivent avoir fait l'objet d'un essai réalisé par un organisme indépendant du fabricant permettant de mesurer la variation du S_d en fonction de l'humidité relative, dans les deux sens de flux de vapeur. La courbe doit être caractérisée par au minimum :

- un point de mesure à 23°C et HR moyen de la membrane de 50 %, dans les deux sens du flux de vapeur ;
- quatre points de mesure supplémentaires à 23°C, dans les deux sens du flux de vapeur. Les humidités relatives moyennes à appliquer sont à déterminer par l'organisme indépendant en fonction notamment du domaine d'emploi revendiqué par le fabricant.

Figure 11 – Illustration du caractère hygrovariable et directionnel des pare-vapeurs – Convention pour le suivi du S_d



La valeur de S_{d_d} déclarée par le fabricant conformément à la norme NF EN 13984 correspond à la mesure à 23°C et 50 % d'humidité relative dans l'un des deux sens du flux de vapeur. Cette valeur déclarée et le contrôle de production en usine doivent faire l'objet d'un suivi. Il est réalisé par un organisme tierce partie indépendant accrédité par le COFRAC ou un membre de l'European Accreditation selon la norme NF EN ISO/CEI 17065. La fréquence de suivi se détermine par l'organisme tierce partie indépendant et ne doit pas être inférieure à 3 ans. Cette fréquence peut être modulée en fonction notamment du dispositif d'autocontrôle mis en place, des fréquences de production, etc.

Par ailleurs, les mesures $S_d(t)$ sont réalisées dans le cadre du suivi conformément à la norme NF EN 1931 et sont conformes si :

$$S_d < S_{d23/50}(t) < 1,3 \cdot S_d$$

En outre, les caractères hygrovariable et directionnel doivent être suivis par reproduction par l'organisme tierce partie indépendant des essais caractérisant la courbe $S_d = f(HR)$, au minimum tous les 5 ans. L'adéquation entre chaque courbe de suivi est laissée à l'appréciation de l'organisme tierce partie indépendant.

Les autres propriétés des panneaux (masse volumique, porosité, conductivité, capacité thermique, diffusion d'eau liquide) peuvent indifféremment être :

- issue d'une mesure spécifique rattachée à la référence commerciale du panneau. Les mesures sont à réaliser conformément au § 7.3 ;
- les valeurs par défaut suivantes du Tableau 13.

Tableau 13 — Propriétés par défaut utilisables pour les pare vapeur en feuilles plastique ou élastomère

MASSE VOLUMIQUE [kg/m³]	POROSITÉ e [-]	CONDUCTIVITÉ λ [W/(m.K)]	CAPACITÉ THERMIQUE C_p [J/(kg.K)]	DIFFUSION LIQUIDE (D_{ww} et D_{ws}) [m²/s]
100	0,001	2	2000	0

7.1.4 Panneaux à base de bois

Sont visés dans le présent paragraphe les panneaux à base de bois tels que :

- les panneaux contreplaqués conformes à la norme NF EN 636 ;
- les panneaux lamibois (LVL) conformes à la norme NF EN 14374 ou la norme NF EN 14279 ;
- les panneaux OSB 3 ou OSB 4 conformes à la norme NF EN 300 ;
- les panneaux de particules conformes à la norme NF EN 312 ;
- les panneaux de fibres de type SB-H ou SB-E conformes à la norme NF EN 622-4. ;
- les panneaux de fibres de type MDF-RWH conformes à la norme NF EN 622-5.

Les valeurs suivantes doivent être issues de **mesures** conformes aux normes d'essais citées ci-dessous :

- masse volumique apparente sèche ρ selon NF EN 323 ;
- S_d selon NF EN ISO 12572 coupelle sèche et humide ;
- isotherme de sorption selon NF EN ISO 12571.

Les valeurs de $S_{d,s}$ et de masse volumique sèche ρ_d déclarée par le fabricant et le contrôle de production en usine doivent faire l'objet d'un suivi. Il est réalisé par un organisme tierce partie indépendant accrédité par le COFRAC ou un membre de l'European Accreditation selon la norme NF EN ISO/CEI 17065. La fréquence de suivi se détermine par l'organisme tierce partie indépendant et ne doit pas être inférieure à 3 ans pour les panneaux contreplaqués et lamibois et à 1 an pour les panneaux OSB, de fibres et de particules. Cette fréquence peut être modulée en fonction notamment du dispositif d'auto-contrôle mis en place, des fréquences de production, etc.

Les autres propriétés des panneaux (porosité, conductivité, diffusion d'eau liquide, capacité thermique) peuvent indifféremment être :

- issues de mesures spécifiques rattachées à la référence commerciale du panneau. Les mesures sont à réaliser conformément au § 7.3 ;
- les valeurs par défaut suivantes, regroupée dans le Tableau 14.

Tableau 14 – Porosité, conductivité et capacité thermique par défaut utilisables pour les panneaux dérivés de bois

TYPE DE PANNEAU	POROSITÉ ε [-]	CONDUCTIVITÉ λ [W/(m.K)]	CAPACITÉ THERMIQUE C_p [J/(kg.K)]
Panneaux de particules	0,5	0,13	1700
Panneaux de fibres de type MDF-RWH ou SB-H ou SB-E	0,8	0,10	1700
OSB 3	0,6	0,11	1700
OSB 4	0,57	0,13	1700
Panneaux contreplaqués et Lamibois	0,5	0,11	1600

Les caractéristiques de succion et redistribution d'eau liquide à utiliser par défaut pour ces matériaux sont présentées en Annexe 4.

7.2 Isolants thermiques

La conductivité thermique déclarée par le fabricant (mesures réalisées après conditionnement à 23°C-50 %) peut être utilisée comme donnée d'entrée dans tous les cas. Les autres propriétés physiques se déterminent différemment selon le caractère hygroscopique du produit isolant.

7.2.1 Isolant non hygroscopique

Un produit isolant est considéré non hygroscopique si la quantité d'eau adsorbée dans le produit est simultanément :

- inférieure à 10 % en masse pour HR = 80 % ;
- inférieure à 20 % en masse pour HR = 90 %.

Dans le cas contraire il est considéré comme hygroscopique (cf § 6.2.2.).

Pour un isolant non hygroscopique, les propriétés du produit (masse volumique, sorption, diffusion d'eau liquide...) peuvent indifféremment être :

- issues d'une mesure spécifique rattachée à la référence commerciale du produit. Les mesures sont à réaliser conformément au § 6.3 ;
- issues de valeurs génériques de la BDD.

7.2.2 Isolant hygroscopique

Pour un isolant hygroscopique, les propriétés du produit (masse volumique, sorption, diffusion d'eau liquide...) doivent être issues d'une mesure spécifique rattachée à la référence commerciale du produit. Les mesures sont à réaliser conformément au § 6.3.

Il n'est en effet pas possible de déterminer des propriétés génériques d'isolants hygroscopiques du fait de la forte variabilité de ces propriétés d'un produit à l'autre (cf Annexe 4).

7.3 Autres produits / matériaux

Dans le cas où il s'agit d'un produit attaché à une référence commerciale, ses propriétés physiques peuvent indifféremment être :

- issues de valeurs génériques de la BDD ;
- issues d'une mesure spécifique rattachée à la référence commerciale du produit. Les mesures sont à réaliser conformément au tableau suivant :

Tableau 15 — Procédures de mesure des différentes propriétés des matériaux

PROPRIÉTÉ MATÉRIAU	NÉCESSITÉ	NORMES
Masse volumique apparente sèche $\rho_s [kg/m^3]$	Toujours	Matériaux isolants: EN 1602 Mortar and Plaster: EN 1015-10 Briques : EN 772-4
Porosité ε [-]	Toujours	Pycnomètre à l'hélium (mesure porosité ouverte)
Capacité thermique spécifique $C_p [\frac{J}{kg \cdot K}]$	Toujours	NF EN ISO 11357-4 (mesure DSC)
Conductivité thermique sèche (10°C)	Toujours	EN 12664 et 12667 (fluxmètre et plaque chaude) Formule d'interpolation en fonction de l'humidité : $\lambda(w) = \lambda_o \cdot (1 + b \cdot \frac{w}{\rho_s})$ pour certains matériaux
Conductivité thermique humide après conditionnement à 23°C / 50 % HR (mesurée à 10°C)	Pour tout produit isolant disposant d'une norme Européenne Harmonisée et dont la valeur de conductivité humide est requise dans le cadre du Marquage CE	EN 12664 et 12667 (fluxmètre et plaque chaude) Après conditionnement à 23°C / 50 % HR
Facteur de résistance à la vapeur	Toujours	EN 12572, 1931 Mesure coupelle sèche Mesure coupelle humide si matériau hygroscopique
Coefficient de transports liquides D_{ws} et D_{ww}	Seulement pour matériau capillaire, c'est-à-dire les enduits, isolants à base de silicates de calcium, isolants à base de fibre de bois, les briques	Déduits de la mesure de l'absorptivité liquide A selon NF EN ISO 15148 (immersion partielle)
Isotherme de sorption	Seulement pour matériaux hygroscopiques	Domaine hygroscopique EN 12571 (0-95 %) Plaque de succion pour domaine super-hygroscopique (95-100 %) Pour certains matériaux, il est suffisant de connaître et pour approximer l'isotherme : $w(RH) = w_f(b-1) \frac{RH}{b-RH}$

S'il s'agit d'un matériau générique, non rattaché à une référence commerciale, ou si la référence commerciale du produit est inconnue au moment de l'étude de risque, les propriétés physiques doivent être issues des valeurs génériques de la BDD.

Il n'est pas possible d'associer des données mesurées pour une référence commerciale spécifique à un autre produit, même jugé « proche » à dire d'expert, du fait des interactions complexes entre propriétés physiques (cf. Annexes).



8.1 Vérification de la cohérence du calcul

Le nombre d'erreurs de convergence doit toujours être vérifié en premier lieu à l'issue des calculs. Deux types d'erreurs peuvent être enregistrées.

- lorsque le solveur se limite à un nombre maximal d'itérations même si le critère de convergence n'est pas atteint, pour éviter des itérations infinies. Cela peut conduire à de petites différences non significatives ;
- lorsque le solveur diverge. Dans ce cas les résultats ne sont pas fiables. Ces erreurs peuvent avoir plusieurs origines (liste non exhaustive) : maillage pas assez fin en partie courante ou à l'interface entre deux matériaux, courbe anguleuse d'un paramètre de matériau, présence de lames d'air « sans sorption d'humidité supplémentaires », sources d'eau appliquées à un emplacement trop restreint d'un matériau sursaturé, matériau avec faible capacité de stockage d'humidité à un emplacement où la condensation interstitielle entraîne une sursaturation de ce matériau.

Si le nombre d'erreurs de convergence n'est pas nul, il convient de vérifier le différentiel des bilans hydriques en comparant le bilan de la teneur en eau totale pendant la période de calcul (négatif : séchage, positif : accumulation) à la somme des flux d'humidité à travers les surfaces et des sources.

Lorsque les erreurs numériques sont minimales et durent peu de temps, la différence entre les deux balances est très faible (quelques dizaines de grammes sur la période de calcul). À l'inverse une différence élevée indique des résultats peu fiables.

Des solutions correctives doivent alors être apportées au modèle : affiner le maillage, activer le contrôle de pas de temps adaptatif, utiliser des lames d'air « avec sorption d'humidité supplémentaire », élargir la zone d'application des sources.

8.2 Résultats de simulation

La signification pratique des résultats peut être interprétée suivant différentes méthodes :

- en comparant les conditions hygrothermiques obtenues avec les limites spécifiées ;
- en contrôlant le risque d'accumulation d'humidité. L'évolution de la teneur totale en eau dans la construction sera évaluée en étudiant son évolution sur toute la durée de la simulation ;
- en évaluant la tolérance à l'humidité de la construction (potentiel de séchage) ;

- en traitant les résultats transitoires à l'aide d'un modèle de post-traitement (par exemple pour le développement des moisissures ou des algues, la pourriture, la corrosion ...) ;
- en réalisant une étude de sensibilité des paramètres les moins bien connus pour comprendre leur impact sur les résultats de simulation.

Les risques sont évalués à partir des teneurs en eau en % des humidités relatives des produits et de leurs évolutions sur toute la durée de la simulation.

8.3 Critère de non-accumulation d'eau

Le premier élément à vérifier est la teneur en eau de la paroi dans sa globalité. Cette teneur en eau doit se stabiliser d'une année sur l'autre à l'issue de la durée de la simulation. On considère que la stabilisation est atteinte si la teneur en eau totale annuelle ne dépasse pas 2 % entre les deux dernières années de simulation.

8.4 Absence de condensation dans la masse

Une paroi, pour être jugée satisfaisante, ne pourra pas contenir des éléments dont l'humidité relative est supérieure à 98 %, même en des endroits particuliers de la paroi. Compte tenu des tolérances du logiciel, si l'humidité relative est supérieure ou égale à 98 % ponctuellement, le risque de condensation est considéré comme très probable. La zone à investiguer sera de 5mm d'épaisseur et de 20mm de longueur.

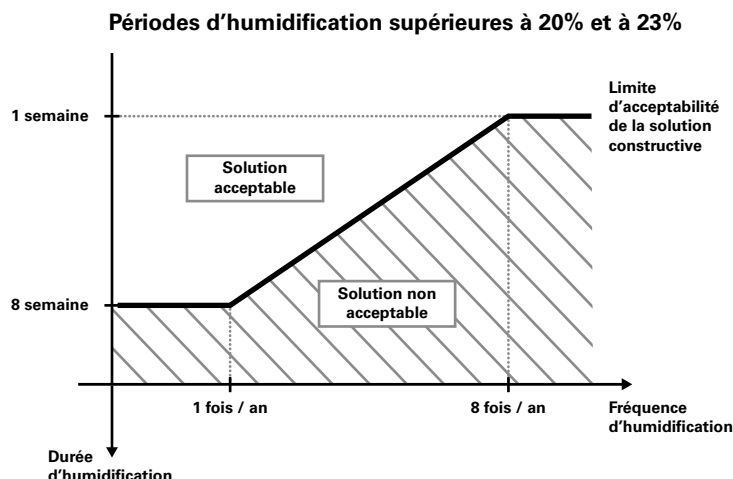
8.5 Pérennité des matériaux de structure

Tous les éléments en bois ou à base de bois intervenant dans la stabilité de l'ouvrage (panneaux de contreventement, montants et traverses d'ossature, ...) sont dimensionnés en classe de service 2 (pour limiter le fluage). Les teneurs en eau en masse en tout point de ces éléments ne doivent pas être supérieures à 20 % pendant plus de 8 semaines cumulées par an, en ne comptabilisant que les périodes supérieures à une semaine (Figure 12). La zone à investiguer sera de 5mm d'épaisseur et de 20 mm de longueur.

8.6 Absence de développement fongique dans les matériaux biosourcés

De même, la teneur en eau d'un élément de la paroi contenant des produits biosourcés n'intervenant pas dans la stabilité de l'ouvrage (tasseaux, isolants, panneaux à usage non structuraux, ...) ne pourra être qu'occasionnellement (moins de 8 semaines par an) supérieure à 23 % en masse (Figure 12). Cette limite de 23 % est basée sur des travaux en laboratoire et sur des expériences reconnues et réussies, prenant en compte les diverses conditions de germination des spores. Il est à noter que la durée de 8 semaines au-delà de 23 % est défavorable, même si elle est atteinte de manière discontinue. Les périodes au-delà de 23 % inférieures à une semaine ne seront pas comptabilisées, n'étant pas suffisamment longues pour provoquer le développement fongique. La zone à investiguer sera de 5mm d'épaisseur et de 20 mm de longueur.

Figure 12 – Représentation des limites d'humidification des matériaux



Si le produit biosourcé ne satisfait pas au critère précédent, des justificatifs expérimentaux doivent être apportés quand la résistance au développement fongique, conformément au CPT 3713_v2 pour les températures et humidité atteintes.

Ces critères utilisés à l'heure actuelle pour évaluer le risque de développement fongique dans les matériaux biosourcés ne donnent pas entière satisfaction, c'est la raison pour laquelle des actions de recherche sont en cours pour améliorer leur fiabilité.

8.7 Absence d'eau libre dans le bois ou les matériaux à base de bois

Ce critère ne s'applique pas aux matériaux en contact avec l'air extérieur (bardages, pare-pluies...)

La capacité à pouvoir contenir à la fois de l'eau libre et/ou de l'eau liée est une propriété influente des matériaux bois ou à base de bois.

L'eau est dite liée ou hygroscopique quand elle est « retenue » chimiquement (liaisons hydrogènes) par les fibres de bois. Les molécules d'eau sont alors fixées dans le matériau lui-même.

L'eau libre ou capillaire, donc liquide, apparaît dans le bois lorsque son taux d'humidité (en % en masse) dépasse le point de saturation des fibres. Pour les principales essences résineuses utilisées en structure, le point de saturation des fibres est atteint lorsque l'humidité du bois dépasse 30 % en masse.

Concernant tous les produits à base de bois, l'humidité en masse ne doit pas dépasser 30 % même ponctuellement sur l'année investiguée.



L'utilisation de la base de données générique n'est possible que dans les conditions définies dans la partie 6.

Cette base de données a pour objectif d'apporter des données génériques uniquement utilisables pour des calculs de transferts hygrothermiques. Les valeurs sont données à titre indicatif et ne peuvent être utilisées pour tout autre calcul, qu'ils soient thermiques ou réglementaires.

Les éléments présents dans cette base ont été considérés comme représentatif du Parc Immobilier Français.

Cette BDD générique proposée devrait être enrichie régulièrement sur la base des mesures disponibles.

9.1 Présentation des sources de données

Les spécificités des matériaux sont issues de la base de données générique proviennent de textes internationaux réglementaires (Règles Th, ASHRAE, etc.) et de mesures faites en laboratoire (CSTB, FCBA, IBP Fraunhofer, etc.).

Ces données peuvent aussi se trouver dans la littérature scientifique internationale, mais dans la plupart des cas, les valeurs physiques mesurées d'un matériau ne sont pas publiées, d'où la difficulté à trouver des informations fiables, ce qui entraîne alors que peu de sources pour chaque matériau.

Le tableau suivant permet d'apprécier les matériaux présents et le nombre de source(s) utilisée(s) pour la constitution de la base :

Tableau 16 – Nombre de sources utilisées pour la constitution de la BDD générique

MATÉRIAUX	NOMBRE DE SOURCE(S)
Acier	1 (§ 6.3)
Aluminium	1 (§ 6.3)
Béton C12/15	1 (§ 6.3)
Béton C35/45	1 (§ 6.3)
Béton cellulaire $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$	8 (§ 6.3)
Béton cellulaire $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$	5 (§ 6.3)
Béton cellulaire $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$	10 (§ 6.3)
Béton E/C = 0,5	2 (§ 6.3)
Béton de pierre ponce	2 (§ 6.3)
Bloc de silico-calcaire	3 (§ 6.3)
Bloc de terre cuite alvéolée	6 (§ 6.3)
Bois dur	5
Bois tendre	14
Brique ancienne peu capillaire	9 (§ 6.3)
Brique ancienne capillaire	
Brique manufacturée	7 (§ 6.3)
Chêne longitudinal	1
Chêne radial	1
Epicéa longitudinal	1
Epicéa radial	1
Laine de roche	10
Laine de verre	10
Membrane d'étanchéité bitumineuse	1 (§ 6.1.1)
Membrane plastique polymérique	1 (§ 6.1.2 & 6.1.3)
Pierre dure	8 (§ 6.3)
Pierre moyenne	4 (§ 6.3)
Pierre tendre	5 (§ 6.3)
Plaque de plâtre	11 (§ 6.3)
Polychlorure de Vinyle (PVC)	1 (§ 6.3)
Polystyrène expansé (PSE)	3 (§ 6.3)
Polystyrène extrudé (XPS)	3 (§ 6.3)
Polyuréthane (PUR)	5 (§ 6.3)

9.2 Données nécessaires aux modèles

Les paramètres d'entrée pour chaque constituant sont les suivants :

- la masse volumique ρ [kg/m^3] ;
- la porosité ε [-] ;
- la résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ [-] ($\mu = Sd / e$) ;
- la conductivité thermique λ [$\text{W}/(\text{m.K})$] ;
- la chaleur spécifique Cp [$\text{J}/(\text{kg.K})$].

Il est nécessaire d'ajouter à ces valeurs de base des paramètres variant avec l'évolution d'une ou de plusieurs grandeurs physiques. Nous retrouvons alors :

- la courbe de sorption (variation de la teneur en eau d'un produit en équilibre dans des ambiances à différents taux d'humidité) ;
- les courbes de succion et de redistribution (variation de la grandeur motrice à la diffusion liquide à différents taux d'humidité) ;
- les courbes de variation de la conductivité thermique (qui varient avec la température et la teneur en eau dans le matériau).

9.3 Démarche

Afin de créer un nouveau matériau qui se veut générique tout en étant représentatif, tous les matériaux recensés ont été analysés et comparés.

Globalement, les paramètres d'entrée de base (ρ , ε , λ , etc.) résultent de la moyenne des valeurs des matériaux, sauf en cas de très forte hétérogénéité vis-à-vis des autres valeurs. Les valeurs sont considérées comme non représentatives si elles sont supérieures de 10 % de la moyenne des autres valeurs.

Concernant les valeurs complémentaires, chacune est ajustée à la main à dire d'expert afin de correspondre et d'être le plus représentatif de sa catégorie.

ANNEXE 1

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES



1.1 Conditions aux limites intérieures

Profils annuels température/hygrométrie, mesurés en France sur des logements et bâtiments tertiaires entre 2009 et 2018, gracieusement mis à disposition par Scop ENERTECH

OQAI – Campagne nationale logements – Etat de la qualité de l’air dans les logements français, 2006

Juha Vinha, Mikko Salminen, Kati Salminen, Targo Kalamees, Jarek Kurnitski, Mihkel Kiviste, Internal moisture excess of residential buildings in Finland, Journal of Building Physics, 2018

ASHRAE Standard 160, Criteria for moisture control design analysis in buildings, 2016

REEF Volume II, Diffusion de vapeur au travers des parois – condensation, CSTB, 1980

Classement des locaux en fonction de l’exposition à l’humidité des parois et nomenclature des supports pour revêtements muraux intérieurs, cahier CSTB n°3567, Mai 2006

NF EN ISO 13788, Température superficielle intérieure permettant d’éviter l’humidité superficielle critique et la condensation dans la masse, Afnor, 2013

NF EN 15026, Evaluation du transfert d’humidité par simulation numérique, Afnor, 2008

ASHRAE 2013, ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta: ASHRAE, 2013

Künzel et al, Revue des standards internationaux pour le contrôle de l’humidité par la simulation hygrothermique de l’enveloppe. EEBM 2012, Rabat, Maroc. 26-27 Novembre 2012

Geving S, Holme J., Mean and diurnal indoor air humidity loads in residential buildings, Journal of building physics, vol 35, Issue 4, 2012

1.2 Conditions aux limites extérieures et modèles auxiliaires

AHSRAE Standard 160, Criteria for moisture control design analysis in buildings, 2016

Anton TenWolde, Charles G. Carll, Vyto Malinauskas, Air Pressures in Wood Frame Walls, Thermal Envelopes VII/Infiltrations-Practices, 1999

John Straube, Simplified prediction of driving rain on buildings: ASHRAE 160P and WUFI 4.0, Building Science Digest 148, 2010

DTU 40 : Travaux du Bâtiment – Couverture en tuiles de terre cuite à emboîtement à pureau plat

Philipp Kölsch, Andreas Zegowitz, Bernd Nusser, Daniel Zirkelbach, Hartwig Künzle, Ralf Wagner, Airflow through Lightweight Wall Assemblies – Influence of Size and Location of Leakages, Fraunhofer IBP for ASHRAE, 2016

Philipp Kölsch, Hygrothermal Simulation of ventilated pitched roofs with effective transfer parameters, Fraunhofer IBP, 2017

Amandine Piot, Étude des effets des infiltrations d'air humide dans une paroi de maison à ossature bois, Rapport de Post-Doctorat, CSTB et Fraunhofer IBP, 2010

Clément Belleudy, Modélisation des transferts d'air et leur impact sur le comportement hygrothermique des bâtiments, Thèse de Doctorat, CSTB – LOCIE – ADEME, Université Grenoble Alpes, 2015

Martin Krus, Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials – Theoretical Principles and New Test Methods, Fraunhofer IRB Verlag, 1996, ISBN 3-8167-4535-0

Charlotte Abelé, Bernard Abraham, Jean-Luc Salagnac, José Fontan, Daniel Quenard, Stéphane Guillot, Claude Pompeo, Transferts d'humidité à travers les parois – Guide Technique CSTB, 2009

WTA Guideline 6-2, Simulation of heat and moisture transfer, 2014

WTA Guideline 6-4, Inside insulation, 2011

WTA Guideline 6-8: Evaluation de l'humidité dans les éléments constructifs en bois – justificatif simplifié et simulation, 2016

H. M. Künzle, D. Zirkelbach, Beate Schafaczek, Modelling the effect of air leakage in hygrothermal envelope simulation, Building Enclosure Science & Technology (BEST3) Conference, 2012

Arnold Janssens, Hugo Hens, Interstitial Condensation Due to Air Leakage: A Sensitivity Analysis, Journal of Building Physics, 2003

H. M. Künzle, A. N. Karagiozis, M. Kehrle, Assessing the benefits of cavity ventilation by hygrothermal simulation, Building Physics Symposium, 2008

Graham Finch, John Straube, Ventilated wall claddings: Review, Field Performance, and Hygrothermal Modeling, ASHRAE, 2007

ANNEXE 2

NUANCIER DE COULEURS EXTÉRIEURES



Repérez la couleur représentant au mieux la teinte du composant identifié (murs, toiture, volets) et relevez le niveau correspondant (de 1 à 5).

Une erreur d'une case n'est pas gênante. Dans le cas de façades bicolores, choisir la moyenne des deux teintes pondérée par les surfaces (plus proche de la teinte dominante).

	1 très clair	2 clair	3 moyen	4 foncé	5 très foncé
Gris :					
Rouges :					
Jaunes/Oranges :					
Verts :					
Bleus :					
Violet :					

Quelques exemples de couleurs de façades et toiture :



Façade : 2
Toiture : 5



Façade : 1 ou 2
Toiture : 4



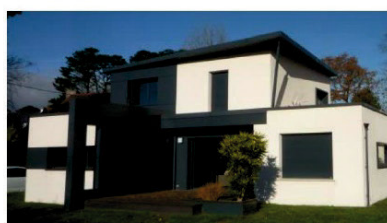
Façade : 4 ou 5
Volets : 1



Façade : 1
Toiture : 3 ou 4



Façade : 1 ou 2
Toiture : 4 ou 5



Façade : 2 ou 3
Toiture & volets : 4 ou 5

ANNEXE 3

MODÈLE D'INFILTRATION D'AIR SIMPLIFIÉ



Pour ces calculs, les hypothèses suivantes sont à prendre en compte :

- les effets thermiques de l'air pénétrant (sensible et latent) sont négligés ;
- seule la condensation dans une zone donnée du modèle géométrique est considérée, ce qui signifie que la sorption à haute humidité n'est pas prise en compte ;
- la zone de condensation doit être sélectionnée selon une expérience pratique (en pratique dans les premiers millimètres de l'isolant en contact avec la structure) ;
- le séchage par convection est exclu.

Le calcul de cette source est effectué à partir des températures intérieure, extérieure et des humidités relatives au niveau du plâtre dans toute son épaisseur et toute sa hauteur. Ces données sont issues soit des fichiers climats soit des résultats de la simulation correspondante sans terme source.

La différence de pression est calculée via l'estimation du tirage thermique et de la différence de pression liée à la ventilation mécanique. L'action du vent n'est pas prise en compte de par son action très variable et sa grande dépendance à la configuration réelle du cas étudiée.

$$\Delta P = \frac{\rho_i * T_i - \rho_e * T_e}{T_i} * g * \frac{h}{2} + \Delta P_{mec}$$

Avec :

h : la hauteur de la paroi considérée en m, soit 2,5 m en général voir 5 m si l'on considère deux niveaux communicants,

ρ_i et ρ_e : les masses volumiques de l'air intérieur et extérieur [kg/m^3] calculées en fonction de la température,

T_i et T_e : les températures de l'intérieur et de l'extérieur [K],

g : la constante gravitationnelle ($9,81 \text{ m/s}^2$),

ΔP_{mec} : la différence de pression liée à la ventilation [Pa] (valeur communément appliquée en France : 4Pa).

La différence de pression liée à la ventilation est considérée comme nulle dans la suite. Dans un souci de se placer dans le cas le plus défavorable, il est considéré que la zone étudiée n'est pas en dépression sous l'action des extracteurs d'air de la ventilation mécanique.

Dans une approche simple en une dimension dans l'épaisseur de la paroi, le débit d'air qui s'infiltré est calculé en fonction de la différence de pression obtenue précédemment et de l'étanchéité à l'air du composant de la paroi.

$$q_{CL} = k_{CL} * \Delta P$$

Avec $k_{CL} = 1.9 * 10^{-6} \frac{m^3}{m^2 * s * Pa}$, suivant la recommandation du fascicule WTA 6.2.

Cela correspond à un débit de fuite sous 50 Pa pour 1 m² de surface d'élément de paroi de $Q_{50} = 5 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$, ce qui, pour une maison moyenne de compacité 1,4 m, donne un n_{50} de 3,5 h⁻¹ environ, c'est dire un $Q_{4Pa, surf}$ Français de 1 m³/(m².h).

Dans le cas général, il convient de choisir un $Q_{50} = 2,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$ et une hauteur de colonne d'air de 5 m.

La quantification de la source d'humidité dans la paroi se fait suivant la formule suivante en ne sélectionnant que les termes positifs :

$$S_{CL} = \frac{q_{CL} * (c_i - c_{sat,p})}{\Delta x}$$

Avec :

Δx : épaisseur de la couche de matériau dans lequel se produit la condensation

c_i et $c_{sat,p}$: concentration de vapeur à l'intérieure et à saturation à la position p.

ANNEXE 4

CARACTÉRISTIQUES DE SUCCION ET REDISTRIBUTION D'EAU LIQUIDE PAR DÉFAUT POUR PANNE AUX DÉRIVÉS DE BOIS

Panneaux de particules

SUCCION	
w [kg/m³]	DWS [m²/s]
0	0
50	5,00E-12
400	6E-12

REDISTRIBUTION	
w [kg/m³]	DWW [m²/s]
0	0
70	8,50E-12
80	9,5E-12
400	5,00E-10

Panneaux contreplaqués et Lamibois

SUCCION	
w [kg/m³]	DWS [m²/s]
0,0	0,0
70,0	7E-12
572,0	9E-12

REDISTRIBUTION	
w [kg/m³]	DWW [m²/s]
0,0	0,0
55,0	5,1E-11
63,0	5,3E-11
572,0	5E-10

Panneaux de fibres de type MDF-RWH (EN 622-5)

SUCCION	
w [kg/m³]	DWS [m²/s]
0,0	0,0
27,0	1E-12
999,0	1,3E-12

REDISTRIBUTION	
w [kg/m³]	DWW [m²/s]
0,0	0,0
38,0	1E-10
999,0	1E-6

Panneaux de fibres de type SB-E ou SB-H (EN 622-4)

SUCCION	
w [kg/m³]	DWS [m²/s]
0,0	0,0
70,0	1,5E-12
667,0	1,8E-12

REDISTRIBUTION	
w [kg/m³]	DWW [m²/s]
0,0	0,0
94,0	1E-13
667,0	5E-7

OSB 3

SUCCION	
w [kg/m ³]	DWS [m ² /s]
0	0
90	3,86E-13
570	1,30E-10

REDISTRIBUTION	
w [kg/m ³]	DWW [m ² /s]
0	0
90	3,86E-13
570	1,30E-10

OSB 4

SUCCION	
w [kg/m ³]	DWS [m ² /s]
0	0
97,5	4,98E-13
542	1,44E-10

REDISTRIBUTION	
w [kg/m ³]	DWW [m ² /s]
0	0
97,5	4,98E-13
541,5	1,44E-10

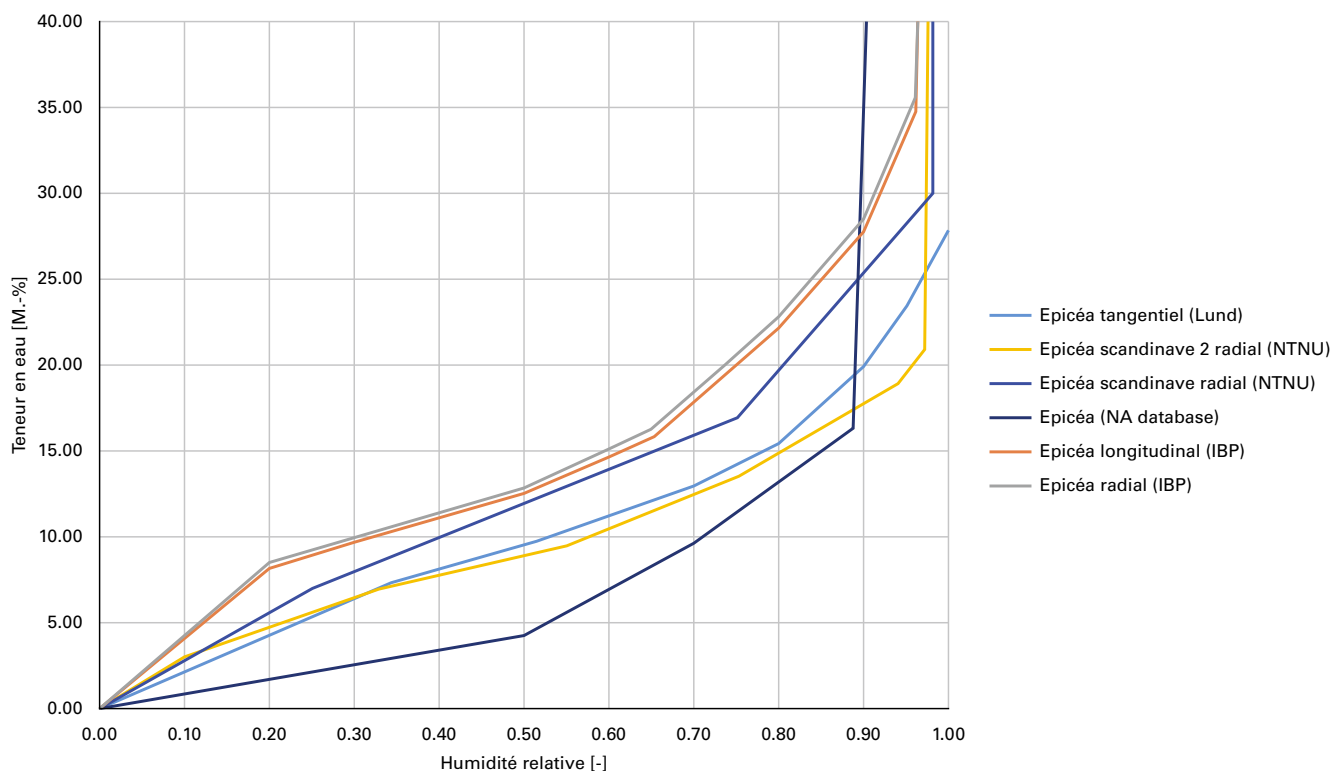
ANNEXE 5

VARIABILITÉ DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Même si deux matériaux semblent s'apparenter l'un à l'autre par leurs propriétés physiques de base, comme la conductivité thermique ou la masse volumique, leurs propriétés complémentaires peuvent s'avérer fortement différentes.

Pour illustrer ces propos, prenons l'exemple d'un matériau en bois tendre, type épicéa. L'exemple d'un matériau en bois n'est pas anodin : en fonction de la zone géographique de l'arbre, ses propriétés se trouvent très variables. En prenant la courbe d'isotherme de sorption du bois, le graphique ci-dessous nous montre une grosse disparité des courbes, et notamment au niveau de la limite de développement fongique, fixée à 20 % en masse. En observant les deux épicéas de coupe radiale, nous observons une importante variation du seuil de franchissement allant de 75 % à 95 % en humidité relative.

Courbes de sorption des différents épicéa rapporté en masse



La sorption n'est pas le seul paramètre qui peut changer entre deux matériaux d'apparence identique. Des grandeurs tout autant dommageables comme la résistance à la diffusion de vapeur d'eau ou les coefficients de transfert d'eau liquide peuvent changer la viabilité d'utilisation d'un matériau.

Néanmoins, les matériaux biosourcés ne sont pas les seuls impactés par ces variations. Globalement, tous matériaux du bâtiment sont différents, c'est pourquoi l'utilisation d'un matériau dont les mesures sont certifiées permet de valider leur viabilité.

TABLE DES MATIÈRES

01 • INTRODUCTION	4
02 • DOMAINE D'APPLICATION	5
03 • GÉNÉRALITÉS	6
04 • CONDITIONS AUX LIMITES INTÉRIEURES	7
4.1 Sources des données	8
4.2 Consignes de systèmes	8
4.3 Abaques	9
4.3.1 Définition de l'abaque d'excès d'humidité	9
4.3.2 Calcul de la température et de l'humidité relative intérieures	10
05 • CONDITIONS AUX LIMITES EXTÉRIEURES ET MODÈLES AUXILIAIRES	15
5.1 Pluie battante	17
5.2 Rayonnement	20
5.2.1 Rayonnement solaire (courte longueur d'onde)	20
5.2.2 Rayonnement grande longueur d'onde	21
5.3 Modèles auxiliaires 1D	22
5.3.1 Modèle d'infiltration d'air	23
5.3.2 Modèle de pénétration accidentelle de pluie battante	24
5.3.3 Modèle de lame d'air ventilée (ou modèle de renouvellement d'air)	24
5.3.4 Modèle de lame d'air ventilée de sous couverture	25
06 • AUTRES PARAMÈTRES	26
6.1 Domaine de calcul – Maillage	26
6.2 Discrétisation temporelle et méthode numérique	26
6.3 Durée de la simulation	27
6.4 Conditions initiales	27
07 • MATÉRIAUX	28
7.1 Membranes et panneaux dérivés du bois	28
7.1.1 Membrane d'étanchéité et pare-vapeur bitumineux	29
7.1.2 Ecrans souples de sous-toiture et pare-pluies	29
7.1.3 Pare-vapeurs en feuilles plastiques et élastomères	30
7.1.4 Panneaux à base de bois	32
7.2 Isolants thermiques	33
7.2.1 Isolant non hygroscopique	33
7.2.2 Isolant hygroscopique	33
7.3 Autres produits / matériaux	34
08 • EXPLOITATION DES RÉSULTATS DE SIMULATION	35
8.1 Vérification de la cohérence du calcul	35
8.2 Résultats de simulation	35
8.3 Critère de non-accumulation d'eau	36

8.4	Absence de condensation dans la masse	36
8.5	Pérennité des matériaux de structure.....	36
8.6	Absence de développement fongique dans les matériaux biosourcés.....	36
8.7	Absence d'eau libre dans le bois ou les matériaux à base de bois.....	37
09	• BASE DE DONNÉES MATÉRIAUX.....	38
9.1	Présentation des sources de données	38
9.2	Données nécessaires aux modèles.....	39
9.3	Démarche.....	40
ANNEXE 1	• RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	41
1.1	Conditions aux limites intérieures	41
1.2	Conditions aux limites extérieures et modèles auxiliaires.....	41
ANNEXE 2	• NUANCIER DE COULEURS EXTÉRIEURES.....	43
ANNEXE 3	• MODÈLE D'INFILTRATION D'AIR SIMPLIFIÉ.....	45
ANNEXE 4	• CARACTÉRISTIQUES DE SUCCION ET REDISTRIBUTION D'EAU LIQUIDE PAR DÉFAUT POUR PANNE AUX DÉRIVÉS DE BOIS.....	47
ANNEXE 5	• VARIABILITÉ DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	49

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1	– Abaques permettant le calcul de la température et l'excès d'humidité intérieurs. Les températures en abscisses sont des valeurs moyennes glissantes sur les durées spécifiées	9
Tableau 2	– $\Delta w_{\max}$ en fonction de la classe d'hygrométrie du local.....	9
Tableau 3	– Définition de la classe d'hygrométrie du local à partir de l'excès d'humidité moyen du local	9
Tableau 4	– Exemple de production d'humidité pour un logement	10
Tableau 5	– Classement des locaux par classes d'hygrométrie selon le DTU 31.2.....	10
Tableau 6	– Coefficient de pluie battante	18
Tableau 7	– Correspondance entre niveau de teinte et coefficient d'absorption solaire	20
Tableau 8	– Prise en compte des ombrages	21
Tableau 9	– Résistances thermiques superficielles à considérer (source : Fascicule « Méthodes – Généralités » des Règles Th-Bât édition 2017)	22
Tableau 10	– Gammas de taux de renouvellement d'air dans la lame d'air en fonction des configurations	25
Tableau 11	– propriétés par défaut utilisables pour les membranes d'étanchéité et pare-vapeur bitumineux.....	29
Tableau 12	– propriétés par défaut utilisables pour les écrans souples de sous toitures et pare pluies	30
Tableau 13	– propriétés par défaut utilisables pour les pare vapeur en feuilles plastique ou élastomère.....	32
Tableau 14	– Porosité, conductivité et capacité thermique par défaut utilisables pour les panneaux dérivés de bois....	33
Tableau 15	– Procédures de mesure des différentes propriétés des matériaux.....	34
Tableau 16	– Nombre de sources utilisées pour la constitution de la BDD générique.....	39

TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Arbre décisionnel de calcul du climat intérieur	8
Figure 2 – Arbre décisionnel pour le calcul de la température et de l'humidité relative intérieures.	14
Figure 3 – Arbre décisionnel de choix des conditions aux limites extérieures et modèles auxiliaires pour les parois les plus courantes	16
Figure 4 – Angle d'inclinaison d'une paroi en coupe verticale	18
Figure 5 – Zones climatiques dites de concomitance pluie-vent et carte associée (extrait du DTU 40.21)	19
Figure 6 – Source d'humidité affectée aux cinq premiers millimètres du panneau de contreventement placé côté extérieur. Composition de l'intérieur vers l'extérieur : Parement, lame d'air, pare-vapeur, isolant, panneau bois, isolant, pare-pluie	24
Figure 7 – Source d'humidité placée derrière l'ITE dans les cinq premiers millimètres de la couche de colle.	24
Figure 8 – Affectation d'une source de chaleur et d'humidité à l'épaisseur de la lame d'air ventilée	25
Figure 9 – Arbre décisionnel pour la détermination des propriétés physiques des matériaux.	28
Figure 10 – Illustration du caractère hygrovariable des pare-vapeurs – Convention pour le suivi du Sd	30
Figure 11 – Illustration du caractère hygrovariable et directionnel des pare-vapeurs – Convention pour le suivi du Sd.	31
Figure 12 – Représentation des limites d'humification des matériaux	37

NOTES





Les productions du programme PACTE sont le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.

Retrouvez gratuitement la collection sur www.programmepacte.fr

LES PARTENAIRES DU PROGRAMME PACTE

MAÎTRES D'OUVRAGE



ENTREPRISES/ARTISANS



MAÎTRES D'ŒUVRE



CONTRÔLEURS TECHNIQUES



INDUSTRIELS



ASSUREURS



PARTENAIRES PUBLICS



Le Secrétariat Technique du programme PACTE est assuré par l'Agence Qualité Construction.

GUIDE

DÉTERMINATION DES HYPOTHÈSES POUR LES SIMULATIONS DE TRANSFERTS COUPLÉS TEMPÉRATURE / HUMIDITÉ DANS LES PAROIS DE BÂTIMENT

OCTOBRE 2021



PROGRAMME D'ACTION POUR LA QUALITÉ DE LA CONSTRUCTION ET DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE