

Faculté des bioingénieurs

**Cinétique de sorption/désorption
dans les bois de structure exposés
aux intempéries :
Première approche**

| | |
|--------------------|---|
| Auteur : | Vincent Defays |
| Promoteurs : | Prof. Caroline Vincke (UCL/ELI/ELIE) Hugues Frère ir. (Hout Info Bois) |
| Lecteurs : | Stéphane Charon ir. (CSTC) Prof. Mathieu Jonard (UCL/ELI/ELIE) |
| Année Académique : | 2018 - 2019 |
| Bioingénieur : | Gestion des forêts et des espaces naturels |

Remerciements

Je souhaite qu'en parcourant ces lignes, le lecteur puisse percevoir, par-delà le caractère inévitablement stéréotypé des formules de remerciements, la réelle reconnaissance dont elles sont imprégnées.

Madame la Professeure Vincke, promotrice de ce mémoire, m'a guidé de ses conseils et a accordé du temps pour le suivi de ce travail.

Monsieur Frère, co-promoteur de ce mémoire, m'a permis de travailler dans des conditions propices au bon déroulement de ce travail, m'a conseillé et a contribué grandement à la réalisation de ce mémoire par les nombreux échanges que nous avons eu.

Monsieur Charon et Monsieur Michaux ont suivi mon cheminement avec attention et intérêt. Leurs suggestions, leurs remarques ont eu une influence notoire sur mon travail.

Les conseils de Mathieu Vinckbooms, et de l'ensemble des techniciens du CSTC, leur efficacité et leur aide lors des préparations des expérimentations au CSTC m'ont été très utiles.

Nicolas Malmendier m'a aidé dans la traduction de textes allemands.

Le soutien et les conseils de Lola Vrydagh, amie fidèle, me furent précieux.

À chaque instant depuis le début de mes études, j'ai pu compter sur le soutien et l'aide de ma famille, en particulier mon père qui m'a beaucoup apporté de part les réflexions que nous avons pu partager, ses compétences et connaissances sur lesquelles j'ai pu m'appuyer ; c'est un bien dont le prix n'est pas à mesurer.

À tous, sincèrement, merci.

Résumé

La construction bois est en plein essor en Belgique. Cette tendance devrait se confirmer, voire s'accroître à l'avenir car elle est puissamment soutenue par le développement de la conscience environnementale des consommateurs. Mais la construction bois ne pourra réellement tirer parti de cet éveil qu'à condition d'être techniquement complètement maîtrisée. L'hygroscopicité du bois constitue, en particulier, une difficulté potentielle. L'objectif de ce travail est de contribuer à l'établissement de la cinétique des variations du taux d'humidité de bois de structure exposés aux intempéries. Il s'agit en particulier de répondre aux questions suivantes. Combien de temps un bois de structure peut-il rester exposé aux intempéries avant que des problèmes ultérieurs ne soient à craindre ? Ou combien de temps un bois de structure humide doit-il sécher à l'extérieur pour éviter de tels problèmes ? Les recherches ont commencé par des mesures du taux d'humidité de bois de structure très récemment mis en œuvre sur chantier. Les résultats ont révélé que les bois de structure étaient généralement posés secs ; la suite des travaux s'est dès lors focalisée sur la reprise d'humidité, donc sur la première des deux questions. Un suivi temporel du taux d'humidité de bois de structure a été effectué sur des caissons expérimentaux installés en extérieur successivement chaque mois, de décembre à avril. Il a montré un accroissement à la fois rapide et important du taux d'humidité des bois durant la période hivernale. En partant de 13% d'humidité, des bois ont atteint et dépassé le seuil des 20% en moins de 6 semaines. Ensuite, durant le printemps, les bois ont lentement séché. Les taux d'humidité atteints dépassent les taux d'humidité à l'équilibre qu'indiquent les hystérèses de sorption/désorption. La connaissance de l'humidité relative de l'air est donc insuffisante pour évaluer le taux d'humidité des bois. La mise en correspondance des taux d'humidité avec les paramètres météorologiques a révélé l'importance de la pluviosité et de la température notamment. Compte tenu de son caractère exploratoire, ce travail a soulevé de nombreuses questions, dont le traitement réclamera une évolution des méthodes de mesure.

Mots clefs :

hygroscopicité (hygroscopicity), humidité d'équilibre (equilibrium moisture content),
humidité des bois de structure (timber moisture content)

Table des matières

| | |
|---|------------|
| Remerciements | i |
| Résumé | iii |
| Liste des abréviations | ix |
| Table des figures | xi |
| Liste des tableaux | xv |
| Introduction | 1 |
| | |
| I Revue de la littérature | 5 |
| | |
| 1 L'eau et le bois : rappels théoriques | 7 |
| 1.1 Contenu en humidité du bois | 7 |
| 1.2 Les phases de l'eau dans le bois | 9 |
| 1.3 Hystérèse de sorption/désorption | 10 |
| 1.4 <i>Equilibrium Moisture Content</i> du bois | 11 |
| | |
| 2 Le bois et les variations d'humidité | 13 |
| 2.1 Modes de transport hydrique | 13 |
| 2.2 Les mouvements d'humidité dans le bois | 15 |
| 2.3 Variations temporelles de l'humidité du bois | 16 |
| | |
| 3 Les dangers d'une reprise d'humidité dans la construction bois | 21 |
| | |
| 4 Synthèse | 25 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| II | Taux d'humidité des bois sur chantier | 27 |
| 5 | Matériel & Méthodes | 29 |
| 5.1 | Choix des chantiers | 29 |
| 5.1.1 | Chantiers visités | 30 |
| 5.2 | Choix des pièces | 30 |
| 5.3 | Méthodes de mesure | 31 |
| 5.3.1 | Appareillage | 32 |
| 5.3.2 | Mode opératoire | 32 |
| 6 | Présentation des résultats | 35 |
| 6.1 | Résultats | 35 |
| 6.1.1 | Taux d'humidité par type de pièces | 35 |
| 6.1.2 | Autres taux d'humidité | 36 |
| 6.2 | Conclusion | 37 |
| III | Suivi temporel du taux d'humidité de pièces de bois | 39 |
| 7 | Matériel & Méthodes | 41 |
| 7.1 | Confection des caissons expérimentaux | 41 |
| 7.1.1 | Ossature bois | 41 |
| 7.1.2 | Matériaux utilisés | 43 |
| 7.2 | Appareillage | 43 |
| 7.2.1 | Capteurs | 43 |
| | Positions des capteurs | 43 |
| | Ancrage | 44 |
| 7.2.2 | Système d'acquisition | 45 |
| 7.2.3 | Météorologie | 45 |
| 7.3 | Méthode de mesure | 47 |
| 7.4 | Positionnement des caissons | 48 |
| 7.5 | Traitement de données | 49 |
| | Tri | 49 |
| | Désignation des caissons et capteurs | 49 |
| | Logiciels | 49 |
| | Période d'expérimentation | 50 |
| 7.6 | Erreurs et artéfacts | 51 |
| | Saut d'enregistrement | 51 |
| | Absence d'acquisition | 51 |
| | Données aberrantes | 52 |

| | |
|---|-----------|
| Résistances de référence | 52 |
| Vérifications | 52 |
| 8 Résultats & discussions | 53 |
| 8.1 Analyse des variations d'humidité | 53 |
| 8.1.1 Analyses brutes | 53 |
| 8.1.2 Effet de la température | 54 |
| Résultats | 54 |
| Discussion | 54 |
| 8.1.3 Paradoxe des humidités | 56 |
| Résultats | 56 |
| Discussion | 57 |
| 8.1.4 Effet du type de caisson | 59 |
| Résultats | 59 |
| Discussion | 59 |
| 8.1.5 Effet de la date de pose | 60 |
| Résultats | 60 |
| Discussion | 60 |
| 8.1.6 Tendance générale | 62 |
| Résultats | 62 |
| Discussion | 62 |
| 8.1.7 Reprise d'humidité hivernale | 65 |
| Résultats | 65 |
| Discussion | 65 |
| | |
| IV Discussion générale | 69 |
| | |
| Discussion générale | 71 |
| | |
| V Conclusion | 75 |
| | |
| Conclusion | 77 |
| | |
| Bibliographie | 81 |
| | |
| Annexes | 85 |
| | |
| A Mesures sur chantier | 87 |
| A.1 Taux d'humidité sur chantiers | 87 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| A.2 | Autres taux d'humidité sur chantiers | 89 |
| B | Variation des taux d'humidité des caissons expérimentaux | 91 |
| B.1 | Caissons décembre (1218) | 91 |
| B.2 | Caissons janvier (0119) | 92 |
| B.3 | Caissons février (0219) | 93 |
| B.4 | Caissons mars (0319) | 94 |
| B.5 | Caissons avril (0419) | 95 |
| C | Données météorologiques | 97 |

Liste des abréviations

CSTC Centre Scientifique et Technique de la Construction

EMC Equilibrium Moisture Content

PSF Point de saturation des fibres

RH Humidité Relative de l'air

TH Taux d'Humidité

Table des figures

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Diagramme schématique montrant une représentation de la distribution de l'eau dans une cellule de bois, a au-dessus du PSF, b au PSF, et c en-dessous du PSF (PSF ici dénommé M_f). (Skaar, 2012) | 9 |
| 1.2 | Courbe de sorption de l'eau du <i>Araucaria klinkii</i> . (Kelsey, 1957) | 10 |
| 1.3 | Hystérèse de sorption du <i>Pseudotsuga menziesii</i> . (Spalt, 1958) | 10 |
| 1.4 | Illustration d'un hystérèse de sorption/désorption intermédiaire. | 11 |
| 2.1 | Convection hydrique en surface d'une pièce de bois. | 14 |
| 2.2 | Variation de l'humidité du bois (MC) avec le temps en réaction à des variations d'humidité relative pour des échantillons de bois d'épaisseurs de 0,5 et 2 cm, à 30 ° C (Droin-Josserand et al., 1988). | 16 |
| 2.3 | Variations mensuelles de l'humidité relative (φ), de l'humidité du bois de 4 espèces différentes (1 à 4), de l'EMC calculé (u_{gl}) et de la température (ϑ) (Tsoumis, 1960). | 18 |
| 2.4 | Variations hebdomadaires de l'humidité relative (φ), de l'humidité du bois de 4 espèces différentes (1 à 4), et de l'EMC calculé (u_{gl}) (Tsoumis, 1960). | 18 |
| 2.5 | Variations journalières de l'humidité relative (φ), de l'humidité du bois de 4 espèces différentes (1 à 4), et de l'EMC calculé (u_{gl}) (Tsoumis, 1960). | 19 |
| 2.6 | Variations horaires de l'humidité relative (φ), de l'humidité du bois de 4 espèces différentes (1 à 4), de l'EMC calculé (u_{gl}) (Tsoumis, 1960). | 19 |
| 3.1 | Pathologies des menuiseries intérieure et extérieure et des ossatures bois. Division "Avis techniques" du CSTC. | 21 |
| 3.2 | Humidité emprisonnée dans une toiture compacte. | 23 |
| 5.1 | Paroi d'ossature bois, avec sa lisse haute, sa lisse basse et ses montants verticaux. | 31 |
| 5.2 | Boitier Gann HYDROMETTE M 4050 (à gauche) et électrode à marteau M 18 (à droite). (GANN, 2005) | 32 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.3 | Électrode à marteau lors de la prise de mesure d'humidité d'un montant vertical d'un mur extérieur. | 33 |
| 5.4 | Schéma de mesure de la résistance électrique. (Vinckbooms, 2018) | 33 |
| 7.1 | Exemple de paroi pleine avec sa membrane en caoutchouc. | 42 |
| 7.2 | Caisson "vide" (à gauche) et caisson "plein" (à droite). | 42 |
| 7.3 | Ensemble pointe-connecteur-câble à une distance de 0,5 fois (à gauche) et 0,3 fois (à droite) la largeur de la pièce à partir de l'une des rives . . . | 45 |
| 7.4 | Schéma du circuit que forment le datalogger, le bois, les câbles de connexions et la résistance de référence. | 47 |
| 7.5 | Position des caissons (en rouge) entre le hangar et les maisons dans lesquelles se situe le système d'acquisition. | 49 |
| 7.6 | Ligne du temps de l'expérimentation. | 51 |
| 7.7 | Saut d'enregistrement de données dans un fichier excel de données brutes. | 51 |
| 7.8 | Absence d'acquisition de données dans un fichier excel de données brutes. | 51 |
| 8.1 | Taux d'humidité du bois du 21/12/18 au 21/05/19 du caisson "grand fermé" posé en décembre 2018. | 54 |
| 8.2 | Effet de la température sur les variations journalières (données provenant de GO 1218), avec W_{corr} l'humidité corrigée par la température et W_{stamm} l'humidité calculée avec température constante. | 55 |
| 8.3 | Comparaison du taux d'humidité du bois [%], de l'humidité relative de l'air [%] et de la température de l'air [$^{\circ}$ C]. | 56 |
| 8.4 | Corrélation entre les variations d'humidité du bois (W_{corr}), d'humidité relative de l'air (HR), et de température (T $^{\circ}$ C). | 57 |
| 8.5 | Variations du taux d'humidité du bois [%] et de l'humidité absolue de l'air [g/m^3]. | 58 |
| 8.6 | Comparaison des taux d'humidité des caissons ouverts et fermés. | 59 |
| 8.7 | Courbes des moyennes journalières des taux d'humidité des caissons fermés selon leur mois de pose. | 61 |
| 8.8 | Courbes des moyennes journalières des taux d'humidité des caissons fermés selon leur mois de pose (période d'avril à mai). | 61 |
| 8.9 | Tendance générale de la variations d'humidité du bois (moyennes journalières du caisson GF 1218). | 62 |
| 8.10 | Variations des moyennes journalières de l'humidité relative de l'air et de la température durant les 5 mois de l'expérience. | 63 |
| 8.11 | Fluctuations observées sur la courbe de la tendance générale des variations d'humidité du bois. | 64 |

| | | |
|-------|---|----|
| 8.12 | Pluviométrie moyenne par intervalle de 15 min durant toute période de l'expérience. | 64 |
| 8.13 | Comparaison de la reprise d'humidité du bois avec différents paramètres météorologiques. | 66 |
| 8.14 | Abaque d'équilibre hygroscopique des résineux selon la norme EN 1995 1-1 (à gauche), Hystéresis du <i>Picea Abies</i> à 5,5 ° C (à droite). | 67 |
| 8.15 | Analyse en composante principale entre humidité du bois, la température et l'humidité relative de l'air. | 68 |
| | | |
| B.1.1 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 1218. | 91 |
| B.2.2 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GF 0119. | 92 |
| B.2.3 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 0119. | 92 |
| B.3.4 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GF 0219. | 93 |
| B.3.5 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 0219. | 93 |
| B.4.6 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GF 0319. | 94 |
| B.4.7 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 0319. | 94 |
| B.5.8 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GF 0419. | 95 |
| B.5.9 | Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 0419. | 95 |
| | | |
| C.0.1 | Variation des moyennes journalières de l'humidité relative de l'air durant toute la période d'expérimentation. | 97 |
| C.0.2 | Variation des moyennes journalières de température de l'air durant toute la période d'expérimentation. | 98 |
| C.0.3 | Variation des moyennes journalières de la vitesse du vent durant toute la période d'expérimentation. | 98 |
| C.0.4 | Pluviométrie moyenne par intervalle de 15 min durant toute période de l'expérience. | 99 |

Liste des tableaux

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1 | Nombre de mesures prises sur chantier par entreprise et par pièce de bois. | 34 |
| 6.1 | Moyennes des mesures d'humidité du bois par type de pièces prises et par chantier. | 36 |
| 6.2 | Moyennes des autres mesures d'humidité du bois de l'entreprise Batisomme | 36 |
| 6.3 | Moyennes des autres mesures d'humidité du bois de l'entreprise Paquet . | 37 |
| 7.1 | Signification des abréviations des noms des caissons et des capteurs. . . | 50 |
| A.1.1 | Mesures d'humidité du bois par type de pièces prises sur un chantier de l'entreprise Chimsco | 87 |
| A.1.2 | Mesures d'humidité du bois par type de pièces prises sur un chantier de l'entreprise Synergie Bois | 87 |
| A.1.3 | Mesures d'humidité du bois par type de pièces prises sur un chantier de l'entreprise Paquet | 88 |
| A.1.4 | Mesures d'humidité du bois par type de pièces prises sur un chantier de l'entreprise Batisomme | 88 |
| A.2.5 | Mesures d'humidité du bois supplémentaires prises sur le chantier de l'entreprise Chimsco | 89 |
| A.2.6 | Mesures d'humidité du bois supplémentaires prises sur le chantier de l'entreprise Paquet | 89 |
| A.2.7 | Mesures supplémentaires prises sur le chantier de l'entreprise Batisomme | 90 |

Introduction

Depuis une vingtaine d'années, la construction bois ne cesse de se développer en Belgique. La dernière version du rapport sur l'état de la construction bois que rédige tous les deux ans Hout Info Bois (Frère, 2019) révèle qu'en 2018, sur l'ensemble du territoire belge, 2 514 maisons individuelles ont été construites en bois, ce qui représente plus de 10% des parts de marché. Ces maisons ont été construites et/ou fabriquées par 124 entreprises de construction, qui recourent de façon croissante à la préfabrication. C'est à la lumière de tels chiffres qu'apparaît la vigueur de la construction bois, et l'importance qu'elle a acquise, non seulement dans le domaine strictement économique, mais aussi dans le domaine culturel, le succès grandissant du bois traduisant une évolution fondamentale de la conception du bâtiment et de l'habitat, particulièrement précieuse dans une perspective de développement durable. Cette perspective doit être soulignée car c'est sans doute encore davantage ce que sera la construction bois qui doit être pris en considération, plutôt que ce qu'elle est. L'inquiétude qu'inspirent le changement climatique et les désordres environnementaux d'une façon générale confirmera et accentuera très vraisemblablement la modification des modes de consommation qui s'amorce actuellement. Cette tendance sera le tremplin de la construction bois qui doit être comprise comme une manière efficace de servir l'intérêt collectif, non seulement en stockant le dioxyde de carbone et en tempérant ainsi le changement climatique, mais aussi, sinon surtout, en utilisant une matière première indéfiniment renouvelable. Mais la construction bois ne pourra tirer parti d'un développement de la conscience environnementale du consommateur qu'à condition d'être techniquement complètement maîtrisée pour pouvoir répondre à l'ensemble des exigences normatives et réglementaires comme aux souhaits et besoins des maîtres d'ouvrage.

L'hygroscopicité du bois, donc son affinité vis-à-vis de l'eau, est de ce point de vue une question absolument centrale. Le bois mis en œuvre échange continuellement de l'humidité avec son environnement, ce qui, dans certaines conditions d'humidité élevée ou d'exposition à de l'eau liquide, peut mener à des détériorations biologiques. Dans ce contexte, l'humidité des bois de structure au moment de leur mise en œuvre est déterminante pour la qualité de l'ouvrage, voire pour sa durée de vie, et le contrôle de ce paramètre ne pose pas de problème majeur. Mais la réalité de l'acte de construire

pousse à dépasser cette simple évidence. Il arrive très fréquemment que la mise hors d'eau des bois de structure ne suive pas immédiatement leur mise en œuvre. Inévitablement, le bois, exposé aux intempéries, absorbera de l'eau, et exposera ainsi l'ouvrage à des risques importants. Mais le bois peut également être posé rapidement après le sciage, sans avoir le temps de sécher. Ce qui serait dangereux alors, ce serait de refermer trop rapidement l'enveloppe et d'enfermer l'humidité subsistante. Pour limiter ces risques au maximum, deux questions sont alors posées :

1. Après combien de temps faut-il abriter une structure dont le bois a été posé "sec", sec signifiant ici en-dessous de l'humidité recommandée ?
2. Combien de temps faut-il laisser exposée une structure dont le bois a été posé "humide", humide signifiant ici au-dessus de l'humidité recommandée ?

C'est à ces questions fondamentales pour la construction bois que ce travail contribuera à répondre.

Les ouvrages décrivant et étudiant les différentes relations entre l'eau et le bois ne sont pas rares, citons notamment les ouvrages de Stamm (1964) , Skaar (2012) et Siau (1971). Dans la majorité des cas, ces ouvrages traitent des relations eau-bois : l'hystérèse de sorption, l'interprétation thermodynamique de cette hystérèse, l'*equilibrium moisture content*, le séchage ou encore les phénomènes de retrait et gonflements. Toutefois, ces ouvrages n'apportent pas d'informations sur le sujet ici traité. De rares ouvrages abordent la question de la cinétique de sorption, mais cette question n'est étudiée que des points de vue mathématique et physique, pour tenter une modélisation. En outre, ces démarches s'appuient sur des mesures effectuées dans des conditions fixées et contrôlées.

Cette difficulté à trouver de l'information concernant le sujet traité est l'expression de lacunes qui donnent tout son intérêt au travail entrepris.

L'objectif de ce travail est de déterminer si les variations du taux d'humidité du bois (TH), plus particulièrement la sorption, et la vitesse de ces variations peuvent être expliquées, en quelque proportion que ce soit, par différents paramètres tels que les conditions météorologiques, la date de pose sur chantier ou la localisation de la pièce de bois dans la paroi.

Nous avons d'abord tâché de savoir à quel taux d'humidité le bois de structure est généralement mis en œuvre. Il s'agissait donc d'abord de mesurer le TH des bois qui viennent d'être mis en œuvre sur chantier, et selon ce TH de déterminer quelle est, des deux questions posées, celle qui est prioritaire.

Ensuite, des essais ont été réalisés pour déterminer la vitesse à laquelle le phénomène de séchage ou de reprise d'humidité se produit. Ces essais ont été effectués sur des portiques en bois représentant des éléments de parois. Lors de ces essais, deux types de données ont été récoltées et étudiées conjointement :

- des données d'humidité du bois constituant les portiques expérimentaux ;
- des données météorologiques qui permettent de caractériser les conditions auxquelles les bois mis en œuvre ont été confrontés.

Ces recherches sont en réalité motivées par la volonté d'examiner deux hypothèses aux implications également importantes pour la construction bois :

1. Le bois mis en œuvre est sec et l'exposition aux intempéries provoquera une reprise d'humidité.
 - Cette reprise d'humidité est influencée par les conditions météorologiques et dépend de la période de pose.
 - Plus longtemps un bois est laissé sans protection, plus il est susceptible d'atteindre des TH supérieurs au taux recommandé.
2. Le bois mis en œuvre est mouillé et l'humidité du bois est enfermée dans la paroi après la mise hors d'eau.
 - Le bois doit sécher et le séchage est influencé par les conditions météorologiques et la période de pose.
 - Plus longtemps un bois est laissé sans protection, plus il est susceptible de sécher et d'atteindre des TH inférieurs au taux recommandé.

Il est important de mentionner que l'examen de ces deux hypothèses réclame deux démarches méthodologiquement différentes. Ces démarches seront donc traitées dans deux parties distinctes et comportant chacune leurs propres rubriques "matériels & méthode" et "résultats".

Ce document sera dès lors structuré de la façon suivante. Une première partie présentera la revue littéraire relative aux échanges eau-bois et permettra d'acquérir le bagage de connaissances nécessaire à la bonne appréhension de la question traitée.

La deuxième partie traitera de la détermination du taux d'humidité de bois de structure sur les chantiers de construction immédiatement après la pose. Les différents chantiers et résultats obtenus y seront présentés et caractérisés.

La troisième partie sera consacrée au suivi temporel des taux d'humidité de caissons expérimentaux. La méthode expérimentale y sera décrite et les résultats y seront présentés et discutés.

Ensuite, une quatrième partie sera constituée d'une discussion générale reprenant les informations importantes des deux parties.

Enfin, une cinquième partie constituera la conclusion de ce travail.

Première partie
Revue de la littérature

1 | L'eau et le bois : rappels théoriques

Quelqu'un a, un jour, lancé malicieusement que plus de 90% des problèmes liés au bois impliquent l'humidité. Pour ceux qui ignorent les bases des relations entre le bois et l'humidité, cette estimation est peut-être modeste (Hoadley, 2000).

Dans l'arbre, le bois est mouillé, les tissus cellulaires sont saturés en eau. Cependant, dans la plupart des conditions dans lesquelles le bois est utilisé, il doit être sec : cela maximise l'expression de ses propriétés mécaniques, de sa durabilité, etc... Mais le bois est un matériau hygroscopique : il aura tendance à atteindre un équilibre entre son contenu en humidité et l'humidité de l'atmosphère environnante. Un des problèmes majeurs rencontré lors de l'utilisation du bois est qu'il se rétracte lorsqu'il sèche et gonfle lorsqu'il regagne de l'humidité tant que son taux d'humidité reste inférieur à un seuil au-delà duquel la matière ligneuse est saturée. Mais le bois humide est également sujet à la dégradation par les microorganismes (Walker, 2006). Dans une optique de mise en œuvre du bois, deux objectifs sont donc évidents :

1. Sécher le bois jusqu'à son humidité d'équilibre d'utilisation,
2. Contrôler tous gains ou pertes ultérieurs d'humidité afin de minimiser les problèmes de variation de dimensions et de dégradations biologiques.

Si nous devons vulgariser les relations entre l'eau et le bois, nous dirions que l'humidité de l'atmosphère détermine le contenu en humidité du bois et que son contenu en humidité détermine, à son tour, les propriétés dimensionnelles et les propriétés de durabilité du bois, bien qu'en réalité ces interrelations sont bien plus compliquées (Hoadley, 2000).

1.1 Contenu en humidité du bois

Si nous soumettons un échantillon de bois à des conditions de température et d'humidité définies, nous constatons que son poids, sa masse ou plus généralement son état hydrique, atteignent une valeur bien déterminée à laquelle ils se stabilisent. Dans ce cas, on dit que l'équilibre hygroscopique est atteint. L'état hydrique de l'échantillon nous renseigne sur la quantité d'eau présente dans cet échantillon (Merakeb, 2006).

Dans le cadre de ce travail, il est impératif de comprendre ce qu'est le contenu en humidité du bois, appelé en anglais *Moisture Content* (MC) ou taux d'humidité (TH) en français, et comment il est déterminé. Le contenu en humidité du bois est défini en termes de poids initial de la pièce de bois et de poids final (sec) de cette même pièce après un séchage au four à 103 ° C jusqu'à ce que la pièce de bois ait un poids constant. La différence entre ces deux valeurs est présumée être la perte d'eau par évaporation durant le séchage qui est rapportée au poids sec de la pièce selon (Walker, 2006) :

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{\text{Poids initial} - \text{Poids sec}}{\text{Poids sec}} \times 100 \quad (1.1)$$

Le contenu en humidité du bois peut également être exprimé de la manière suivante :

$$m = W_w/W_0 \quad (1.2)$$

$$M = 100 * m, \quad (1.3)$$

avec W_w est le poids de l'eau et W_0 le poids sec du bois, M le contenu en humidité en pourcentage.

Il faut souligner que ce contenu en humidité est exprimé comme un pourcentage du poids sec et non comme un pourcentage du poids initial. Du fait de cette curieuse façon de calculer l'humidité du bois, il arrive que le TH d'un bois frais soit de 200%. C'est le cas d'une pièce de bois comportant 1/3 de matière sèche et 2/3 d'eau. Cette manière de procéder se justifie notamment par la nécessité de disposer d'un poids de référence et par le fait que l'industrie s'intéresse généralement à la quantité de bois plutôt qu'à la quantité d'eau (Walker, 2006).

Le contenu en humidité d'un bois frais varie beaucoup avec le type de bois (duramen et aubier) et le type d'essence. Mais les exigences de l'usage peuvent le fixer. Dans le cadre de ce travail, il s'agira de bois d'ossature (classe d'emploi 2¹ selon la norme NBN EN 335 : 2013, Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois) normalement séché jusqu'à un contenu en humidité inférieur à 20%.

1. La classe d'emploi 2 est une situation dans laquelle le bois ou le matériau à base de bois est sous abri et non exposé aux intempéries, mais où il peut être soumis à une humidification occasionnelle mais non persistante.

1.2 Les phases de l'eau dans le bois

L'eau dans le bois peut exister sous plusieurs phases, parfois simultanément. L'eau la plus fermement liée au matériau cellulosique du bois est l'eau de constitution (constituants des molécules du bois). Ensuite, il y a une eau *absorbée*, ou eau libre, dans les lumens des cellules et dans les espaces intercellulaires. Il y a également une eau *adsorbée*, ou eau liée (eau hygroscopique) dans les parois cellulaires (Stamm et al., 1964). Enfin, la vapeur d'eau est présente dans les cavités et les micropores dans le cas où ces derniers ne sont pas saturés en eau libre. Si de l'eau libre est présente, la pression de vapeur prend sa valeur saturante. Si l'eau libre est absente dans les cavités, la vapeur entre en équilibre thermodynamique avec l'eau liée présente sur les parois cellulaires. Cette vapeur d'eau n'est pas "titrable", c'est à dire que l'eau sous forme vapeur n'est pas quantifiable par une simple connaissance de l'état hydrique d'un échantillon (Merakeb, 2006).

Lorsque que le bois sèche, l'eau contenue dans les lumens et les espaces intercellulaires s'évapore en premier lieu. L'eau libre peut être entièrement retirée avant que l'eau liée ne soit impactée. C'est l'illustration de la distinction nette entre ces deux types de phases. Le point de saturation des fibres, (PSF) est défini comme le contenu en humidité auquel l'eau libre a été évaporée mais auquel les parois cellulaires sont toujours complètement saturées.

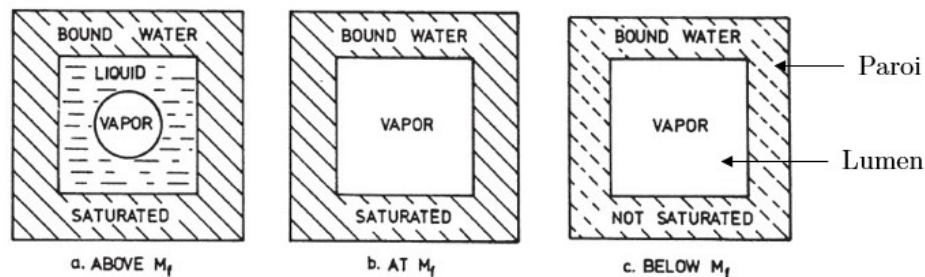


FIGURE 1.1 – Diagramme schématisant une représentation de la distribution de l'eau dans une cellule de bois, **a** au-dessus du PSF, **b** au PSF, et **c** en-dessous du PSF (PSF ici dénommé M_f). (Skaar, 2012)

L'importance du concept de saturation des fibres réside dans le fait que la nature des liaisons de l'eau absorbée et adsorbée est différente. Aussitôt que le taux d'humidité du bois se situe sous ce point critique, des changements drastiques dans les propriétés du bois apparaissent. Par exemple, des phénomènes de gonflement et retrait apparaissent, les propriétés de résistance mécanique des bois augmentent lorsque de l'eau liée est retirée ou encore, une légère hausse de la résistance électrique est observée avec la perte d'eau libre mais augmente rapidement avec la perte d'eau liée (Walker, 2006; Stamm et al., 1964). L'atlas des bois tropicaux (Gérard et al., 2016) renseigne un point de saturation des fibres égale à 33% pour l'épicéa.

1.3 Hystérèse de sorption/désorption

Les bois secs sont capables de reprendre de l'eau contenue dans l'air humide ambiant. À une température donnée, l'humidité contenue dans le bois se stabilisera à un niveau qui dépend du rapport entre la pression de vapeur d'eau P_v et la pression de vapeur saturante P_v° . Cette pression de vapeur relative est appelée humidité relative P_v/P_v° . De la même façon, lorsque le bois sèche, il finit par atteindre un état d'équilibre avec l'humidité relative de l'atmosphère. Un graphique du contenu en eau en fonction de l'humidité relative à l'équilibre à température constante donne un isotherme d'humidité représenté par une courbe sigmoïde comme illustré dans la figure 1.2. Ce graphique est en réalité constitué de deux courbes qui forment l'hystérèse de sorption/désorption. Ces deux courbes montrent que l'humidification et le séchage ne sont pas des processus identiquement réversibles. Le contenu en humidité à l'équilibre est plus élevé lorsqu'il est approché par désorption que par adsorption. De plus, une fois que le bois a séché, l'humidité initiale du bois ne sera plus atteinte si le bois est ré-humidifié, comme le montre la figure 1.3. Le séchage du bois entraîne une perte irréversible de ses capacités hygroscopiques (Merakeb et al., 2009).

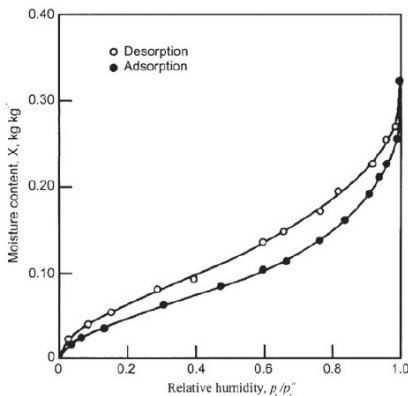


FIGURE 1.2 – Courbe de sorption de l'eau du *Araucaria klinkii*. (Kelsey, 1957)

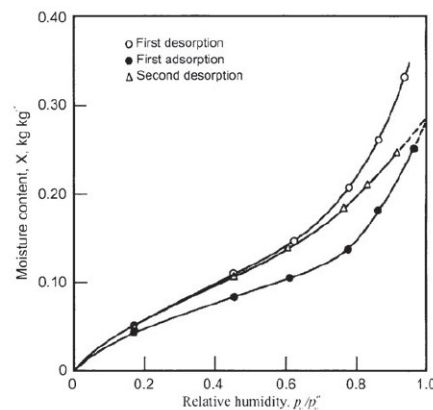


FIGURE 1.3 – Hystérèse de sorption du *Pseudotsuga menziesii*. (Spalt, 1958)

Le cycle de sorption/désorption, lorsqu'il n'est pas complet (de 0 à 100% d'humidité relative de l'air) a pour effet de réduire l'écart entre les valeurs d'humidité du bois atteintes par résorption et désorption. Skaar(2012) et Stamm (1964) ont également mentionné que les cycles isothermes effectués sur de petits intervalles d'humidité, se situent tous à l'intérieur de l'isotherme complet comme le montre la figure 1.4.

Cependant l'hystérèse de sorption présente des limites importantes pour l'usage du bois. En effet, elle ne représente pas les processus dynamiques et ne rend compte d'aucune cinétique de séchage ou de reprise d'humidité.

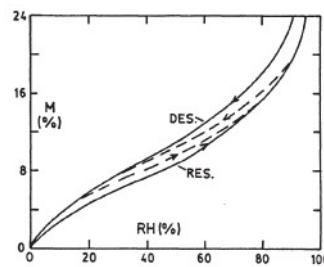


FIGURE 1.4 – Illustration d'un hystérèse de sorption/désorption intermédiaire.

1.4 *Equilibrium Moisture Content* du bois

Lorsque le bois coupé et/ou transformé, est exposé aux conditions atmosphériques, son humidité évolue jusqu'à atteindre un taux d'humidité en équilibre avec les conditions ambiantes. Ce contenu en humidité du bois à l'équilibre, désigné en anglais par *equilibrium moisture content*, en abrégé EMC, est approximativement proportionnel à l'humidité relative ambiante. Ses évolutions en fonction de l'humidité relative constituent l'hystérèse de sorption/désorption qui vient d'être présentée. En réalité, les deux courbes (adsorption et désorption) ne forment pas un "locus" d'EMC mais définissent une aire d'EMC. Pour des conditions atmosphériques données, cet équilibre varie quelque peu selon les espèces avec les différents types et proportions des constituants des parois cellulosiques et de composés extractibles. Il est également affecté par la température, par les utilisations antérieures de la pièce de bois et par le type de stress mécanique auquel elle est soumise (Skaar, 2012).

Il ne faut pas le confondre avec le *moisture content*, notion définie et expliquée précédemment (voir section 1.1), qui est le contenu en eau du bois sans tenir compte d'un équilibre quel qu'il soit.

Morton et Hearle (2008) ont montré le lien entre le temps et l'atteinte d'un équilibre à partir de la désorption et de l'adsorption. Le processus aboutissant à un équilibre est une fonction logarithmique du temps. Selon ces auteurs, des semaines, voire des mois, pourraient être nécessaires avant d'atteindre un réel équilibre.

Les paramètres à l'origine des variations de l'EMC sont à prendre en considération. Il sont rapidement passés en revue ci-après.

Effet de l'humidité relative

Le facteur le plus important affectant l'EMC est l'humidité relative de l'air à laquelle le bois est exposé. La courbe illustrant les variations de l'EMC en fonction de l'humidité relative à température constante est l'isotherme de sorption/désorption.

Effet des antécédents immédiats

Une résorption en plusieurs étapes abaisse l'EMC, ce qui se traduit par une diminution du ratio entre l'adsorption et la désorption : R/D . Un ratio plus faible montre un écart plus grand entre les valeurs d'EMC atteintes par adsorption et désorption.

Effet de la température

Skaar (2012) souligne un effet direct d'une augmentation de la température indépendamment de la réduction de l'humidité relative.

L'élévation de la température du bois a deux effets sur la sorption/désorption. Le premier effet, immédiat, est une réduction de l'EMC pour une humidité relative donnée. Le second effet est une réduction permanente de l'hygroscopicité du bois après un retour à des températures normales. L'ampleur de ce dernier effet dépend de la température et du temps d'exposition à cette température.

Effet divers

Un autre effet intéressant est peut-être l'effet des contraintes du bois en compression et en tension. Cet effet se traduit par une réduction de l'EMC d'un bois sujet à un stress compressif et le contraire pour un bois sujet à un stress de tension. Un effet davantage prononcé lorsque la contrainte est appliquée dans la direction des mouvements les plus importants dûs à l'humidité, c'est à dire la direction tangentielle (Skaar, 2012).

2 | Le bois et les variations d'humidité

2.1 Modes de transport hydrique (Merakeb, 2006)

Le transport hydrique ne concerne pas un mode de transport unique. Quatre principaux phénomènes influencent le transport d'eau dans le bois : le transport par capillarité, la diffusion par sorption, le transport de vapeur et le transport par convection.

Transport par capillarité

L'eau piégée dans les pores est évacuée sous l'effet de la température en suivant le gradient de pression capillaire. L'eau qui se trouve dans les gros capillaires s'évapore d'abord avant celle présente dans les plus petits. L'écoulement capillaire est régi par la loi de Darcy liant le flux liquide au gradient de pression par l'intermédiaire d'un coefficient appelé coefficient de perméabilité. La force motrice de cette migration est donc le gradient de pression capillaire qui est la différence des pressions qui règnent à l'interface entre la vapeur d'eau et l'eau libre dans un pore et qui est proportionnel à la température. Ce processus n'a lieu que si le taux d'humidité du bois est supérieur au PSF. Dans le domaine hygroscopique, le transfert par capillarité n'intervient pas car l'eau libre n'est plus présente dans ce domaine.

Diffusion par sorption

La diffusion est un processus de transport d'eau sous l'effet d'un gradient de teneur en eau : l'eau va des zones plus humides vers des zones plus sèches. C'est le mode de transfert de l'eau liée à travers les parois cellulaires. Ce mode de transfert ne peut pas exister si l'eau libre se trouve dans les cavités et lumen car, dans ce cas, les parois cellulaires se trouvent au dessus du point de saturation des fibres.

Transport de vapeur par diffusion

Le transport de la vapeur d'eau coexiste toujours avec le transfert d'eau capillaire et la diffusion de l'eau liée. La vapeur d'eau se déplace à travers les cavités cellulaires. C'est le gradient de concentration de la vapeur dans l'air qui est responsable du transport de cette vapeur d'eau.

Transport par convection : échange surfacique

Les échanges d'eau entre le milieu intérieur d'une structure et le milieu extérieur s'effectuent à travers une interface d'échange : c'est la convection hydrique. L'équilibre hygroscopique qui règne sur cette interface conditionne l'équilibre final dans le cœur des ouvrages en bois. Les flux hydriques qui traversent cette interface s'établissent de deux manières. Soit la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant se condense et les molécules d'eau s'accrochent aux sites de sorption en surface d'ouvrages. Soit l'eau liée à la surface des ouvrages s'évapore du bois ce qui fait augmenter l'humidité de l'air ambiant. Le flux se calcule via un coefficient qui établit une proportionnalité entre l'équilibre hygroscopique en surface et l'humidité relative de l'air ambiant. Il augmente si la différence entre l'équilibre hygroscopique en surface d'ouvrage et la teneur en eau d'équilibre hygroscopique avec l'humidité de l'air ambiant augmente (voir section 2.2).

$$J = S \cdot (W_{surf} - W_{eq}) \quad (2.1)$$

J est le flux hydrique, S est le coefficient de convection ou d'échange surfacique, w_{surf} est la teneur en eau qui règne en surface du bois et w_{eq} est la teneur en eau d'équilibre hygroscopique avec l'humidité relative de l'air ambiant (théorie de la couche limite schématisée à la figure 2.1).

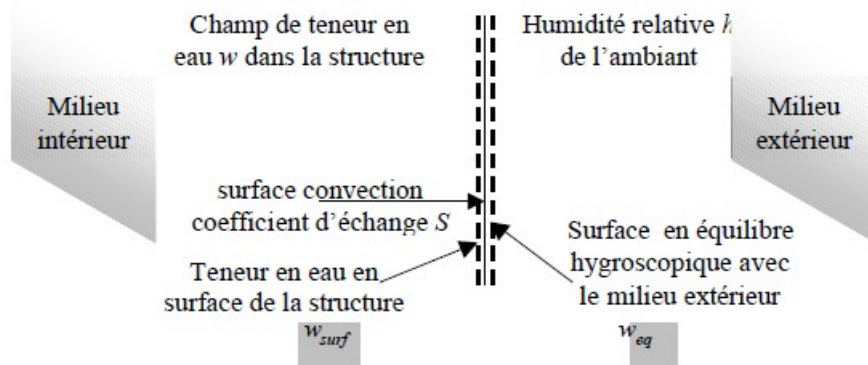


FIGURE 2.1 – Convection hydrique en surface d'une pièce de bois.

Ces mouvements hydriques, et plus particulièrement la diffusion, n'ont pas la même amplitude selon les différentes directions du bois (longitudinale, axiale, tangentielle). Sonderegger et al. (2011) nous renseignent sur les coefficients de diffusion et sur les facteurs de résistance selon les directions du bois. Les facteurs de résistance en direction longitudinale sont bien moins importants que dans les directions tangentielle et radiale. Le coefficient de diffusion est, à peu près, dix fois supérieur en direction longitudinale que dans les autres directions du bois. Un mouvement hydrique selon la direction des fibres est donc bien plus avantageux.

2.2 Les mouvements d'humidité dans le bois

Deux facteurs sont à considérer dans l'échange d'humidité entre l'atmosphère et le bois : le contenu en humidité du bois et le taux de variation d'humidité du bois. Le bois prend (ou perd) de l'eau (vapeur ou liquide) de l'atmosphère environnante en tendant vers un équilibre : l'EMC. Rappelons que l'EMC est fonction de plusieurs paramètres : l'humidité relative de l'air, la température, le type de bois et les antécédents immédiats du bois. Le taux de variation de l'humidité du bois ou, plus précisément, le rythme des échanges d'humidité entre le bois mis en œuvre à l'extérieur telle une construction en bois et l'atmosphère environnante est lié à certains de ces paramètres (humidité relative, température, type de bois), mais également à d'autres paramètres tels que la vitesse du vent et la présence d'un gradient de concentration d'humidité dans le bois (Droin-Josserand et al., 1988).

Les variations d'humidité dans le bois sont contrôlées par deux résistances : une résistance interne et une résistance externe. La résistance externe est rencontrée lors du transfert d'humidité de l'air vers le bois et est exprimée par un coefficient d'émission de surface qui est proportionnel à la différence entre deux valeurs de contenu en humidité à la surface du bois : un contenu en humidité du bois à l'équilibre avec l'air, et un contenu en humidité du bois au moment de l'expérimentation. Ce flux d'humidité à travers l'interface air-bois peut être défini par :

$$F = K(C_\infty - C_{t,0}) \quad (2.2)$$

où C_∞ et $C_{t,0}$ sont respectivement les valeurs de concentration (taux) d'humidité à l'équilibre [%], et au temps t [s] à la surface du bois et K le coefficient de transfert d'humidité.

La seconde résistance, la résistance interne, est rencontrée lors du transfert d'humidité à l'intérieur du bois. Ce phénomène de transfert résulte de la superposition de deux mouvements de diffusion : la diffusion de vapeur à travers les vides cellulaires et la diffusion de l'eau liée à travers les parois des cellules. Ce transfert d'humidité à l'intérieur du bois est gouverné par une diffusion momentanée que l'on peut exprimer dans une dimension par :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (2.3)$$

où C est la concentration (taux) local en humidité [%] à la position x [cm] et au temps t [s], et D la diffusivité [cm^2/s] (Droin-Josserand et al., 1988).

2.3 Variations temporelles de l'humidité du bois

À partir des principes mathématiques cités dans la section précédente, Droin-Josserand et al. (1988) ont réalisé un modèle mathématique capable de décrire la cinétique d'absorption et de désorption de la vapeur par différentes pièces de bois. Ce modèle leur permet également de suivre le processus d'absorption et de désorption lorsque l'humidité relative de l'air varie de façon continue à température constante. Leur modèle est tiré d'expériences qui ont été réalisées en considérant une diffusion transversale, i.e. une diffusion dans le plan transversal du bois, pour des cubes de bois d'aubier de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) de 2 cm par 2 cm et de 0,5 cm par 0,5 cm. Ces expériences sont menées dans une enceinte permettant de réguler l'humidité relative de l'atmosphère (gamme de R.H. entre 55 et 95%) à une température constante de 30 °C. Il faut préciser que la variation d'humidité relative est régulée linéairement avec le temps. Les résultats de ces expériences sont montrés à la figure 2.2.

Lors de variations d'humidité de ce type, il est évident que le taux d'humidité n'est pas uniforme dans l'épaisseur du bois. Les parties périphériques, plus exposées à l'air, ont une humidité variant plus vite et avec une plus grande amplitude.

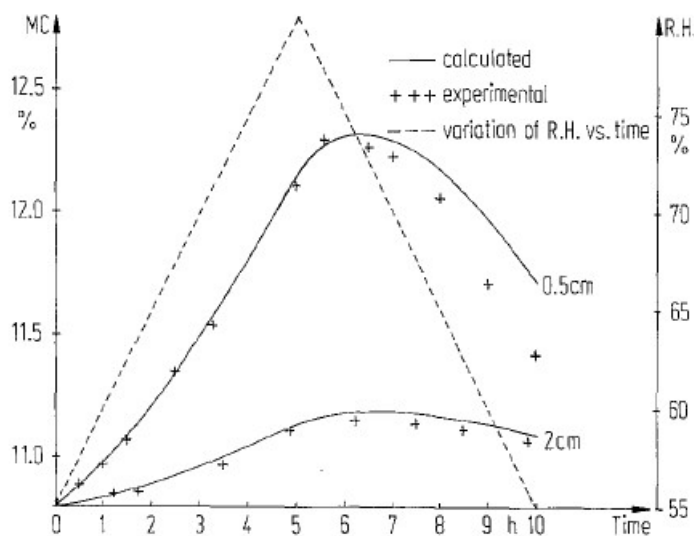


FIGURE 2.2 – Variation de l'humidité du bois (MC) avec le temps en réaction à des variations d'humidité relative pour des échantillons de bois d'épaisseurs de 0,5 et 2 cm, à 30 °C (Droin-Josserand et al., 1988).

Cependant, ces résultats ne permettent pas de répondre à la question initialement posée portant sur le séchage ou la reprise d'humidité des bois mis en œuvre dans des conditions réelles de chantier et exposés aux intempéries. Ils ne sont valables que dans les conditions susmentionnées de l'expérience, peu en rapport avec les conditions du terrain.

Tsoumis (1960) a travaillé sur les variations du taux d'humidité du bois selon les

saisons. Ses expériences se sont basées sur le monitoring d'échantillons de bois (pin, châtaignier, chêne, hêtre) exposés à l'atmosphère extérieure, sous un abri en Grèce. Les échantillons sont des planches de bois de 10 cm de largeur, de 1 à 5 cm d'épaisseur et de 25 cm de long. Il mesure l'humidité des échantillons par pesée, plusieurs fois par jour. Il ne s'intéresse qu'à l'effet de l'humidité relative de l'air et de la température sur l'humidité du bois et l'humidité d'équilibre calculée à partir du diagramme de Loughborough-Keylwerth (Kollmann, 1951).

Les variations d'humidité du bois ont été suivies durant plusieurs mois. Les résultats sont présentés selon plusieurs échelles temporelles : mois, semaines, jours, heures. Il est intéressant ici de regarder les relations entre les variations de l'humidité d'équilibre du bois calculées (EMC) et de l'humidité relative de l'air, et les fluctuations du taux d'humidité du bois observées (TH). Dans un premier temps, aux niveaux mensuel et hebdomadaire, les variations d'EMC et d'humidité relative ont un lien dynamique marqué avec les variations du TH (figures 2.3 et 2.4). On observe, à l'échelle journalière (figure 2.5), une fluctuation du TH montrant également une correspondance avec les variations d'humidité relative bien que ce lien soit moins marqué. Cependant, à l'échelle horaire (figure 2.6), les valeurs observées du TH ne montrent qu'une très faible réaction aux fluctuations parfois importantes de l'humidité relative.

De manière globale, à l'échelle mensuelle, nous voyons sur la figure 2.3 une hausse du contenu en humidité du bois et de l'EMC en hiver, correspondant à une hausse de l'humidité relative de l'air. Il faut également noter une variation de l'humidité du bois de plus faible amplitude que celle de l'EMC. Cela s'explique par le fait que même à l'échelle mensuelle, le bois n'a que rarement le temps de parvenir à l'EMC, ce qui fait de l'EMC un concept relativement théorique.

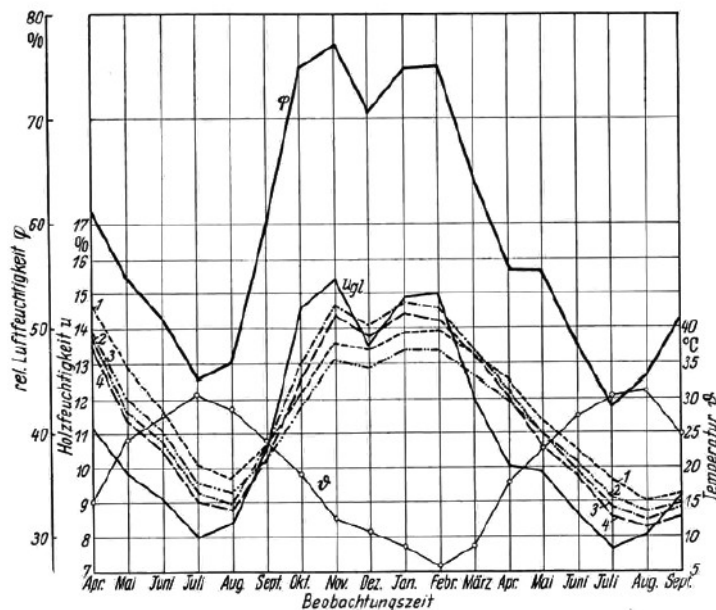


FIGURE 2.3 – Variations mensuelles de l'humidité relative(φ), de l'humidité du bois de 4 espèces différentes (1 à 4), de l'EMC calculé (u_{gl}) et de la température (ϑ) (Tsoumis, 1960).

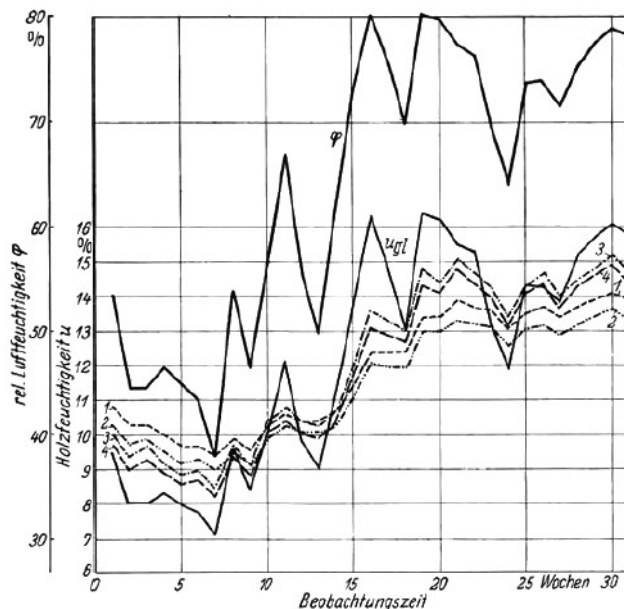


FIGURE 2.4 – Variations hebdomadaires de l'humidité relative (φ), de l'humidité du bois de 4 espèces différentes (1 à 4), et de l'EMC calculé (u_{gl}) (Tsoumis, 1960).

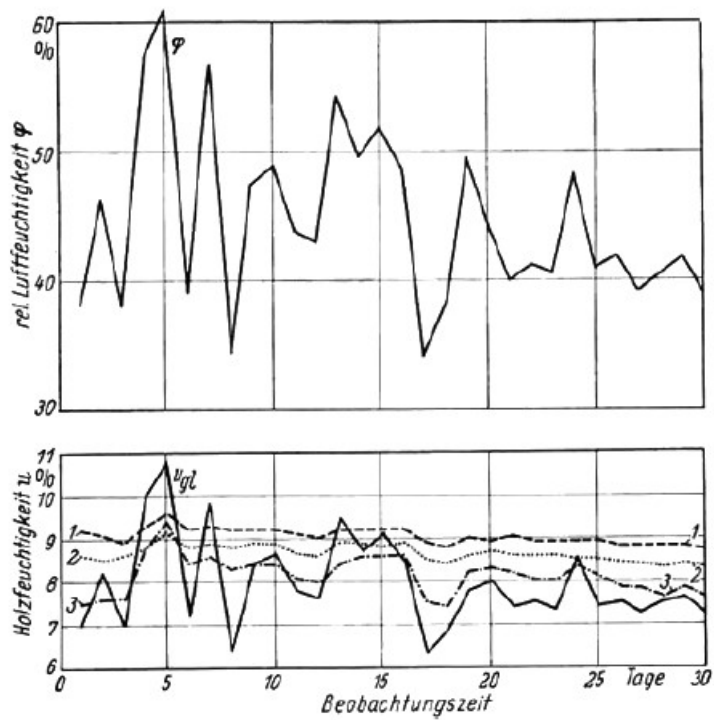


FIGURE 2.5 – Variations journalières de l'humidité relative (φ), de l'humidité du bois de 4 espèces différentes (1 à 4), et de l'EMC calculé (u_{gl}) (Tsoumis, 1960).

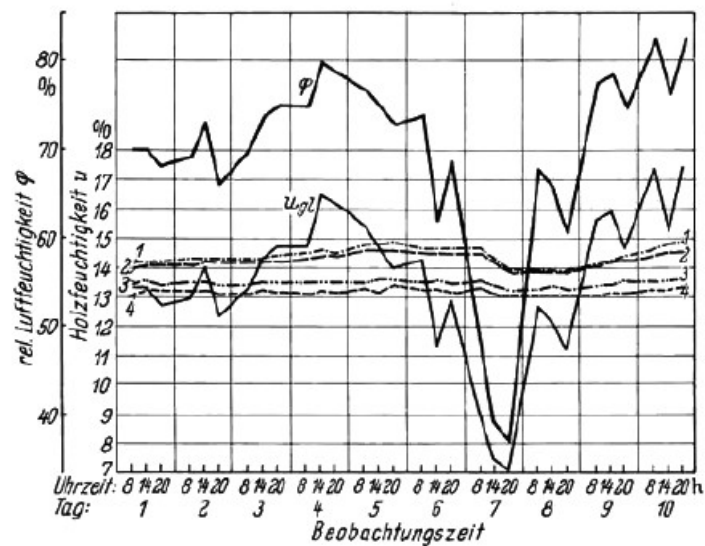


FIGURE 2.6 – Variations horaires de l'humidité relative (φ), de l'humidité du bois de 4 espèces différentes (1 à 4), de l'EMC calculé (u_{gl}) (Tsoumis, 1960).

3 | Les dangers d'une reprise d'humidité dans la construction bois

La littérature présente systématiquement un excès d'humidité comme la cause principale des problèmes que peut entraîner l'usage du bois, en particulier dans la construction.

La division « Avis techniques » du CSTC a établi une typologie des pathologies qu'elle avait rencontrées dans les menuiseries intérieure et extérieure et les ossatures en bois. Les proportions des différents types de pathologies identifiés apparaissent dans le graphique ci-après (Michaux & Charron, 2018).

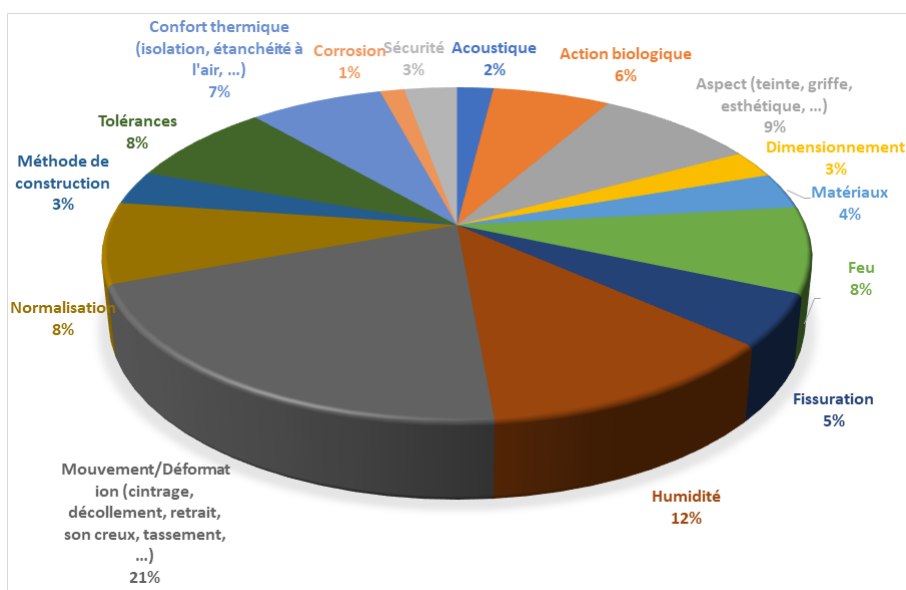


FIGURE 3.1 – Pathologies des menuiseries intérieure et extérieure et des ossatures bois. Division "Avis techniques" du CSTC.

Ce graphique mérite un commentaire. L'humidité, en tant que telle, y apparaît responsable de 12 % des cas de pathologie. Mais d'autres types de pathologies ne sont en réalité que des conséquences d'échanges mal contrôlés d'eau entre le bois et son environnement. C'est le cas des catégories "Mouvement/déformation" (21 %), "Fissuration"

(5%) et "Action biologique" (6 %). L'humidité d'une façon générale est ainsi responsable de $12 + 21 + 5 + 6 = 44$ % des pathologies rencontrées.

De surcroît, ce graphique rend compte de l'ensemble des pathologies qu'a dû traiter la division "Avis techniques" du CSTC dans les menuiseries intérieure et extérieure et les ossatures en bois. Mais les pathologies de la construction bois concernent bien souvent des domaines entièrement étrangers au matériau bois lui-même : la corrosion, les tolérances, la sécurité, l'acoustique... Une observation attentive du graphique montre que parmi les rubriques mentionnées, outre celles liées à l'eau dans le bois et citées ci-avant (humidité, mouvement, fissuration, action biologique), aucune autre n'a de lien direct avec le bois, hormis peut-être la rubrique "Matériaux" dont il est difficile de savoir ce qu'elle désigne précisément. Cela signifie qu'en termes non pas de pathologies de la construction bois mais bien de pathologies du bois dans la construction, l'énorme majorité, sinon la totalité des cas ont pour origine l'humidité, bien que le bois soit susceptible de poser des problèmes sans rapport avec l'eau (tassements, ruptures, insectes xylophages...).

Si les problèmes d'humidité du bois dans la construction proviennent généralement d'une humidification accidentelle après la mise en œuvre du bois et la mise hors d'eau du bâtiment, il reste qu'un taux d'humidité du bois trop élevé lors de la pose peut être source d'importantes difficultés. De nombreuses observations ont montré qu'il était dangereux d'enfermer dans un complexe paroi ou un complexe toiture un bois de structure insuffisamment sec.

En ce qui concerne les bois de structure, la notion d'excès d'humidité peut être considérée comme définie dans la STS 31 Charpenterie (SPF Économie, 2008), qui indique que, sauf spécification particulière dans le cahier spécial des charges, lorsque des bois ont un rôle structurel, leur taux d'humidité à la pose ne doit pas excéder 20 %¹.

En France, Sycodés (SYstème de Collecte des DÉSordres), dispositif d'observation de l'AQC (Agence Qualité Construction), constitue une base de données unique, qui fait désormais référence même en Europe en matière de dommages dans la construction. L'édition 2016 souligne, en page 117, à propos des risques de pourrissement des éléments d'un bâtiment en structure bois, les dangers d'un emprisonnement de l'humidité qu'entraîne l'imperméabilisation des enveloppes : "*Vouloir rendre un ouvrage totalement étanche en occultant les nécessaires transferts d'humidité en son sein, c'est courir à la catastrophe.*"

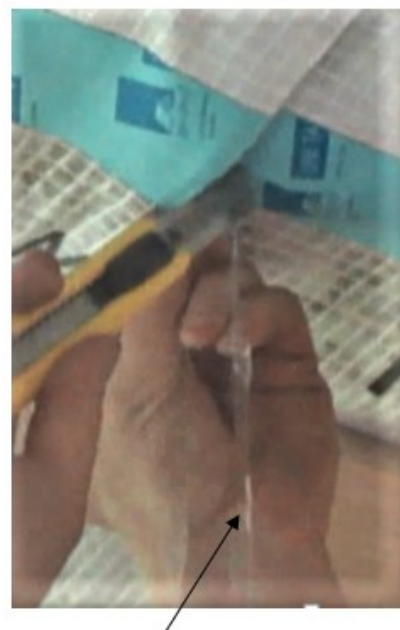
1. Pour les résineux d'une section supérieurs à $+/- 6 \times 15$ cm, il est recommandé d'abaisser le taux d'humidité à 16% pour la mise en œuvre.

Lors d'une journée d'étude consacrée à la conception hygrothermique des parois des bâtiments, le CSTC (Mahieu, 2017) a montré dans une brève vidéo très spectaculaire l'importance du danger. Une incision pratiquée dans le pare-vapeur d'une toiture compacte libère une importante quantité d'eau (cf. photo ci-contre). Cette toiture compacte ne souffrait pourtant d'aucun défaut d'étanchéité. La totalité de l'eau qui s'est écoulée provenait des pièces de bois de la structure dont le taux d'humidité était trop élevé lorsque le complexe a été rendu étanche. Il est aisé d'imaginer les dommages que sont susceptibles de provoquer de telles quantités d'eau sur le bois, voire sur une isolation à base de cellulose.

Les performances des bâtiments désormais requises en matière d'étanchéité à l'air et à la vapeur ont considérablement accru les dangers liés à l'enfermement de bois trop humides lors de la mise en œuvre. L'Agence Qualité Construction a créé le dispositif "REX Bâtiments performants" pour collecter les retours d'expériences et identifier les risques émergents dans les bâtiments performants énergétiquement et/ou à haute qualité environnementale. Ainsi, dans son chapitre "Zoom REX Bâtiments performants", le rapport 2018 de l'Observatoire de la Qualité de la Construction (Agence Qualité Construction, 2018) consacre une page entière (page 36) à la nécessité d' "*éviter absolument la reprise d'humidité dans le bois en phase chantier*" en soulignant les risques de variations dimensionnelles du bois, d'attaques de champignons et de détérioration de la qualité de l'air intérieur par une prolifération de micro-organismes. Malgré les risques liés au taux d'humidité élevé des bois, les constructeurs n'ont pas l'air de s'inquiéter du fait que les bois mis en œuvre ne sont pas protégés. Lorsque que la problématique est évoquée, ils répondent que les bois ne sont pas exposés longtemps, sans préciser ce que signifie longtemps.

Enfin, il ne faut pas négliger le fait que l'accroissement du taux d'humidité du bois provoqué par l'exposition aux intempéries est aggravé par le risque de lessivage du produit de préservation dont le bois doit en principe être couvert ou imprégné.

La STS 04.3 Traitements du bois (SPF Économie, 2008) indique les traitements à appliquer à un bois pour lui conférer un complément de durabilité s'il n'est pas suffisamment durable naturellement dans la situation où il est mis en œuvre. Selon la NBN EN 335 (Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois), la charpenterie appartient à la classe d'emploi 2, qui regroupe les bois secs dont le taux d'humidité en service peut



Eau de condensation

FIGURE 3.2 – Humidité emprisonnée dans une toiture compacte.

occasionnellement dépasser 20%. Pour protéger ces bois contre les attaques d'insectes et, en cas d'humidification accidentelle, de champignons, la STS 04.3 recommande un procédé de type A2.1 selon les codes d'homologation de l'ABPB (Association Belge pour la Protection du Bois). Cependant, dès lors qu'il est exposé aux intempéries sur chantier avant la mise hors d'eau, le bois de charpenterie ne se situe plus en classe d'emplois 2 mais bien en classe d'emplois 3-2, dans laquelle l'humidité en service peut fréquemment excéder 20 %. Un procédé A2.1 ne convient pas pour ce type d'emplois. La STS 04.3 distingue un procédé A2.1 des procédés conçus pour les classes d'emploi supérieures, exposant à un risque biologique plus important, en indiquant que ces procédés mettent en œuvre "*un produit présentant un bon pouvoir pénétrant et une bonne résistance au délavage*". Autrement dit, les produits utilisés dans un procédé A2.1 ne doivent pas satisfaire à cette exigence et donc sont susceptibles d'être lessivés. En conséquence, s'il a été exposé aux intempéries, un bois de structure traité selon un procédé A2.1 pourra se comporter comme un bois non traité. Aux risques évoqués précédemment s'ajoutera donc celui d'une attaque d'insectes.

4 | Synthèse

Que dit la littérature à propos de la cinétique de reprise d'humidité du bois de construction dans des conditions extérieures réelles ? À vrai dire, elle n'est pas très riche à ce sujet.

Il restait néanmoins intéressant de rappeler les notions de base relatives aux échanges eau-bois ainsi que de mentionner les rares travaux concernant la cinétique d'absorption et de désorption et la variation d'humidité du bois saisonnale, bien que les conditions de ces recherches ne nous permettent pas d'utiliser les résultats.

Nous avons maintenant le bagage nécessaire pour comprendre les échanges d'eau dans le bois et pour réfléchir à la problématique posée initialement.

Deuxième partie

Taux d'humidité des bois sur chantier

5 | Matériel & Méthodes

Afin de connaître le taux d'humidité des bois lors de leur mise en œuvre. Des mesures d'humidité sur différents sites de construction ont été réalisées. Dans ce chapitre seront successivement abordés le choix des chantiers, le choix des pièces de bois sur lesquelles seront prises les mesures, et la méthode de mesure utilisée.

5.1 Choix des chantiers

Plusieurs critères ont été pris en considération pour fixer le choix des chantiers à visiter. Ils visaient à l'obtention de mesures représentatives, pertinentes et fiables. Certains critères étant limitants, un important travail de prospection de chantiers a dû être réalisé.

L'objectif étant de connaître le taux d'humidité du bois lors de la pose des éléments d'ossature, l'exigence principale était de pouvoir visiter un chantier récent. Il était demandé aux entreprises un rendez-vous pour la prise de mesures maximum une à deux semaines après la pose, de façon à ce que les éléments de parois soient encore exposés à l'environnement extérieur.

Deux types de fabrication sont rencontrés dans la construction bois : la pré-fabrication et la fabrication sur site. Lors de la pré-fabrication, les bois utilisés sont des bois stockés (sous abri) et les parois sont fabriquées en atelier, ce qui réduit considérablement le temps de pose sur chantier et permet une mise hors d'eau dans des délais plus courts. Pour une fabrication sur site, les bois sont livrés et assemblés sur le chantier de construction. Il n'y a pas de stockage des bois permettant un séchage éventuel. De surcroît, la fabrication sur site induit une plus longue exposition à l'environnement extérieur avant une mise hors d'eau, et donc un risque de reprise d'humidité accru.

Une première dizaine d'entreprises ont été contactées. Sur ces dix entreprises, quatre ont répondu favorablement. Lors de la prise de contact, il était important de bien exposer les conditions dans lesquelles ce travail est réalisé et de faire comprendre à l'entrepreneur l'intérêt de participer à cette étude. Il est apparu difficile de fixer des rendez-vous qui satisfaisaient aux exigences fixées tout en restant compatibles avec les disponibilités des entreprises contactées. L'ensemble des contraintes inhérentes au projet de prise de

mesures sur chantier a donc engendré une multiplication des démarches d'organisation de rendez-vous, relativement chronophage. En ce qui concerne la fabrication sur site, la planification des rendez vous est très difficile en raison d'une quantité de construction limitée. Nous avons donc fait le choix de ne pas prendre en considération ce type de fabrication.

Après quatre chantiers visités, les résultats des mesures se sont avérés convergents et le gain marginal en information n'était plus en rapport avec le temps et l'énergie qu'il exigeait. Nous avons donc décidé de mettre fin à la prise de mesures sur site.

5.1.1 Chantiers visités

Entreprise Chimsco

La visite d'un chantier de l'entreprise Chimsco s'est déroulée le samedi 13 octobre 2018. L'ossature était en bois d'épicéa traité. La maison était couverte (toit posé et parois extérieures fermées) mais toutes les baies étant restées ouvertes, certains éléments d'ossature étaient toujours exposés aux intempéries. Le chantier était assez récent pour satisfaire aux exigences fixées.

Entreprise Synergie Bois

La visite de ce chantier a été effectuée le 13 octobre 2018. L'ossature était en bois d'épicéa traité. La construction datait de moins de 3 semaines et était déjà couverte.

Entreprise Paquet

Ce chantier a été visité le 26 octobre 2018. L'ossature était en bois d'épicéa traité et a été posée sur une dalle humide quatre jours avant la prise de mesure. Lors de la visite, la maison était déjà couverte.

Entreprise Batisomme

Un chantier de l'entreprise Batisomme a été visité le 26 octobre 2018. Seule l'ossature des murs extérieurs et des parois intérieures était posée. Le chantier avait débuté depuis trois jours. Le jour de la visite, la dalle sur laquelle était posée l'ossature était mouillée. Les murs extérieurs étaient en épicéa, et les parois intérieures en douglas.

5.2 Choix des pièces

Dans une ossature, la disposition et l'exposition des pièces de bois diffèrent. Nos mesures se concentrent sur les pièces de bois portantes, en l'occurrence : la lisse haute, la

lisse basse et les montants verticaux. La lisse basse est la pièce de la paroi en contact avec le sol ; selon les codes de bonnes pratiques, elle est protégée des remontées d'eau par une membrane. Malgré la protection, sa proximité avec le sol en fait une pièce intéressante à étudier. La lisse haute et les montants verticaux ont également une exposition et une orientation justifiant la prise de mesures. Les montants verticaux pourraient présenter un mouvement d'eau plus important dans le sens axial, et la lisse haute est la pièce la plus exposée aux intempéries. Ces éléments de parois sont indiqués sur la figure 5.1.

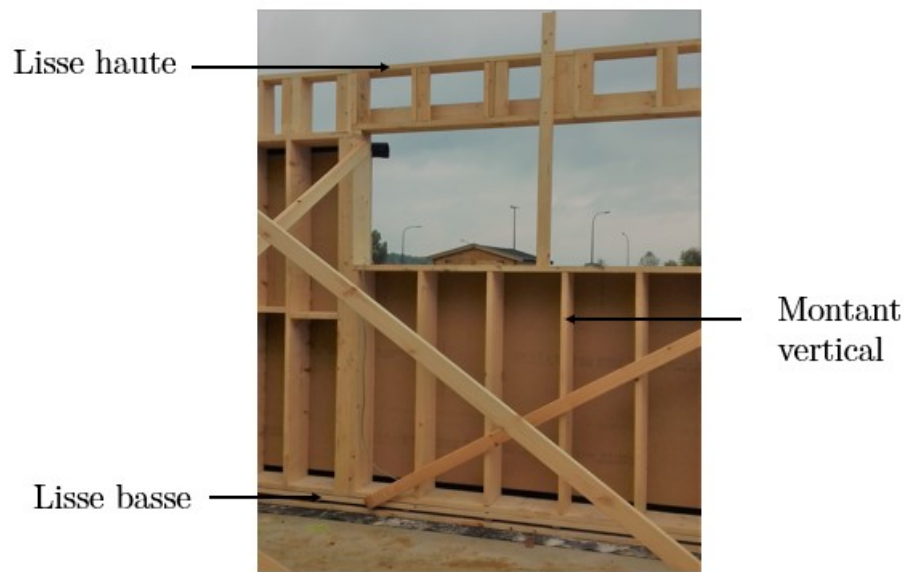


FIGURE 5.1 – Paroi d'ossature bois, avec sa lisse haute, sa lisse basse et ses montants verticaux.

5.3 Méthodes de mesure

La méthode de mesure de référence pour le taux d'humidité du bois est la méthode par pesée. Un échantillon de bois est pesé humide. Il est ensuite séché pour déterminer son poids sec et en déduire le taux d'humidité, comme expliqué à la section 1.1. Cette mesure est, par définition, destructive. Elle ne convient donc pas aux mesures sur chantier. Il existe cependant d'autres systèmes de mesure non destructifs et transportables, donc plus appropriés. La méthode utilisée ici est basée sur la résistivité du bois qui diminue très fortement quand son humidité augmente. La résistivité du bois définit sa capacité à conduire le courant et est exprimée en Ωm .

5.3.1 Appareillage

Les mesures du taux d'humidité des pièces de bois ont été réalisées au moyen d'un humidimètre, ou hygromètre, électrique à résistance, équipé d'électrodes isolées (électrodes qui n'établissent le contact qu'à leur extrémité). Il est essentiel d'utiliser des électrodes isolées pour s'affranchir des risques d'erreurs liés notamment à une humidification superficielle des éléments. Ce type d'hygromètre est composé d'un boîtier de mesure et d'une électrode. Le boîtier de mesure est un boîtier HYDROMETTE M 4050 de la marque GANN. Il est muni de sélecteurs permettant de sélectionner la température et le type d'essence de bois à mesurer. L'électrode utilisée est de type "électrode à marteau" avec poignée coulissante permettant d'enfoncer l'électrode dans l'épaisseur du bois et d'y mesurer le taux d'humidité. Le boîtier et l'électrode à marteau sont liés par un câble de connexion. L'hygromètre utilisé possède une gamme de mesure d'humidité du bois de 4 à 100%.



FIGURE 5.2 – Boîtier Gann HYDROMETTE M 4050 (à gauche) et électrode à marteau M 18 (à droite). (GANN, 2005)

5.3.2 Mode opératoire

Le mode opératoire est conforme aux indications de la norme belge NBN EN 13183-2 (2002), "Teneur en humidité d'une pièce de bois scié - Partie 2 : Estimation par méthode électrique par résistance". Il est constitué des étapes suivantes :

1. Brancher l'électrode au boîtier de mesure et régler les sélecteurs de température et d'essence du bois. La température choisie est la température ambiante. Ces dispositifs permettent de faire des mesures précises sans avoir ultérieurement besoin de tables de correction de température et d'essences.
2. Enfoncer les pointes isolées de l'électrode à marteau dans une face de la pièce de bois, en un point distant d'au moins 300 mm des extrémités de la pièce (ou situé

à mi-longueur des pièces de longueur inférieure à 600 mm), et à une distance de l'une des rives au moins égale à 0,3 fois la largeur de la pièce, et faire en sorte que les pointes de l'électrode pénètrent à une profondeur au moins égale à 0,3 fois l'épaisseur de la pièce. L'emplacement de la mesure doit être exempt de bois résiné et de singularités telles que de l'écorce, des nœuds et des poches de résine. Les pointes de l'électrode ne doivent pas être enfoncées parallèlement au sens du fil du bois, la résistance électrique étant bien moins élevée que transversalement au sens du fil. Nous avons donc veillé à conserver un angle par rapport au sens du fil du bois. Un exemple d'électrode à marteau est montré à la figure 5.3.

3. Prendre la mesure et attendre quelques secondes avant l'affichage du résultat.



FIGURE 5.3 – Électrode à marteau lors de la prise de mesure d'humidité d'un montant vertical d'un mur extérieur.

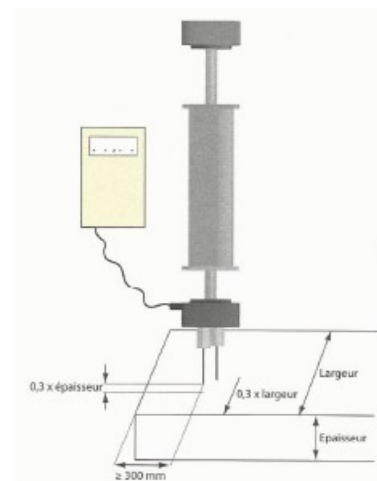


FIGURE 5.4 – Schéma de mesure de la résistance électrique. (Vinckbooms, 2018)

Pour garantir la validité et la représentativité des mesures, nous avons mesuré, autant que possible, pour chaque élément d'ossature (lisse haute, lisse basse, et montant vertical), 5 pièces de bois différentes sur le chantier. Un tableau récapitulatif du nombre de mesures prises sur chantier est présenté ci-dessous.

TABLE 5.1 – Nombre de mesures prises sur chantier par entreprise et par pièce de bois.

| Entreprises | Pièces de bois musrées | | |
|---------------|------------------------|---------------|--------------------|
| | Lisses basses | Lisses hautes | Montants verticaux |
| Chimsco | 3 | 5 | 5 |
| Synergie Bois | 3 | 5 | 5 |
| Paquet | 5 | 5 | 5 |
| Batisomme | 5 | 5 | 5 |

6 | Présentation des résultats

Ce chapitre se limite à une présentation des résultats, sans discussion à proprement parler. Il se termine par une conclusion qui répond à la question que posait initialement cette partie.

6.1 Résultats

6.1.1 Taux d'humidité par type de pièces

Les résultats présentés dans cette section constituent la moyenne arithmétique des mesures réalisées sur chantier, par type de pièces de bois, et par entreprise. L'ensemble des résultats est repris en annexes (voir A.1).

Comme précisé dans le mode opératoire, il était convenu de réaliser, dans la mesure du possible, 5 mesures par type de pièces (1 mesure dans 5 pièces de bois différentes). En ce qui concerne l'entreprise Chimsco et l'entreprise Synergie Bois, 3 mesures d'humidité de lisses basses seulement ont été prises en raison de la difficulté d'accès à ces pièces sur ces chantiers. Dans les deux cas, les résultats obtenus étaient suffisamment convergents pour ne pas exiger de mesures complémentaires. Les moyennes des mesures par chantier et par type de pièces de bois sont présentées dans le tableau 6.1.

Signalons en outre que d'un chantier à l'autre, les essences utilisées pouvaient être différentes, mais que l'hygromètre était paramétré pour intégrer ces différences et fournir ainsi des résultats immédiatement exploitables.

L'objectif de ces mesures est de déterminer si le taux d'humidité des pièces de bois lorsqu'elles sont mises en œuvre est supérieur ou inférieur au taux d'humidité recommandé¹. Savoir si le taux d'humidité varie en fonction du type de pièces de bois n'est pas l'objectif recherché à cette étape du travail.

Toutes entreprises et toutes pièces confondues, le tableau 6.1 montre une humidité minimale de 11,38% et maximale de 15,16%.

1. Le taux d'humidité recommandé selon la STS 31 est de maximum 20%.

TABLE 6.1 – Moyennes des mesures d’humidité du bois par type de pièces prises et par chantier.

| Entreprises | Pièces de bois musrées | | |
|---------------|------------------------|---------------|--------------------|
| | Lisses basses | Lisses hautes | Montants verticaux |
| Chimsco | 14,46 % | 13,96 % | 11,38 % |
| Synergie Bois | 12,76 % | 13,46 % | 13,04 % |
| Paquet | 14,5 % | 12,82 % | 12,12 % |
| Batisomme | 14,18 % | 14,66 % | 15,16 % |

L’entreprise Batisomme affiche des taux légèrement supérieurs aux autres entreprises. Rappelons que ce chantier était constitué du cadre de l’ossature sans protection, placé sur une dalle mouillée. Le chantier venait de subir quelques jours pluvieux.

6.1.2 Autres taux d’humidité

Notre attention était focalisée sur la mesure d’humidité des lisses hautes, lisses basses et montant verticaux déjà mis en œuvre en ossature. Cependant, lors de nos visites en entreprise, l’occasion s’est présentée de mesurer l’humidité de bois de charpente ou fermettes, ou de bois en attente d’utilisation, stockés dans des conditions diverses et sur des périodes variables. Ces mesures détaillées sont reprises en annexes (voir A.2). Elles viennent en support des premières mesures et permettent de compléter l’information.

Dans l’entreprise Batisomme étaient entreposés dans un hangar un lot de bois fraîchement livré (2 jours) et des bois destinés à la construction de charpente en attente depuis deux semaines. Sur le chantier de cette entreprise, des bois destinés à l’achèvement de la construction étaient entreposés sans protection. Le tableau 6.2 montre que les bois entreposés sans protection à l’extérieur sur le chantier ont un taux d’humidité supérieur au bois fraîchement livrés et aux bois entreposés depuis 2 semaines. Bien que l’humidité initiale des bois entreposés sans protection sur chantier ne soit pas connue, cette différence d’humidité, aussi faible soit elle, justifie une réflexion sur les variations d’humidité du bois exposé aux intempéries.

TABLE 6.2 – Moyennes des autres mesures d’humidité du bois de l’entreprise Batisomme

| Entreprise Batisomme | | |
|--|----------------------------------|--|
| Bois non mis en œuvre entreposé sur chantier | Bois fraîchement livré (2 jours) | Bois entreposé depuis 2 semaines à l’intérieur |
| 15.62 % | 13.35 % | 12 % |

Les visites en entreprises ont révélé que les entrepreneurs ne connaissent pas les taux d'humidité du bois lorsqu'ils leur sont livrés. Si dans le cas de l'entreprise Batisomme, ces bois sont sec (13.35 %), il en va autrement pour l'entreprise Paquet. En effet, des bois livrés un jour avant la prise de mesure montraient un taux d'humidité moyen de 20,96 % (tableau 6.3). Cependant, des mesures prises dans des bois entreposés à l'intérieur depuis plus d'un mois, prêts à être utilisés, faisaient apparaître alors un taux moyen de 12,76 %, bien plus acceptable pour une mise en œuvre.

TABLE 6.3 – Moyennes des autres mesures d'humidité du bois de l'entreprise Paquet

| Entreprise Paquet | |
|--------------------------|------------------------|
| Bois fraîchement arrivés | Bois entreposés 1 mois |
| 20,96 % | 12,76 % |

6.2 Conclusion

Le bois est-il sec ou humide lorsqu'il est mis en œuvre sur les chantier de construction ? La réponse à cette question devrait orienter la poursuite des recherches sur l'une ou l'autre des deux questions initialement posées :

1. Après combien de temps faut-il abriter une structure dont le bois a été posé sec, sec signifiant ici en dessous de l'humidité recommandée ?
2. Combien de temps faut-il laisser exposée une structure dont le bois a été posé humide, humide signifiant ici au-dessus de l'humidité recommandée ?

Le taux d'humidité recommandé par la STS 31 charpenterie (2008b) pour le bois de structure lors de la mise en œuvre est de 20 % maximum. Force est de constater que le taux d'humidité réel est bien en deçà de celui recommandé. Le bois est donc généralement sec lorsqu'il est mis en œuvre. La suite des recherches se focalise dès lors sur la reprise de l'humidité et sur le temps maximal conseillé avant une mise hors d'eau de l'ossature bois.

Troisième partie

Suivi temporel du taux d'humidité de
pièces de bois d'ossature exposées aux
intempéries

7 | Matériel & Méthodes

La deuxième partie de la recherche est la partie expérimentale destinée à obtenir un suivi temporel du taux d'humidité de pièces de bois d'ossature exposées aux intempéries et aux conditions extérieures. Ces expérimentations ont été réalisées au sein du complexe du Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) de Limelette.

Nous avons réalisé personnellement l'ensemble des opérations décrites ci-dessous, à l'exception des branchements au système d'acquisition, étape délicate qui réclamait la compétence spécifique d'un technicien.

Dès septembre 2018, des réunions ont été organisées avec M. *B. Michaux* et M. *S. Charon*, respectivement chef de la division "Enveloppe du bâtiment et menuiserie" et responsable du laboratoire "Bois" du CSTC, ainsi que M. *H. Frère*, directeur de Hout Info Bois, afin d'établir le protocole expérimental le plus approprié.

7.1 Confection des caissons expérimentaux

7.1.1 Ossature bois

Tout d'abord, les bases de l'expérimentation ont été établies. L'objectif de nos recherches étant ciblé sur l'ossature bois et l'étude de sa reprise d'humidité, il fallait recréer des parties d'ossature sur lesquelles porteraient nos analyses. Ces parties d'ossature sont ici appelées "caissons" et sont assimilables à des éléments de parois. La volonté est de représenter de la manière la plus fidèle des éléments de parois extérieures non protégés contre les intempéries. Deux types de caissons ont alors été réalisés. Le premier type, appelé caisson "vide" ou "ouvert", est un simple cadre sans isolant ni diaphragme (panneau de contreventement). Ce type de caisson représente un chantier pour lequel la structure est montée in situ. Un deuxième type, appelé caisson "plein" ou "fermé", de même structure que le caissons vide, est cette fois rempli de fibre de verre et couvert par des panneaux TMCelit 4D d'un côté et OSB de l'autre. Ce deuxième type de caissons représente, quant à lui, un chantier réalisé à l'aide d'éléments de parois préfabriqués en atelier. Dans ce type de caissons, afin d'éviter les effets de bords (absents dans le cas des parois préfabriquées car les cadres y sont attenants), une membrane étanche (ca-

outchouc) a été placée sur les faces externes de la lisse basse et des montants verticaux externes (voir figure 7.1).



FIGURE 7.1 – Exemple de paroi pleine avec sa membrane en caoutchouc.



FIGURE 7.2 – Caisson "vide" (à gauche) et caisson "plein" (à droite).

Un exemple de ces deux type de caissons expérimentaux est montré à la figure 7.2.

Chaque mois, à partir de décembre 2018 jusqu'en avril 2019, un caisson de chaque type sera construit et installé pour l'expérimentation. Ce seront ainsi, au total, 10 caissons qui seront fabriqués, installés et placés sous monitoring. L'objectif est de voir l'effet de climats différents lors de la pose sur les fluctuations d'humidité du bois et de pouvoir isoler l'influence d'un facteur qui pourrait être exceptionnel et qui pourrait influencer le comportement du bois.

Les dimensions des caissons ont fait l'objet de débats. Deux types de dimensions ont été initialement retenus. D'abord, des caissons de dimensions extérieures de $1,20 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$ (petits caissons). Ces valeurs ont été choisie pour avoir (Iweins d'Eeckhoutte, 2018) :

- une taille suffisante pour limiter les effets de bords ;
- un montant central pour la prise de mesures, les montants extérieurs ne répondant pas aux exigences expérimentales dans les caissons pleins.
- un entre-axe entre les montants de 60 cm, entre-axe couramment rencontré dans la construction bois.

Ces dimensions permettent une manutention aisée, mais un caisson d'une hauteur de 1,20 m n'est pas représentatif de la réalité. Ces proportions peu réalistes ont conduit à une autre manière de procéder : faire correspondre les dimensions des caissons expérimentaux aux dimensions couramment rencontrées dans les ossatures en bois. La largeur de 1,20 m est conservée, mais la hauteur devient 2,40 m (grands caissons). Ce sont des caissons plus difficiles à manutentionner, mais dans le souci de correspondre étroitement à la réalité, les grandes dimensions ont été choisies pour la réalisation des caissons.

7.1.2 Matériaux utilisés

Tous les matériaux utilisés sont des matériaux couramment employés dans la construction bois.

Les pièces de bois utilisées sont de type SLS (*Scandinavian Lumber Standard*) en épicéa (*Picea abies*). La section de ces pièces est de 36×170 mm et leur longueur de 4,8 m. Ces pièces ont ensuite été découpées aux dimensions requises pour la construction des caissons.

En ce qui concerne les isolants et les panneaux, ils ont été fournis par le CSTC. L'isolation est constituée de laine de verre. Les panneaux utilisés sont de deux types : OSB et Celit. L'OSB (Oriented Strand Board) est un OSB 3, *i.e.* panneau travaillant utilisé en milieu humide. Le Celit est un panneau de fibres de bois utilisé en sous-toiture et également pour la protection des isolants de murs.

7.2 Appareillage

Afin de permettre le suivi temporel des fluctuations d'humidité du bois, 5 capteurs ont été installés dans chacune des 10 parois étudiées. Ces capteurs, liés à un système d'acquisition, permettent de mesurer et d'enregistrer les taux d'humidité du bois tout au long de l'expérimentation. Ces données pourront être comparées aux données météorologiques, relevées par la station météo du CSTC.

7.2.1 Capteurs

Positions des capteurs

Pour des raisons similaires à celles qui ont guidé le choix des pièces lors des mesures sur sites (cf. section 5.2), les capteurs hygrométriques ont été placés sur les constituants élémentaires de la structures des caissons, à savoir la lisse haute, la lisse basse et les montants verticaux. Concernant les montants verticaux, seul le montant central a été mesuré afin d'éviter toutes perturbations par des effets de bords, en particulier en ce qui

concerne les caissons pleins (cf. supra). Les capteurs sont placés sur une face de la pièce de bois. La lisse basse et le montant vertical central sont munis de deux capteurs :

1. Le premier est disposé à une distance de 0,3 fois la largeur de la pièce à partir de l'une des rives.
2. Le second est placé à une distance de 0,5 fois la largeur de la pièce à partir de l'une des rives.

La lisse haute, quant à elle, n'est munie que d'un seul capteur placé à une distance de 0,5 fois la largeur de la pièce à partir de l'une des rives.

Le placements des capteurs doit satisfaire aux mêmes contraintes que celles qui régissent le placements des électrodes de l'hygromètre (cf. section 5.3).

Ancrage

Les capteurs sont constitués de deux électrodes enfoncées dans le bois et liées à un câble électrique assurant la connexion à un système d'acquisition. Pour ce genre de mesures, les pointes doivent être isolées. Dans la méthode classique de prise de mesure automatique des taux d'humidité dans le bois, les systèmes de branchement et de connexion sont conçus pour de petites pointes non isolées. Ces pointes n'étant pas adaptées au système de mesures requis pour les caissons, il a fallu concevoir un nouveau mode d'ancrage des capteurs.

Trois éléments sont nécessaires pour le fonctionnement des capteurs dans le cadre de cette expérience :

1. des pointes isolées suffisamment grandes pour pénétrer assez profondément dans la pièce de bois ;
2. un système permettant de relier les pointes à un câble de connexion ;
3. une parfaite étanchéité du système mis en place.

Les pointes finalement utilisées sont des pointes isolées de 3 mm de diamètre et de 40 mm de longueur, normalement dédiées à l'électrode à marteau d'un hygromètre (cf. section 5.3). Elles sont enfoncées dans le bois à une distance de 3 cm l'une de l'autre. Légèrement trop longues, les pointes ont été raccourcies et dépourvues d'une partie de leur isolation pour assurer un bon contact électrique avec le câble de connexion.

La jonction entre les câbles et les pointes est réalisée à l'aide de connecteurs en barrette de type domino-sucre. Des jonctions par soudure ont été testées, mais la méthode était compliquée et assez lente. L'assemblage pointe-connecteur-câble est ensuite étanchéisé à l'aide de résine époxy.



FIGURE 7.3 – Ensemble pointe-connecteur-câble à une distance de 0,5 fois (à gauche) et 0,3 fois (à droite) la largeur de la pièce à partir de l'une des rives

7.2.2 Système d'acquisition

Les câbles provenant des capteurs sont liés au système d'acquisition par l'intermédiaire de cartes datalogger. Le système d'acquisition, du groupe "*Agilent Technologies*", est un mégohmmètre capable de mesurer de très grandes résistances électriques. Il enregistre les données toutes les 15 minutes pour chaque capteur de chacun des caissons et les transforme en fichier ".txt" (Iweins d'Eeckhoutte (2018), Kouchade (2004)).

7.2.3 Météorologie

Le CSTC possède sa propre station météorologique dont nous avons tiré les données de température extérieure [$^{\circ}\text{C}$], d'humidité relative [%], de vitesse du vent [m/s] et de pluviosité [l/m^2] ou [mm]. Les données sont répertoriées dans un classeur excel par jour, avec un enregistrement de données toutes les minutes. Il était nécessaire de transformer ces données en vue d'obtenir un pas de temps égal aux mesures de résistance du bois afin de pouvoir les comparer. Une moyenne sur 15 minutes des valeurs des différents paramètres a donc été calculée.

Ensuite, il paraissait intéressant de pouvoir connaître également l'humidité absolue de l'air. Il est possible de calculer l'humidité absolue à partir des formules de thermodynamique de l'air humide que peut fournir le guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques (2010).

Les équations à appliquer visent d'abord à déterminer la pression de vapeur saturante de l'air humide en fonction de la pression de vapeur saturante en phase pure et d'une fonction de pression faisant intervenir la pression atmosphérique. La pression atmosphérique n'étant pas un paramètre compris dans les relevés météorologiques de ce travail et étant une variable de faible poids dans le calcul de la pression de vapeur saturante, une valeur moyenne de l'année 2018 déterminée à Ucle par l'Institut Royal Météorologique a donc été considérée. Il est alors possible de déduire les valeurs d'humidité absolue à partir de la loi des gaz parfaits et de la formule d'humidité relative. L'ensemble de ces équations est montré ci-dessous.

Pression de vapeur saturante en phase pure :

$$e_w(T) = 6,112 \times \exp \left[\frac{17,62 \times T}{(243,12 + T)} \right] \quad (7.1)$$

Avec t la température de l'air [$^{\circ}\text{C}$].

Fonction de la pression $f(p)$:

$$f(p) = 1,0016 + 3,15 \times 10^{-6} \times p - 0,074 \times p^{-1} \quad (7.2)$$

Avec p la pression atmosphérique moyenne égale à 1015 hPa.

Pression de vapeur saturante de l'air humide :

$$e_w(p, T) = f(p) \times e_w(T) \quad (7.3)$$

Pression de vapeur réelle à partir de l'humidité relative et de la pression de vapeur saturante :

$$e = e_w(p, t) \times \frac{RH}{100} \quad (7.4)$$

Avec RH l'humidité relative [%].

Loi générale des gaz parfaits :

$$eV = mR_vT \quad (7.5)$$

Avec V le volume de gaz, m la masse de vapeur d'eau et R_v la constante spécifique du gaz pour la vapeur d'eau égale à 461,5.

L'humidité absolue :

$$\frac{m}{V} = \frac{e}{R_vT} \quad (7.6)$$

7.3 Méthode de mesure (Iweins d'Eeckhoutte, 2018)

Dans le cadre de ce travail, il s'agissait de se concentrer sur la mesure de l'humidité du bois plutôt que sur l'EMC. En effet, les pièces de bois étudiées sont exposées à des conditions atmosphériques ambiantes continuellement changeantes. Le TH varie donc constamment et n'atteint pas un vrai équilibre.

La teneur en humidité du bois est mesurée par la méthode de résistance électrique. Cette résistance permet de déterminer la résistivité du bois. À partir de cette grandeur, il est alors possible de calculer le TH du bois.

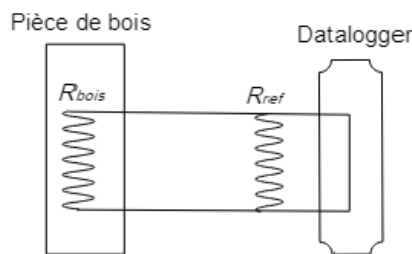


FIGURE 7.4 – Schéma du circuit que forment le datalogger, le bois, les câbles de connexions et la résistance de référence.

La résistivité du bois (ρ) à l'état anhydre est d'environ 10^{14} à $10^{16} \Omega m$ et de 10^3 à $10^4 \Omega m$ pour un bois proche du point de saturation des fibres. Le datalogger, le bois et les câbles de connexion forment un circuit électrique dans lequel est placée une résistance de référence (voir figure 7.4). Si la résistance de référence (R_{ref}) est placée en série par rapport au bois, il faudrait une résistance (R_{ref}) très élevée pour obtenir une mesure exploitable et permettant de cibler de façon plus précise les valeurs proches de 20%. C'est pourquoi cette résistance de référence (R_{ref}) est placée en parallèle et a une valeur proche de $80 \text{ M}\Omega$. Il est très compliqué de trouver des résistances avec une valeur plus grande.

Stamm (1927) a montré qu'à température constante et entre 7% et 30% de teneur en eau, il existe une relation entre la résistivité (ρ) et la teneur en humidité du bois (w). En-dessous de 7%, le matériau est trop isolant et la mesure de résistance sera proche voire égale à la résistance de référence. Au-dessus de 30%, les fibres sont complètement saturées. Il y a de l'eau libre autour des fibres qui crée un pont entre les deux électrodes et fausse la mesure.

La teneur en humidité qui crée des problèmes dans le bois se trouve légèrement au dessus des 20%, car ce sont les conditions idéales pour le développement des champignons et des moisissures. La technique est donc complètement exploitable.

La valeur donnée par les électrodes est une résistance. Il faut donc transformer cette valeur pour obtenir la teneur en eau du matériau [%]. C'est une mesure dite indirecte.

Tout d'abord, comme les résistances sont placées en parallèle, la résistance du matériau dépend de la résistance mesurée et de la résistance de référence :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{mes}} - \frac{1}{R_{ref}} [\Omega] \quad (7.7)$$

Avec R la résistance du matériau [Ω], R_{mes} la résistance mesurée par le capteur [Ω], et R_{ref} la résistance de référence [Ω].

Ensuite, la résistivité électrique (ρ) est déterminée via A.C. Kouchade (Kouchade, 2004) à partir de la résistance électrique du matériau. L'expression de la résistivité est donnée par :

$$\rho = \frac{R \times \Pi \times e}{\ln\left(\frac{r_e+d}{r_e}\right)} \quad (7.8)$$

Avec r_e le rayon des électrodes [m], d la distance entre les deux électrodes [m], e l'épaisseur de l'échantillon [m], et R la résistance électrique [Ω].

Comme mentionné ci-dessus, Stamm (1927) a montré qu'il existe un lien entre la résistivité du bois et son taux d'humidité. Il est donc possible de déterminer la teneur en eau par la relation suivante :

$$\begin{aligned} \ln(\rho) &= Q + H \times \ln(w) \\ w &= \exp\left(\frac{\ln(\rho) - Q}{H}\right) \end{aligned} \quad (7.9)$$

Avec ρ la résistivité électrique [Ωm], w la teneur en eau de matériau [%], Q et H des constantes (H négative).

Les constantes Q et H ont été calculées sur base d'essais réalisés au CSTC pour déterminer les courbe de sorption et désorption à une température constante de 23 ° C pour le sapin rouge du nord dans le cadre du TFE de Matthieu Iweins d'Eeckhoutte (2018). Ces constantes diffèrent d'une espèce à l'autre. Cependant, étant donné la difficulté de calculer ces constantes ou de les obtenir, les constantes Q et H du sapin rouge du nord seront utilisées pour l'épicéa dans le cadre de ce travail en faisant l'hypothèse d'une faible différences entre les valeur des constantes de ces deux essences.

7.4 Positionnement des caissons

Les caissons sont installés sur le site du CSTC. Dans la logique de l'expérience, ces caissons doivent être exposés aux intempéries. Cependant, une contrainte majeure doit être satisfaite : les caissons doivent être posés à proximité d'un bâtiment dans lequel se trouve le système d'acquisition. Les caissons ont dès lors été placés le long d'une voie de circulation entre un hangar et des maisons tests qui abritent ce système (voir figure 7.5). Les caissons sont situés à environ 1 m du hangar, face arrière (couverte par l'OSB) vers celui-ci, et à 6 m environ des maisons tests, face avant (couverte par le Celit) vers celles-ci. Cette disposition permet aux parois d'être pleinement exposées tout en répondant à la contrainte précédemment mentionnée.

Les caissons sont posés sur deux blocs en brique et stabilisés par des étaçons, comme le montre la figure 7.2.



FIGURE 7.5 – Position des caissons (en rouge) entre le hangar et les maisons dans lesquelles se situe le système d’acquisition.

7.5 Traitement de données

Tri

Les données des capteurs ont été récupérés en fichiers excel comportant une donnée de résistance par capteur toutes les 15 minutes. Suite à certains problèmes, qui seront décrits plus tard, et certains décalages dus à l’ajout de capteur au datalogger, un travail conséquent de tri de données a dû être effectué avant de pouvoir commencer le traitement.

Désignation des caissons et capteurs

De façon à rendre la présentation des résultats plus aisée, chaque caisson et capteur s’est vu attribuer un nom. En ce qui concerne les caissons, les deux premières lettres correspondent au type de caisson : grand ouvert (GO) ou grand fermé (GF). Les quatre chiffres qui suivent correspondent au mois et à l’année de pose des caissons. Soit "GF 1218" : le grand caisson fermé posé en décembre 2018. Les capteurs quant à eux sont nommés par deux lettres et un chiffre. Les deux lettres désignent la pièce de bois dans laquelle il sont disposés et le chiffre correspond à la position du capteur par rapport à la rive de la pièce de bois. Les dénominations des différents capteurs sont reprises dans le tableau 7.1.

Logiciels

Les données de résistance ont été transformées en données d’humidité du bois via le logiciel excel. En raison de ses capacités graphiques et de ses capacités à traiter de lourds

TABLE 7.1 – Signification des abréviations des noms des caissons et des capteurs.

Caissons

| | |
|---------|--|
| GO 1218 | Caisson grand ouvert posé en décembre 2018 |
| GF 1218 | Caisson grand fermé posé en décembre 2018 |
| GO 0119 | Caisson grand ouvert posé en janvier 2019 |
| GF 0119 | Caisson grand fermé posé en janvier 2019 |
| GO 0219 | Caisson grand ouvert posé en février 2019 |
| GF 0219 | Caisson grand fermé posé en février 2019 |
| GO 0319 | Caisson grand ouvert posé en mars 2019 |
| GF 0319 | Caisson grand fermé posé en mars 2019 |
| GO 0419 | Caisson grand ouvert posé en avril 2019 |
| GF 0419 | Caisson grand fermé posé en avril 2019 |

Capteurs

| | |
|-----|---|
| LB1 | Capteurs placé dans la lisse basse à une distance de 0,3 fois la largeur de la pièce à partir de l'une des rives |
| LB2 | Capteurs placé dans la lisse basse à une distance de 0,5 fois la largeur de la pièce à partir de l'une des rives |
| MV1 | Capteurs placé dans le montant vertical à une distance de 0,3 fois la largeur de la pièce à partir de l'une des rives |
| MV2 | Capteurs placé dans le montant vertical à une distance de 0,5 fois la largeur de la pièce à partir de l'une des rives |
| LH1 | Capteurs placé dans la lisse haute à une distance de 0,5 fois la largeur de la pièce à partir de l'une des rives |

fichiers de données, le logiciel R a ensuite été utilisé pour la réalisation de l'ensemble des graphiques présentés ci-après.

Période d'expérimentation

La période d'expérimentation a duré 5 mois. Les premiers caissons ont été posés en décembre 2018. Ensuite, chaque mois, deux nouveaux caissons ont été ajoutés (un caisson plein et un caisson vide). Pour chacun de ces caissons, les données ont été récoltées et traitées jusqu'au 21/05/2019. Pour une meilleure compréhension du déroulement de l'expérimentation la figure 7.6 montre la ligne du temps expérimentale.

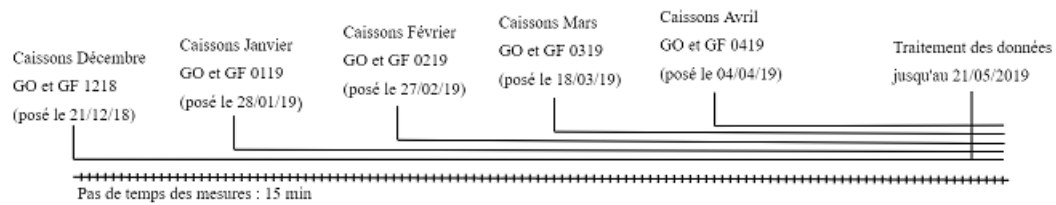


FIGURE 7.6 – Ligne du temps de l'expérimentation.

7.6 Erreurs et artéfacts

Les graphiques tels que celui présenté à la figure 8.1 présentent des zones qui peuvent porter à confusion et à propos desquelles il est légitime de s'interroger. Plusieurs type d'erreurs rencontrées lors de l'acquisition de données peuvent poser problème lors de la mise en graphique et créer des artéfacts.

Saut d'enregistrement

Une première erreur, assez courante, est un défaut d'enregistrement de données. Le datalogger est programmé pour réaliser des mesures avec un pas de temps de 15 minutes, mais il arrive que ce dispositif cesse de fonctionner pour une durée variable allant de quelques minutes à plusieurs semaines. Ce phénomène peut notamment être dû a des coupures de courants. Ce type d'erreurs se manifeste sur un graphique par la présence de ligne droite.

| | | | | | |
|------|----------------|----------|-----|----------|-----|
| 4803 | 30-04-19 16:30 | 7,09E+07 | 101 | 1,48E+07 | 102 |
| 4804 | 02-05-19 20:49 | 7,68E+07 | 101 | 2,15E+07 | 102 |

FIGURE 7.7 – Saut d'enregistrement de données dans un fichier excel de données brutes.

Absence d'acquisition

Un deuxième type d'erreur, également fréquent, est une absence d'acquisition de données. Contrairement à l'erreur précédemment décrite, le datalogger ne s'arrête pas de fonctionner mais ne prend pas de mesures ou enregistre des mesures "vides". Un exemple de ce type d'erreur est présenté à la figure 7.8. Sur un graphique, cette erreur se manifeste par un "trou", une période vierge de données. Ce genre d'erreur peut se prolonger plusieurs jours.

| | | | | | |
|------|----------------|----------|-----|----------|-----|
| 4688 | 29-04-19 12:00 | 7,67E+07 | 101 | 2,92E+07 | 102 |
| 4689 | 29-04-19 12:15 | | | | |

FIGURE 7.8 – Absence d'acquisition de données dans un fichier excel de données brutes.

Données aberrantes

Il arrive également de récolter certaines données aberrantes. Des taux d'humidité du bois anormalement bas (0%) ou anormalement haut (de 100 à 300 %) peuvent apparaître. Ces données perturbent la mise en graphique des résultats et n'apportent aucune information exploitable ; elles sont donc supprimées. Il arrive également que des courbes présentent des hausses soudaines de taux d'humidité pour des raisons non-identifiées, et qu'ensuite ces mêmes courbes reviennent à un comportement normal, tout en conservant un décalage. Un exemple de ce phénomène apparaît sur la figure 8.1 avec la courbe "LB2".

Résistances de référence

Les résistances de référence doivent avoir une haute valeur de résistance pour pouvoir obtenir une mesure exploitable (cf. section 7.3). Cependant, il est arrivé que lors du branchement des capteurs au datalogger, des résistances trop faibles soient installées. Étant donné que les résistances de référence sont placées en parallèle dans le circuit, lorsqu'elles sont trop faibles, la solution de l'équation 7.7 devient une valeur négative. Dans cette situation, il n'est pas possible de calculer les valeurs d'humidité du bois puisque la formule 7.9 fait intervenir des logarithmes népériens.

Vérifications

Dans le calcul de l'humidité, les hypothèses retenues à propos des paramètres utilisés peuvent être erronées, et donc sources d'erreurs. Dans l'équation 7.9, les constantes Q et H utilisées ont été calculées pour le sapin rouge du nord. Pour évaluer dans quelles proportions cette hypothèse fausse les résultats, des mesures de contrôle ont été effectuées à l'aide de l'hygromètre le 28/05/2019. Malheureusement, un saut d'enregistrement s'est produit entre le 27/05 et le 04/06, et a donc rendu impossible la vérification des mesures.

8 | Résultats & discussions

Dans ce chapitre sont présentés les résultats obtenus et les réflexions inspirées par le processus de transformation de données. Ces expérimentations ont apporté une quantité très importante d'informations ; c'est pourquoi une partie seulement des résultats, la plus pertinente dans le cadre de ce travail, sera présentée ici. L'ensemble des résultats est cependant repris en annexe.

Dans cette partie, relative au suivi temporel des taux d'humidité, les discussions seront étroitement associées à la présentation des résultats. Il n'y aura dès lors pas de section "Discussion" distincte. Les résultats relatifs aux différentes variables supposées déterminantes, et aux différentes tendances recherchées seront discutés à mesure qu'ils seront présentés.

8.1 Analyse des variations d'humidité

En concertation avec le CSTC il a été décidé de retenir les valeurs d'humidité des LH1 comme valeurs de références de chaque caisson. Les montants verticaux sont moins exposés, donc moins susceptibles de reprendre l'humidité et les lisses basses peuvent avoir un contact direct avec de l'eau, ce qui peut être source d'erreurs. La rubrique 8.1.4 fait exception en représentant des valeurs d'humidité fournies par les capteurs MV2 pour des raisons qui seront mentionnées plus tard.

D'autre part, les données d'humidité du bois ont été confrontées aux données météorologiques les plus influentes. Les données de vitesse des vents ne se sont pas avérées déterminantes, c'est pourquoi elles ne seront pas analysées.

8.1.1 Analyses brutes

Consécutivement au tri des données de résistance, la deuxième étape du traitement de données consiste à calculer l'humidité du bois à partir des résistances. Pour ce faire, il a fallu appliquer successivement à l'ensemble des données les trois formules 7.7, 7.8 et 7.9, présentées précédemment. La figure 8.1 montre le résultat obtenu après l'application de ces formules aux données de résistance de la grande paroi fermée posée en décembre

2018 (GF1218) ; ce résultat est proposé ici à titre d'exemple. L'ensemble des graphiques relatifs aux 10 caissons de l'expérience est présenté en annexe (voir annexe B).

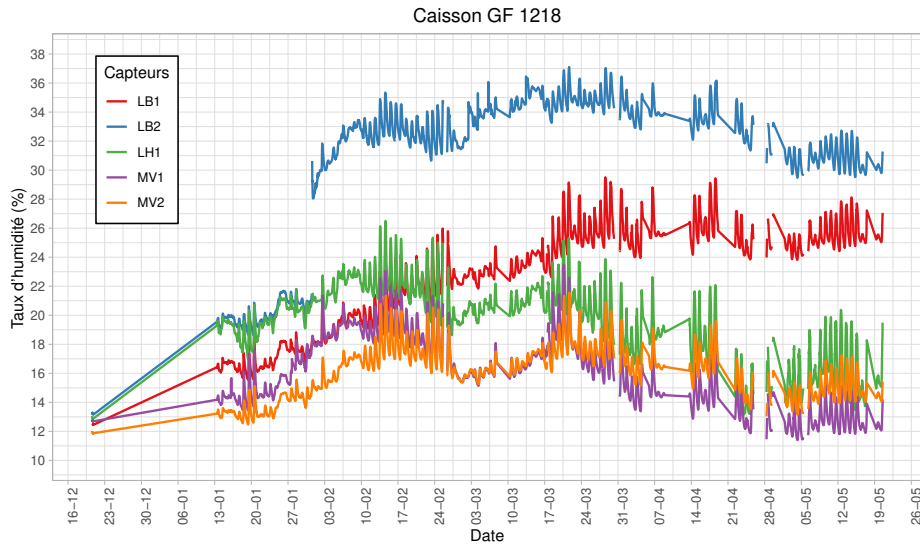


FIGURE 8.1 – Taux d'humidité du bois du 21/12/18 au 21/05/19 du caisson "grand fermé" posé en décembre 2018.

8.1.2 Effet de la température

Résultats

La figure 8.1 mérite une attention particulière sur un intervalle de temps plus restreint. L'analyse des variations d'humidité du bois à l'échelle journalière apparaît en effet intéressante. La figure 8.2 (courbe W_{stamm}) montre une portion de 8 jours de la courbe d'humidité du caisson GF 1218. De façon assez étonnante, des fluctuations particulièrement importantes, parfois supérieurs à 6%, apparaissent dans des délais très brefs, de l'ordre d'une dizaine d'heures. Ces fluctuations sont rencontrées dans toutes les parois et pour tous les capteurs. Elles réclament des investigations complémentaires.

Discussion

Les données d'humidité ont été calculées par la formule 7.9 développé par A.J. Stamm, liant la résistivité du bois et le taux d'humidité du bois à température (du bois) constante. Il semble cependant évident que la température du bois varie au cours de la journée, alors pourquoi ne pas avoir pris en compte ces variations de température ? Il aurait été nécessaire de relever la température du bois avec un pas de temps égal à celui utilisé pour les mesures de résistances. Dans le cadre de ce travail, il n'a pas été possible de mettre en place un tel dispositif. Initialement, il a donc été décidé de calculer les taux d'humidité à température considérée constante et d'observer les résultats obtenus. Au vu des ces

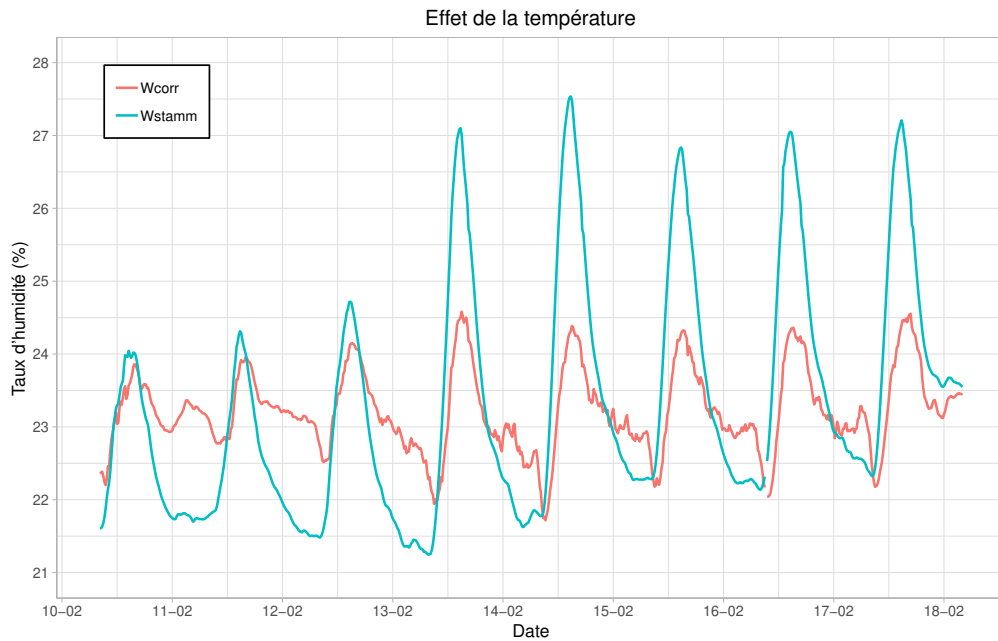


FIGURE 8.2 – Effet de la température sur les variations journalières (données provenant de GO 1218), avec W_{corr} l’humidité corrigée par la température et W_{stamm} l’humidité calculée avec température constante.

résultats, il est évident que l’effet de la température du bois sur les fluctuations du taux d’humidité a été largement sous-estimé, la température étant bien le seul paramètre qui était susceptible de varier autant et de façon aussi rythmique.

Forsén et Tarvainen (2000) ont étudié les effets de plusieurs facteurs dont la température sur la résistance électrique du bois. Ils ont ainsi pu développer une équation qui corrige l’effet de la température du bois dans la détermination du taux d’humidité du bois à partir de sa résistance. Outre la température du bois et le taux d’humidité calculé par la formule de Stamm à température constante, cette équation fait intervenir deux constantes, a et b , déterminées à partir d’une droite de régression liant la teneur en humidité du bois à la résistance du bois pour une espèce donnée. Les valeurs de ces constantes nous ont été fournies par le CSTC. L’équation de correction de l’effet de la température se présente comme ceci :

$$W_{corr} = -\frac{0,00147T \ln(10) + \ln(\exp[aW_{stamm} \ln(10) + b \ln(10)] + 1) - 1,075 \ln(10)}{\ln(10)(0,000158T + 0,0262)} \quad (8.1)$$

Avec W_{corr} la teneur en eau corrigée du bois [%], W_{stamm} la teneur en eau du bois calculée par la formule de Stamm à température constante de 23 °C [%], T la température du bois [°C], a et b des constantes.

Le problème de mesure de la température du bois subsiste néanmoins. Pour le contour-

ner, l'hypothèse suivante est émise : la température du bois est égale à la température ambiante. Dès lors que les données de température ambiante étaient disponibles via les relevés météorologiques, la formule 8.1 a pu être appliquée. La figure 8.2 montre que la courbe de la teneur en humidité du bois corrigée par la température (W_{corr}) présente des fluctuations de plus faible amplitude par rapport à celle de la teneur en humidité du bois à température constante (W_{stamm}).

Prendre en considération la température dans le calcul du taux d'humidité du bois a pour effet de comprimer les variations journalières, très vraisemblablement de s'approcher de la réalité.

8.1.3 Paradoxe des humidités

Résultats

Comment de telles variations journalières peuvent-elles être expliquées ? Il est légitime de penser d'abord à comparer les variations du taux d'humidité du bois avec les variations d'humidité relative de l'air puisque cette dernière conditionne largement l'humidité du bois comme le montrent les hystérèses de sorption. Le graphique 8.3, en plus de comparer ces deux paramètres, montre les variations de température de l'air associées.

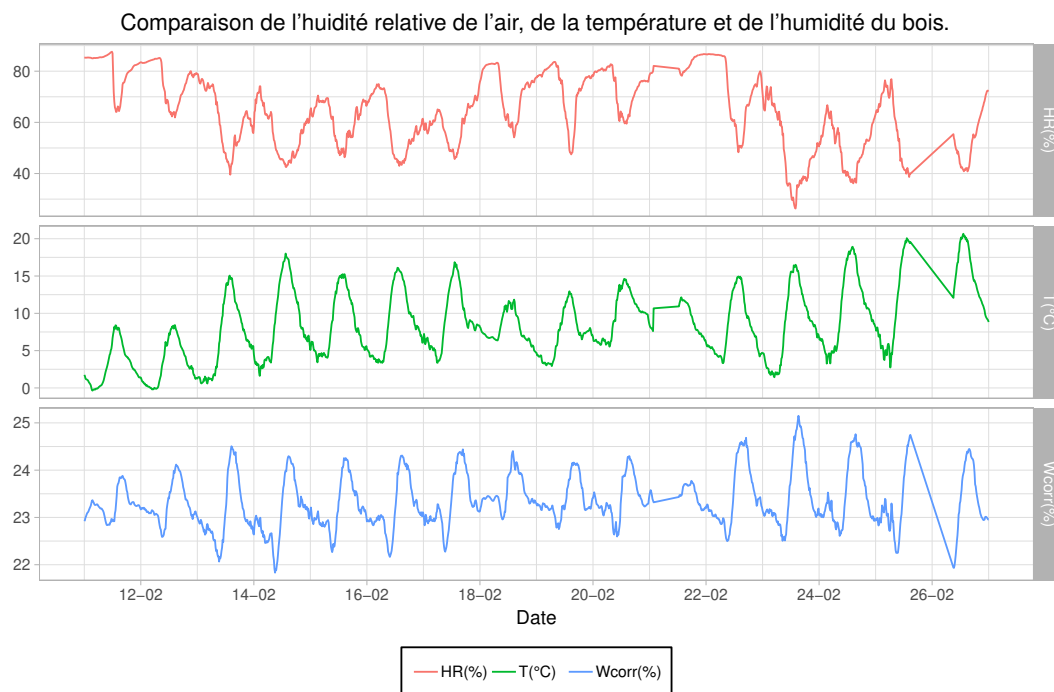


FIGURE 8.3 – Comparaison du taux d'humidité du bois [%], de l'humidité relative de l'air [%] et de la température de l'air [°C].

Il est assez paradoxal de constater à l'examen de la figure 8.3, une variation de l'humidité du bois inversement proportionnelle à celle de l'humidité relative de l'air. La

figure 8.4 montre une corrélation négative entre ces deux variables. Cette corrélation est calculée sur l'ensemble des valeurs de la figure 8.3, sans tenir compte du temps. Il est évident qu'à l'échelle d'un jour, le coefficient de corrélation est beaucoup plus élevé en valeur absolue. Il est également possible d'observer sur la figure 8.3 une analogie entre les variations journalières de température et les variations journalières d'humidité du bois. Ces deux paramètres sont positivement corrélés, avec un coefficient de corrélation bien plus élevé que celui entre l'humidité du bois et l'humidité relative comme le montre la figure 8.4.

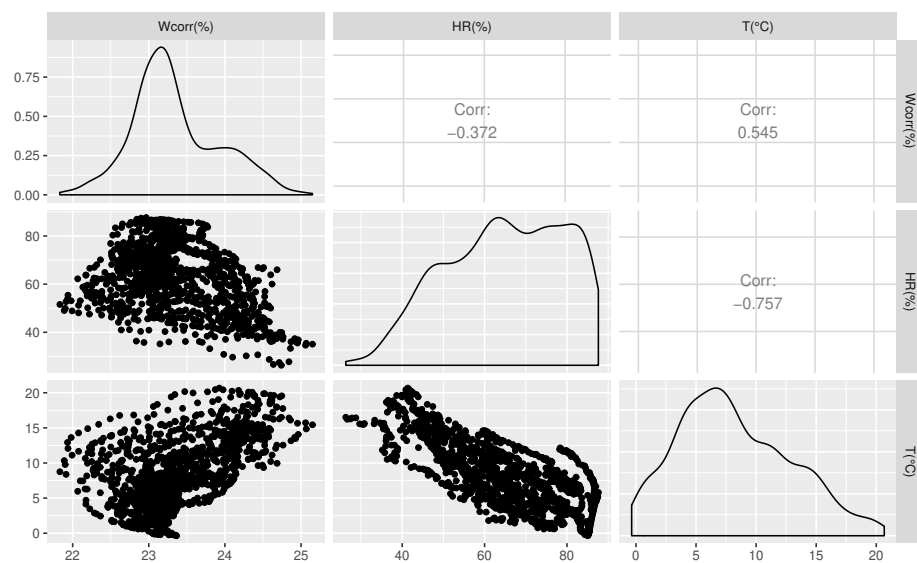


FIGURE 8.4 – Corrélation entre les variations d'humidité du bois (W_{corr}), d'humidité relative de l'air (HR), et de température (T °C).

Discussion

Décalage temporel entre W_{corr} et HR L'hypothèse d'un décalage temporel dû au temps de réaction du bois a été envisagée. Un temps de réaction d'une demi-journée expliquerait une augmentation de l'humidité du bois en même temps qu'une diminution de l'humidité relative de l'air. Il est toutefois possible de constater une réaction immédiate et systématique de l'humidité du bois aux variations d'humidité relative de l'air. En effet, les pics des micro-variations sont quasi simultanés et de même amplitude mais de sens opposé. Cette hypothèse est donc raisonnablement écartée.

Humidité absolue Un lien entre l'humidité du bois et les variations d'humidité absolue est une hypothèse qui a également été examinée. L'humidité absolue représente la quantité, en grammes, de vapeur d'eau présente dans un volume d'air sec donné.

Les variations de l'humidité absolue vont, cette fois, dans le même sens que celles de l'humidité du bois, comme le montre la figure 8.5. La correspondance entre ces deux courbes est toutefois irrégulière, particulièrement en ce qui concerne les amplitudes. Bien qu'elles contribuent vraisemblablement aux variations de l'humidité du bois, les variations d'humidité absolue ne parviennent pas à expliquer le paradoxe tel qu'observé.

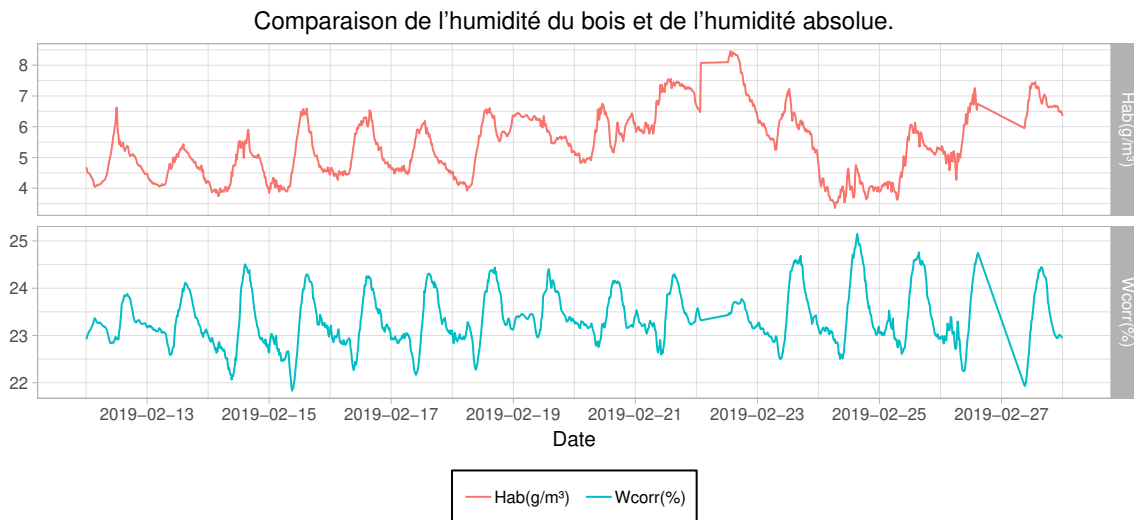


FIGURE 8.5 – Variations du taux d'humidité du bois [%] et de l'humidité absolue de l'air [g/m^3].

Effet de succion Une diminution de l'humidité du bois lorsque la température diminue pourrait aussi être expliquée par un effet de succion. La vapeur d'eau a toujours tendance à se déplacer des zones de forte concentration vers des zones de faible concentration. Partons d'un point où la température du bois et celle de l'air sont à l'équilibre. Si la température de l'air diminue, la pression de vapeur saturante diminue et une partie de la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense ; la quantité réelle de vapeur d'eau dans l'air a donc diminué. Imaginons, comme c'est vraisemblable, que les variations de température du bois présente un décalage par rapport aux variations de température de l'air. Le bois reste un moment plus chaud que l'air, et la quantité réelle de vapeur présente dans le bois devient supérieure à celle dans l'air. Alors, un mouvement de vapeur d'eau du bois vers l'air peut se produire.

Sensibilité à la température La figure 8.3 montre une correspondance étonnamment étroite entre les variations de l'humidité du bois et celles de la températures de l'air, alors qu'une augmentation de la température de l'air devrait induire une diminution du taux d'humidité du bois. Une réponse aussi immédiate, et aussi équivalente de l'humidité du bois aux variations de température conduit à suspecter une sensibilité excessive des capteurs à la température de l'air. Il serait évidemment nécessaire de vérifier

cette sensibilité. Malheureusement, il n'a pas été possible de le faire dans le cadre de ce travail.

8.1.4 Effet du type de caisson

Résultats

Deux types de caissons ont été réalisés pour représenter deux réalités différentes de construction. La distinction entre ces deux types de caissons est-elle justifiée ? La figure 8.6 montre les différences de taux d'humidité du bois entre un caisson ouvert et un caisson plein. Afin de bien représenter l'effet de la fermeture d'un caisson, les valeurs d'humidité sont celles mesurées par le capteur MV2. Ce capteur se situe dans une pièce de bois entièrement recouverte dans un caisson plein et est donc susceptible de mieux rendre compte d'un effet de la fermeture d'un caisson. Les mois de décembre et de février ont été choisis ici pour leur caractère représentatif. La figure 8.6 montre que le taux d'humidité est supérieur de quelques pourcents dans les caissons ouverts.

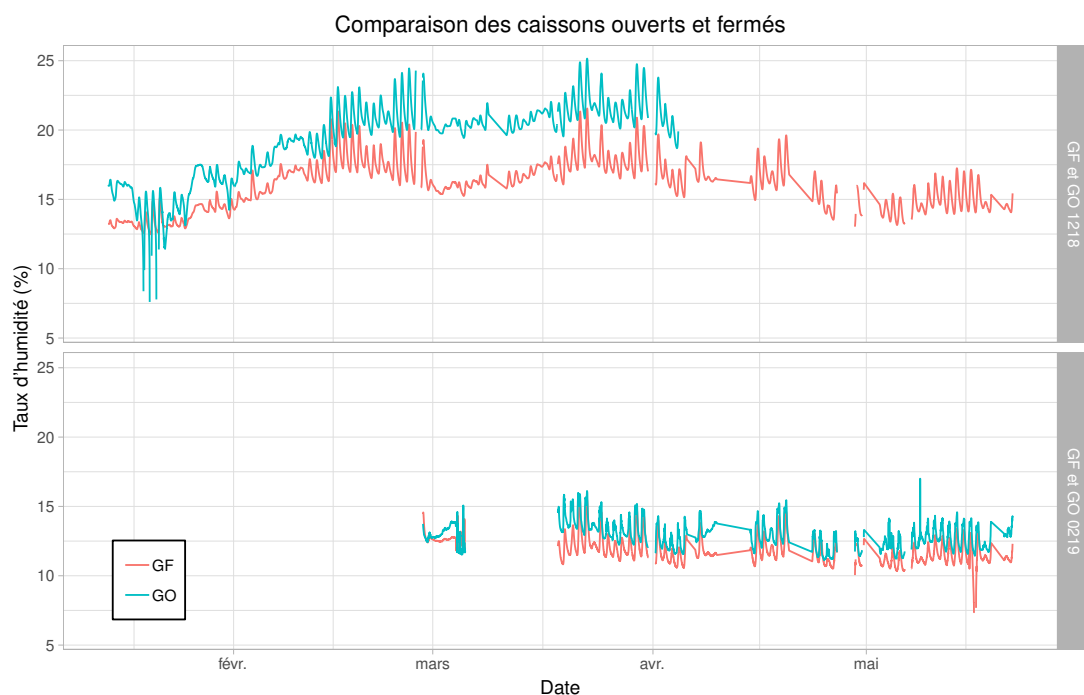


FIGURE 8.6 – Comparaison des taux d'humidité des caissons ouverts et fermés.

Discussion

La fermeture des caissons entraîne logiquement une moindre reprise d'humidité et des taux d'humidité plus faibles comme le montre la figure 8.6 avec la courbe rouge qui représente les taux d'humidité d'un caisson plein. La protection des pièces de bois

par l'isolant et les panneaux atténuent nettement la reprise d'humidité. Les panneaux de février, qui n'ont pas été exposés à des conditions favorables à une reprise d'humidité, montrent des taux d'humidité du bois nettement moins contrastés que ceux des panneaux de décembre. Il faut en outre souligner, indépendamment des tendances globales, l'importance, dans les deux types de caissons, des variables quotidiennes, ce qui renforce la suspicion d'hypersensibilité de la mesure vis-à-vis sans doute de la température.

8.1.5 Effet de la date de pose

Résultats

L'effet des dates auxquelles les caissons ont été posés sur la reprise d'humidité des bois est montré à la figure 8.7. Les taux d'humidité sont ici des moyennes journalières pour lisser l'information et rendre l'analyse plus aisée.

Il apparaît que l'humidité du bois dans les différents caissons varie de manière simultanée et similaire à une valeur près sur laquelle nous n'avons pas d'informations : l'humidité initiale des bois. Dans la figure 8.8, un point focal est mis sur une période allant du début du mois d'avril à la fin du mois de mai, période durant laquelle les caissons des 5 mois peuvent être comparés. Ce graphique met en exergue la similarité des variations de l'humidité dans les différents caissons.

Le caisson posé en janvier (courbe bleue) n'est pas pris en considération dans la lecture et la discussion de ce graphique. Pour une raison encore inconnue, ce caisson montre de très faibles variations, à tel point que son taux d'humidité semble constant. Ce comportement, différent des quatre autres, pourrait être erroné et n'est donc pas retenu.

Discussion

La figure 8.8 montre une extrême similitude dans les oscillations des humidités des bois entre les différents caissons. Le choix d'un portique parmi les autres permet donc d'être représentatif dès lors que l'ensemble des caissons se comporte de manière homogène. C'est pourquoi, dans l'analyse d'une tendance générale, le choix s'est porté sur le premier caisson posé, donc sur le caissons qui a été le plus longtemps exposé aux intempéries, et qui surtout présente l'intérêt d'avoir pu être valablement mesuré au moment des épisodes pluvieux de début d'année.

Sur ce même graphique, il est également possible d'observer une tendance à la convergence des différentes courbes de variations d'humidité du bois. Les différences entre les taux d'humidité des parois sont révélatrices à cet égard. Début avril, la différence entre la plus haute et la plus faible valeur d'humidité tous caissons confondus (excepté janvier) est égale à 4,8% environ. Au début du mois de mai, cette différence est descendue à 2,5%.

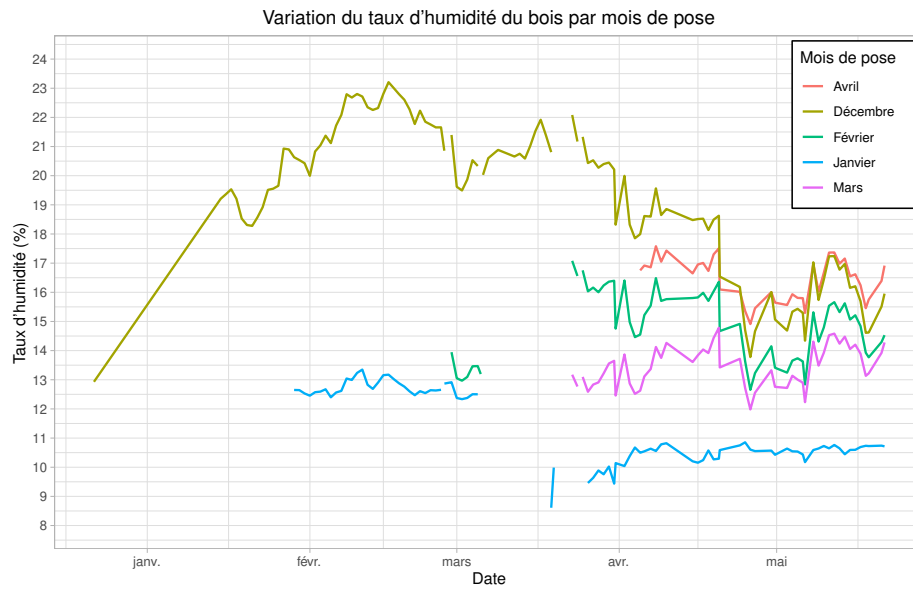


FIGURE 8.7 – Courbes des moyennes journalières des taux d’humidité des caissons fermés selon leur mois de pose.

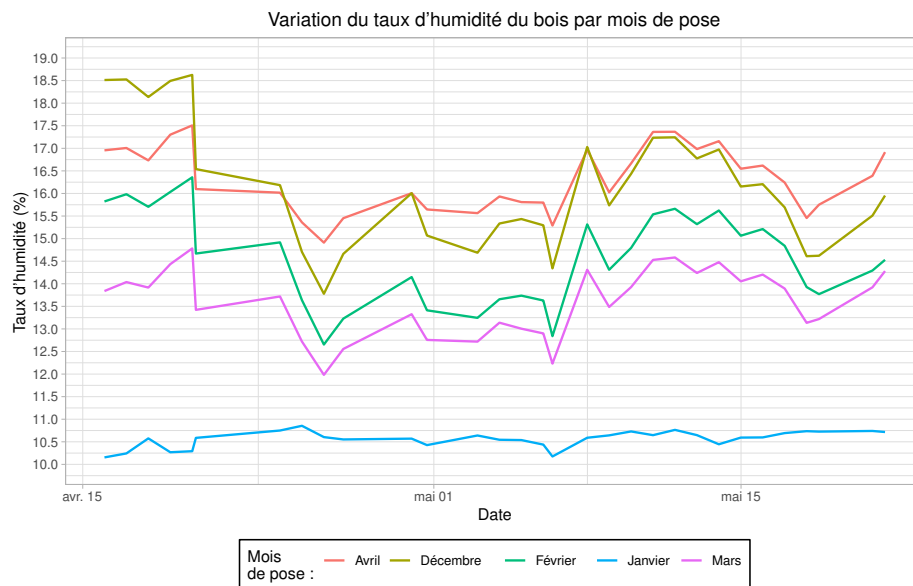


FIGURE 8.8 – Courbes des moyennes journalières des taux d’humidité des caissons fermés selon leur mois de pose (période d’avril à mai).

Par extrapolation, et sachant de quelle incertitude peut être entachée cette démarche, il est possible de fixer un point de convergence des courbes d’humidité du bois des différents caissons aux environs du mois de juillet. Cette observation vient également en appui de l’hypothèse sus-mentionnée selon laquelle un caisson peut être représentatif des autres ce qui a toute son importance dans la planification d’éventuelles poursuites de ces mesures expérimentales.

8.1.6 Tendance générale

Résultats

La figure 8.9 présente les variations d'humidité au cours des cinq mois d'expérience acquises par le capteur LH1 du caisson GF 1218. Par rapport à une hypothétique saisie de la totalité des données, donc par rapport à un fonctionnement sans faille des capteurs sur cet élément, un total de 73,3 % des données sont exploitables. Ce caisson présente la quantité de données la plus complète comparativement aux 10 autres caissons, ce qui justifie qu'il soit utilisé en tant que caisson de référence pour l'analyse de la tendance générale. De la même manière que pour les graphes de la section 8.1.5, les valeurs d'humidité du bois représentées dans les figures 8.10, 8.11, 8.12 sont des moyennes journalières afin de pouvoir lisser l'information.

Malgré le paradoxe rencontré à l'échelle des microvariations (variations journalières), les tendances générales des variations de l'humidité du bois (figure 8.9) sont assez cohérentes en fonction de celles de l'humidité relative de l'air et de la température durant la même période (figure 8.10). Elles atteignent de hautes valeurs pendant l'hiver et diminuent progressivement durant le printemps.

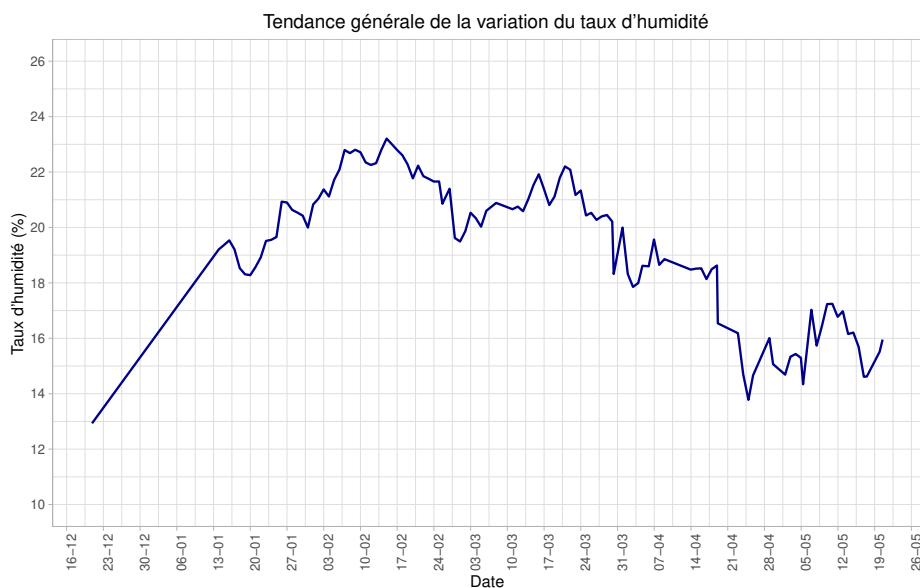


FIGURE 8.9 – Tendance générale de la variations d'humidité du bois (moyennes journalières du caisson GF 1218).

Discussion

La figure 8.9 permet une première représentation de la cinétique de reprise d'humidité de bois exposés aux intempéries. Les premières données d'humidité du bois après la pose indiquaient environ 13% le 21/12/2018. Une augmentation d'humidité s'est ensuite

produite jusqu'à des valeurs proches de 23% le 15/02/2018, soit 10% en un peu moins de deux mois.

Un taux d'humidité du bois au delà de 20% est atteint pour la première fois aux alentours du 25 janvier, et se maintient au dessus de cette valeur pendant près de deux mois. De tels niveaux autorisent le développement de champignons et de moisissures. Cette période peut dès lors être considérée comme une "période à risques".

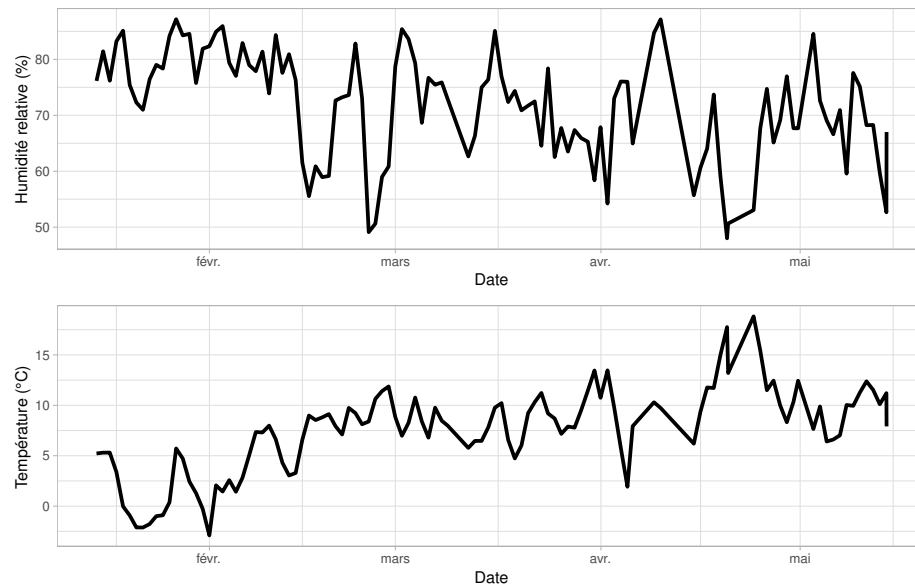


FIGURE 8.10 – Variations des moyennes journalières de l'humidité relative de l'air et de la température durant les 5 mois de l'expérience.

Une valeur maximale est atteinte mi-février, à la suite de quoi une lente diminution irrégulière du taux d'humidité s'opère. L'humidité du bois redescend à des taux proche de 16% en un peu plus de 3 mois. Durant cette période de réduction du taux d'humidité surviennent des fluctuations importantes. La figure 8.11 montre 3 fluctuations (A, B et C) que des conditions météorologiques peuvent expliquer.

En reprenant les graphiques des variations de l'humidité relative et de la température de la figure 8.10, il est possible d'expliquer les chutes d'humidité du bois dans les zones A et C de la figure 8.11. Pendant les périodes correspondantes s'observent une diminution d'humidité relative et une augmentation des températures. La chute en zone C est plus marquée qu'en zone A, ce qui est cohérent et correspond à une fort augmentation de température.

Le point B correspond à une reprise d'humidité non négligeable durant la première moitié du mois de mars. Cette reprise d'humidité peut difficilement être expliquée pas les fluctuations de l'humidité relative de l'air, très irrégulières pendant cette période. Mais un autre paramètre météorologique serait susceptible d'expliquer la reprise d'humidité du bois. La figure 8.12 montre la pluviosité durant les 5 mois de l'expérience. Un fort épisode

pluvieux apparaît au début du mois de mars. Ces précipitations sont potentiellement responsables de l'augmentation d'humidité du bois durant cette période.

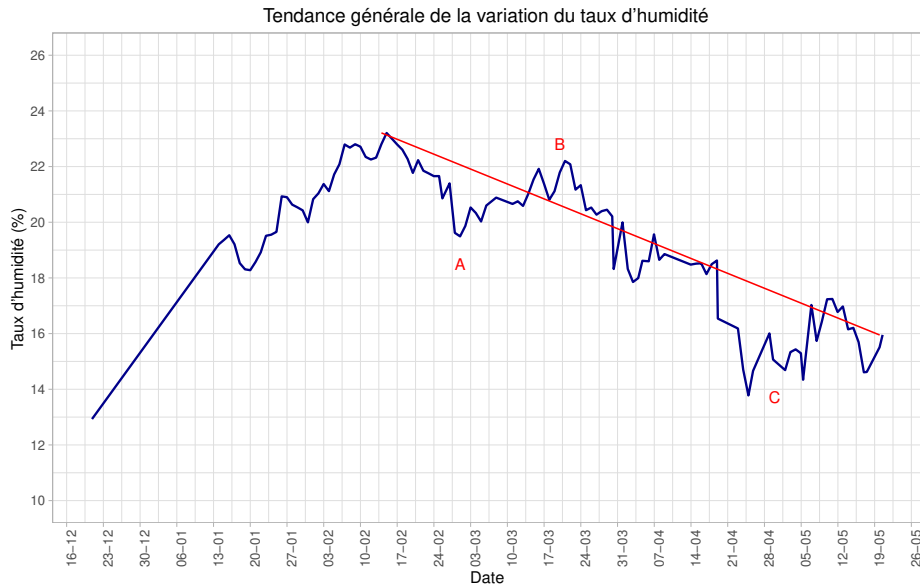


FIGURE 8.11 – Fluctuations observées sur la courbe de la tendance générale des variations d'humidité du bois.

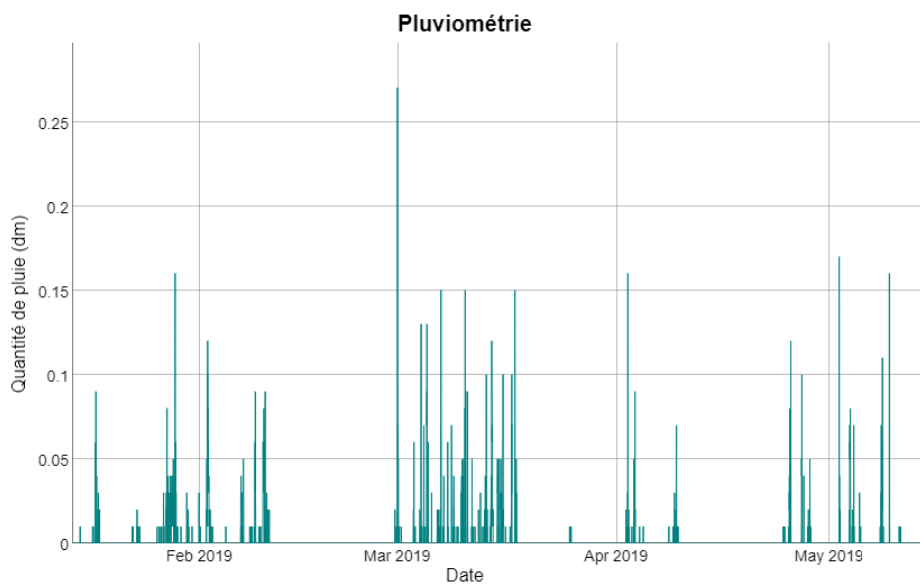


FIGURE 8.12 – Pluviométrie moyenne par intervalle de 15 min durant toute période de l'expérience.

La tendance générale des variations d'humidité du bois apparaît, au premier abord, similaire aux variations mensuelles du taux d'humidité du bois observées par Tsoumis (1960) dans ses expériences sur des échantillons de bois sous abri en Grèce (cf. section

2.3, figure 2.3). Cependant, une analyse plus attentive révèle des différences importantes entre ces deux évolutions.

Les différences les plus évidentes concernent les niveaux de taux d'humidité et les amplitudes de variation. Les résultats de Tsoumis montrent des variations d'humidité allant de 8% à 15% ($\Delta = 7\%$) contre des variations de 13% à 23% ($\Delta = 10\%$) pour les résultats présentés dans ce travail.

Les deux observations montrent une même logique de variation avec des taux d'humidité du bois élevés en hiver (humidité relative élevée) et faible en été (humidité relative faible). Ceci étant dit, ils ne peuvent pas véritablement être comparés puisqu'ils se différencient par leur exposition à l'environnement extérieur (sous abris pour Tsoumis) et par le climat auquel ils sont soumis. Deux paramètres extrêmement influents lorsqu'il s'agit d'étudier les variations du taux d'humidité du bois exposé aux intempéries.

8.1.7 Reprise d'humidité hivernale

Résultats

Sur le graphique des tendance générales (caisson fermé posé en décembre), apparaissait une reprise d'humidité du bois de 10% en un peu moins de 2 mois. Une augmentation plus marquée encore est observée pour le caisson GO 1218 avec une hausse de 8% en seulement 5 semaines (entre le 21/01/2019 et le 26/02/2019). La figure 8.13 permet de confronter cette augmentation d'humidité du bois à différents évènements météorologiques qui se sont produits durant la même période.

Le premier graphique montre l'humidité du bois qui augmente et qui atteint des valeurs proches de 25%. Le deuxième graphique montre une humidité relative de l'air de 80%, qui se maintient autour de cette valeur durant les quatre premières semaines. La simple considération de ce deuxième graphique ne permet pas d'expliquer l'augmentation d'humidité du bois observées, ce qui pose question.

Discussion

Il est naturel de penser que le taux d'humidité du bois (aux alentours de 13% lors de la pose) tend à se mettre en équilibre avec l'humidité relative de l'air environnant, qui est ici de 80%. Autrement dit, le bois tend vers l'EMC. Il faut noter que pendant cette période, la température est particulièrement faible (entre 0 ° C et 6 ° C) ce qui relève l'isotherme de sorption et donc la valeur d'EMC des bois. Il devient dès lors pertinent de déterminer la valeur de l'EMC dans de telles conditions de température et d'humidité relative.

Il est difficile de trouver dans la littérature une courbe d'hystérèse de l'épicéa pour des température si basses. Il est toutefois possible de trouver des abaques, des hystérèses et

des graphes de variation de l'EMC fournissant des ordres de grandeur pour les résineux. La figure 8.14 montre un abaque d'équilibre hygroscopique des résineux (Bureau de normalisation (NBN), 2005) et une hystérèse de sorption/désorption pour le *Picea Abies* à une température de 5,5 °C (Rijsdijk & Laming, 1994).

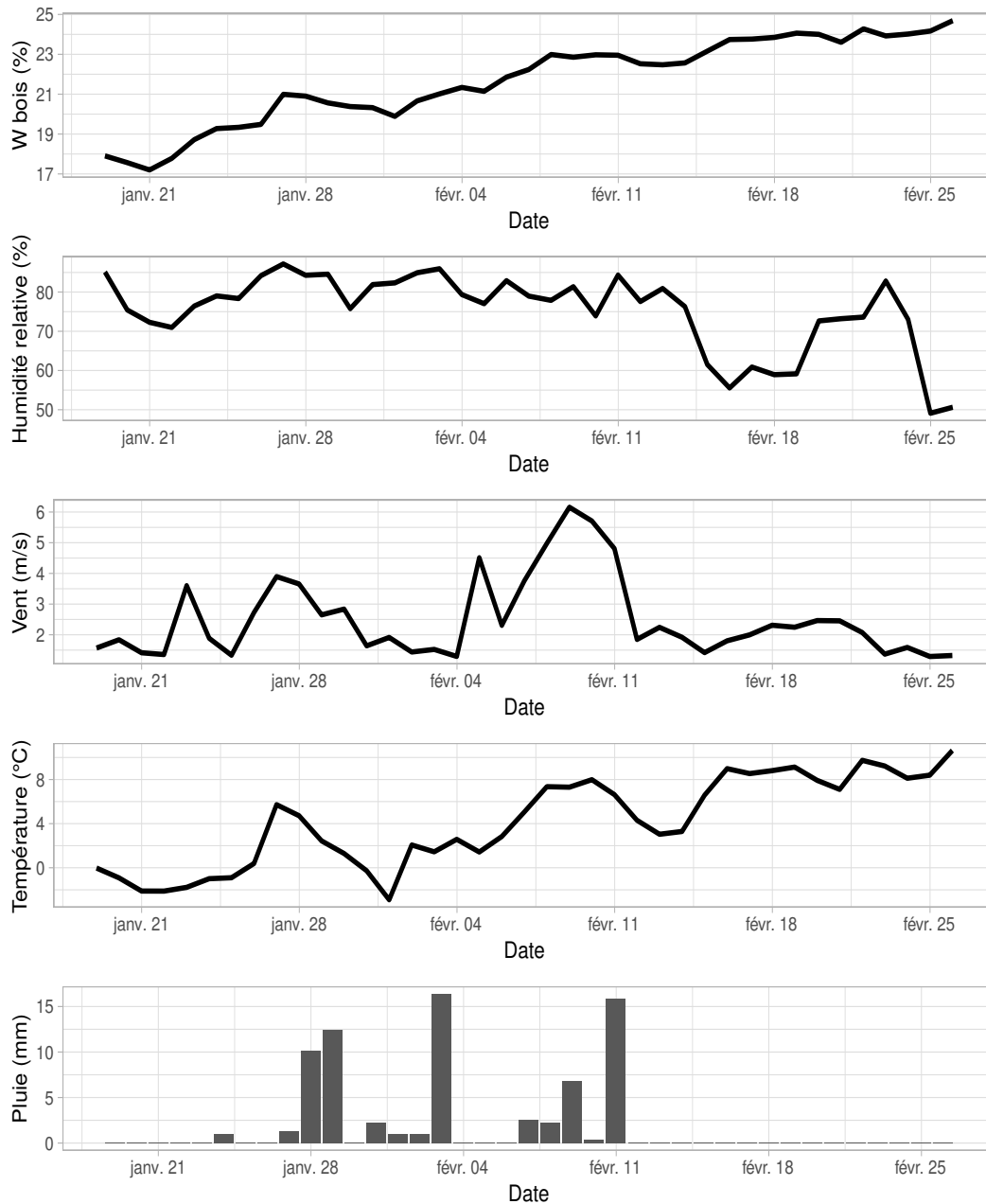


FIGURE 8.13 – Comparaison de la reprise d'humidité du bois avec différents paramètres météorologiques.

Ces figures indiquent que pour des HR de l'ordre de 80% et une température entre 0 °C et 6 °C, l'humidité d'équilibre du bois est d'environ 18%. Une humidité du bois de 25% peut être atteinte dans la même gamme de températures, mais pour une humidité

relative de l'air au delà de 90%. Sur la figure 8.13, le deuxième graphique montre que des valeurs d'humidité relative au dessus de 85% ne sont que très rarement atteintes. Même si elles étaient plus régulièrement atteintes, selon l'abaque et l'hystérèse, cela ne se traduirait que par des taux d'humidité du bois d'environ 20%.

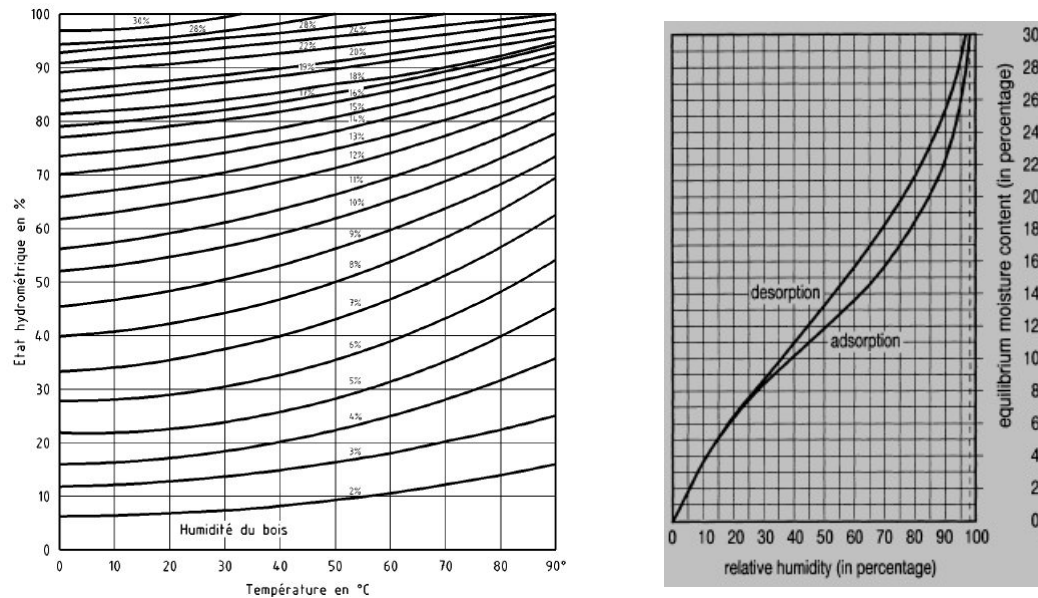


FIGURE 8.14 – Abaque d'équilibre hygroscopique des résineux selon la norme EN 1995 1-1 (à gauche), Hystéresis du *Picea Abies* à 5,5 ° C (à droite).

Il est donc peu probable qu'un taux d'humidité du bois de 25% ne corresponde, en l'occurrence, à son EMC. L'humidité relative de l'air n'est en conséquence pas le seul paramètre responsable de cette reprise d'humidité. Pour mettre en évidence le fait que l'humidité relative ne joue pas un rôle majeur dans la reprise d'humidité montrée dans la figure 8.13, une analyse en composantes principales (acp) entre humidité du bois, température et humidité relative de l'air a été réalisée. La pluie et le vent ne sont pas pris en compte dans cette acp. Ces composantes interviennent de façon occasionnelle et ne se prête pas à ce genre d'analyse. L'acp, outre ses qualités d'analyse de données en tenant compte de leur caractère multidimensionnel, présente des qualité graphique pour l'expression du degré de dépendance entre les variables. La figure 8.15 montre le cercle de corrélation de l'acp et rend compte d'une très faible corrélation entre l'humidité relative de l'air et l'humidité du bois. Il semble par contre que l'humidité du bois soit extrêmement corrélée avec la température.

Le dernier graphique de la figure 8.13 présente la pluviosité cumulée par jour. Il montre des chutes de pluie relativement importantes qui peuvent potentiellement être responsables d'une augmentation d'humidité du bois au delà de son EMC. Les lisses hautes peuvent être particulièrement sensibles à ce facteur étant donné leur exposition à la pluie et leur disposition horizontale qui favorise une stagnation de l'eau et donc

une adsorption. La comparaison des taux d'humidité des lisses hautes et des montants verticaux renforce cette hypothèse. Sur l'ensemble des parois, les taux d'humidité des LH sont toujours supérieurs à ceux des MV. La disposition verticale des MV est clairement moins propice à l'adsorption de l'eau.

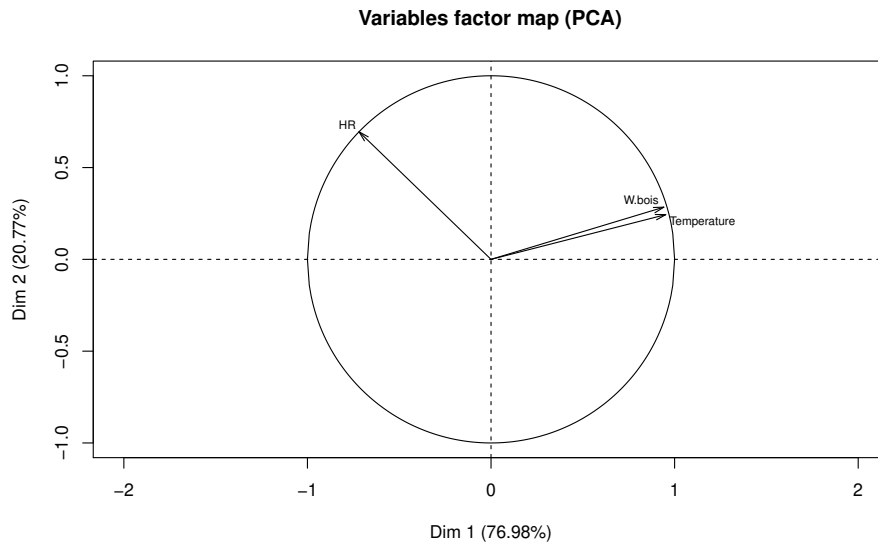


FIGURE 8.15 – Analyse en composante principale entre humidité du bois, la température et l'humidité relative de l'air.

Quatrième partie
Discussion générale

Discussion générale

La revue de la littérature scientifique effectuée à l'amorce de ce travail a fait apparaître une quasi-absence de références à propos du sujet traité, soit la cinétique des échanges d'eau entre des bois de structure exposés aux intempéries et l'air. Ce qu'il est possible de trouver sur ce sujet s'appuie sur des conditions expérimentales clairement distinctes de celles retenues pour ce travail. Il est en conséquence difficile de se livrer à une analyse critique de nos résultats sur base de la littérature. Il n'est possible que de les présenter, les caractériser et les interpréter.

Les expériences et observations effectuées ont fourni un très vaste ensemble de données, qui a dû faire l'objet de tris, recalages et rangements préalables. La très grande quantité d'informations apportées par ces données non seulement permet de répondre aux questions initialement posées, mais ouvre des portes à de nombreuses nouvelles voies d'investigations.

En ce qui concerne les questions initialement posées, les résultats montrent que le taux d'humidité d'un bois de structure exposé aux intempéries peut augmenter d'environ 10% en un peu moins de deux mois pour atteindre des valeurs de l'ordre de 23%, donc des valeurs critiques en termes de vulnérabilité aux dégradations biologiques. En partant d'un taux d'humidité de 13%, le seuil des 20% peut être atteint en six semaines. Faut-il en conclure, pour répondre à la question centrale qui a motivé ce travail, qu'une structure en bois abritée moins de 6 semaines après la pose sera systématiquement à l'abri d'altérations biologiques ? Ce serait peut-être un peu hâtif pour deux raisons :

1. L'humidité initiale pourrait être déterminante. Si elle avait été de 15% plutôt que 13, à quelle vitesse le seuil des 20% aurait-il été atteint dans les mêmes conditions ? Les poses successives de plusieurs portiques n'ont malheureusement pas permis de répondre à cette question.
2. Des conditions météorologiques différentes, et notamment une pluviosité plus abondante, pourraient logiquement accélérer le processus de reprise d'humidité.

En ce qui concerne les nouvelles voies d'investigations, elles sont suggérées par les incertitudes qui subsistent à l'issue de ce travail.

- D'abord les mesures effectuées sur chantier n'ont porté que sur des structures préfabriquées, qui ont révélé que le bois pouvait généralement être qualifié de sec à la pose. Il n'est pas formellement exclu que des structures fabriquées sur chantier puissent faire mentir cette affirmation. Néanmoins, il faut souligner :
 - ◆ que la préfabrication est une tendance lourde dans la construction bois, ce qui donne tout leur poids aux observations réalisées ;
 - ◆ que les taux d'humidité mesurés sur des bois stockés en entrepôt avant la pose étaient relativement bas, ce qui réduit la probabilité de mesurer des taux trop élevés sur des structures fabriquées sur chantier.

À propos de ce dernier point, il est évident que c'est alors des conditions de stockage que dépendra l'humidité des bois à la pose. Mais si le bois est mal protégé, c'est bien la cinétique de reprise, que nous avons étudiée, qu'il faudra connaître.

- Ensuite, une incertitude subsiste quant à la précision des mesures du taux d'humidité du bois des caissons expérimentaux, notamment pour les deux raisons suivantes :
 1. Le passage de la résistivité à la teneur en eau par la formule 7.9 s'est appuyé sur les constantes Q et H du sapin rouge du Nord, non de l'épicéa.
 2. La température du bois a été considérée comme étant celle de l'air.

Ces deux éléments sont susceptibles d'introduire un biais dont il n'a pas été possible d'évaluer l'importance. Il serait dès lors judicieux de procéder à une vérification de ces mesures pour juger de la pertinence d'une détermination des constantes Q et H pour *Picea abies* et d'une mesure directe de la température du bois.

- À l'échelle journalière, les variations en sens opposés de l'humidité du bois et de l'humidité relative de l'air constituent un paradoxe dont il n'a pas été possible de déterminer formellement l'origine. Le synchronisme et la concordance des variations de température et d'humidité du bois ont conduit à suspecter une hypersensibilité des capteurs à la température, suspicion que renforce une amplitude inattendue, plus de 2%, des variations quotidiennes des taux d'humidité. Toute poursuite d'un monitoring de l'humidité du bois fondé sur cette technique de saisie des données sera inévitablement subordonnée à une vérification de cette hypothèse.
- Une autre incertitude concerne la période d'expérimentation. Celle testée ici a été limitée à cinq mois, dans des conditions hivernales puis printanières. Les résultats ont montré que le taux d'humidité des bois pouvait atteindre un seuil critique, au-delà de 20%, mais à une vitesse et pour une durée qui sont très vraisemblablement

fonction des conditions météorologiques. Inévitablement limité dans le temps, ce travail n'a certainement pas permis d'identifier toutes les périodes « à risques ». Il serait intéressant de le poursuivre pour boucler un cycle de saisons, voire de le poursuivre au-delà pour accroître la probabilité de rencontrer des événements météorologiques particuliers capables d'influencer les variations d'humidité du bois de manière significative.

La notion d'EMC, et par là les hystérèses de sorption/désorption se révèlent inadaptées pour l'évaluation du taux d'humidité de bois exposés aux intempéries, notamment parce qu'en conditions extérieures, l'humidité relative de l'air n'est plus le seul paramètre conditionnant le taux d'humidité du bois. La pluviosité en particulier semble avoir de ce point de vue une importance déterminante.

Le seuil des 20% d'humidité est considéré comme critique par les dangers auxquels il expose le bois et par le fait que la STS 31 l'indique comme le maximum recommandable à la pose, les deux raisons étant bien sûr liées. Mais il est permis de s'interroger sur la pertinence de cette valeur limite. En réalité, la littérature ne fournit pas d'informations précises sur le taux d'humidité d'équilibre à l'usage des bois de structure, bien qu'elle le situe généralement aux environs proches de 15%. Il faut néanmoins souligner que les évolutions récentes en matière de conception et de fabrication de parois, particulièrement en ce qui concerne l'étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau, pourraient amener le taux d'humidité d'équilibre à l'usage des bois de structure à des taux plus faibles encore. En conséquence, un bois posé à 20% d'humidité comme le tolère la STS 31 devient susceptible de perdre une grande quantité d'eau une fois mis en œuvre. Cette quantité d'eau, en se retrouvant piégée dans la paroi étanche, pourrait être source d'importants problèmes. Ce travail a révélé que le taux d'humidité des bois de structure lors de la pose était sans doute beaucoup plus proche du taux d'équilibre à l'usage que les 20% autorisés par la STS 31, ce que la tendance à la préfabrication ne fera que confirmer. N'est-il pas temps de mener les investigations qui permettront de dissiper le flou relatif à l'humidité d'équilibre à l'usage des bois de structure, et, le cas échéant, de recommander un taux maximum inférieur à 20%, assorti d'une mise hors d'eau ou, à tout le moins, d'une protection très rapide après la pose ?

Cinquième partie

Conclusion

Conclusion

C'est notamment par son affinité vis-à-vis de l'eau que le bois se distingue des autres matériaux de construction. Une grande part des pathologies du bois dans le bâtiment est liée à des échanges d'eau mal contrôlés entre le bois et son environnement. Il arrive notamment fréquemment qu'un laps de temps important sépare la mise en œuvre d'une structure bois de sa mise hors d'eau, laissant ainsi le bois exposé aux intempéries. Comment se produisent alors les échanges d'humidité entre le bois et son environnement ? À partir de quand et dans quelle mesure cette exposition aux intempéries constitue-t-elle un danger pour l'ouvrage en bois ?

L'objectif de ce travail était d'apporter de premiers éléments de réponse à ces questions en analysant la cinétique de variation des taux d'humidité du bois de structure exposé aux intempéries.

Il importait de savoir, dans un premier temps, si le bois de structure était généralement posé sec ou humide, le seuil des 20% maximum recommandé par la STS 31 étant la référence choisie. Dans le premier cas, le bois risquerait de s'humidifier et le travail devrait se focaliser sur la cinétique de reprise d'humidité. Dans le second cas, il faudrait que le bois sèche et le travail se focaliserait sur la cinétique de séchage en milieu extérieur.

Pour fixer les idées à ce propos, des mesures sur chantier ont été préalablement effectuées. Elles ont révélé que les taux d'humidité des bois de structure une semaine ou deux après la mise en œuvre étaient compris entre 11,4 et 15,2%, taux largement inférieurs à ceux recommandés par la STS 31. Un tel degré de siccité s'explique par le fait que les mesures ont porté sur des éléments de parois préfabriquées. La préfabrication étant une tendance lourde de la construction bois, ces résultats ont été considérés comme représentatifs, et la suite du travail s'est orientée vers la cinétique de reprise d'humidité.

Pour étudier la cinétique de reprise d'humidité des bois de structure en conditions extérieures, des caissons expérimentaux en ossature bois ont été installés. Des capteurs disposés sur les éléments verticaux et horizontaux des caissons ont permis un suivi temporel des taux d'humidité. De décembre à avril, chaque mois, deux types de caissons, un ouvert et un fermé, ont été posés puis étudiés jusqu'au mois de mai. Parallèlement aux données d'humidité, des données météorologiques ont été collectées puis mises en correspondance avec les premières. De très nombreuses informations ont ainsi été obtenues

quant au comportement hygroscopique de bois de structure en conditions extérieures.

Paradoxalement, à l'échelle journalière, le taux d'humidité du bois n'augmente pas avec l'humidité relative de l'air, mais varie en sens inverse, en accompagnant étroitement les variations de température. Si elle ne procède pas d'un vice de mesure, en l'occurrence une hypersensibilité des capteurs à la température, ce qui reste à prouver, cette information est troublante. Elle pourrait révéler l'importance de l'humidité absolue, donc de la quantité d'eau réellement disponible dans l'air. Elle pourrait aussi être partiellement expliquée par un effet de succion que provoquerait une différence de concentration en vapeur d'eau entre le bois et l'air. À elle seule, cette information, par ses implications sur la connaissance et la maîtrise du comportement hygroscopique du bois, justifierait la poursuite de ce travail, une poursuite à caractère méthodologique d'abord, physique ensuite, la littérature semblant muette à ce propos.

Les installations successives, mois après mois, de caissons avaient pour objectif la mise en évidence d'une éventuelle influence d'événements climatiques inhabituels sur la cinétique de reprise d'humidité des bois. Les comportements des caissons se sont toutefois révélés assez homogènes, ce qui autoriserait un allègement considérable des dispositifs expérimentaux, si une suite à ce travail était envisagée.

La tendance générale des variations du taux d'humidité des bois est assez cohérente, avec une hausse hivernale suivie d'une baisse progressive durant le printemps. Mais la question portait essentiellement sur la cinétique et les amplitudes des variations. Les résultats obtenus fournissent sur ces points des résultats intéressants. Un bois de structure posé en hiver à un taux d'humidité proche de 13% peut, s'il n'est pas abrité, atteindre 23% d'humidité en moins de deux mois, et dépasser le seuil des 20% en moins de 6 semaines. Est-ce à dire que ce délai de 6 semaines est celui à respecter pour abriter une structure en bois et éviter ainsi tout problème lié à l'humidité ? Non sans doute, car il est vraisemblable que des conditions météorologiques particulièrement défavorables puissent accélérer encore le processus de reprise d'humidité. Mais l'ordre de grandeur est malgré tout donné. Le danger est bien réel, et le temps de réaction, pour l'éviter, se mesure en semaines et non en mois. La simple fermeture des caissons avec un panneau OSB et un panneau de fibres permet toutefois de maintenir les taux d'humidité du bois des montant verticaux en-deçà des seuils critiques.

Il faut souligner que les taux d'humidité atteints dépassent les taux d'humidité à l'équilibre qu'indiquent les hystérèses de sorption/désorption. Cela signifie que l'humidité relative de l'air n'est pas finalement le facteur déterminant de la reprise. La pluviosité notamment paraît exercer une influence majeure sur les variations des taux d'humidité du bois. Ceci est particulièrement vrai pour les éléments horizontaux, sur lesquels le risque de stagnation de l'eau est élevé.

À l'entame de ce travail, la mesure du taux d'humidité de bois de structure qui venaient d'être mis en œuvre a montré que les bois étaient secs et a donc orienté la

démarche vers l'étude de la cinétique de reprise d'humidité. Mais le fait que les taux d'humidité des bois exposés aux intempéries aient – assez rapidement – atteint des valeurs nettement supérieures au seuil de 20% permet en réalité de répondre aux deux questions initialement posées, c'est-à-dire :

1. À quelle vitesse et dans quelle mesure un bois de structure sec exposé aux intempéries peut-il reprendre de l'humidité ?
2. À quelle vitesse et dans quelle mesure un bois de structure humide exposé aux intempéries peut-il sécher ?

Un bois qui a 23% d'humidité mi-février peut redescendre sous les 20% début avril et autour de 16% un mois plus tard.

En guise de point final à ce document, une brève réflexion relative à la place que le travail effectué peut occuper dans le développement de la connaissance et de l'art de construire en bois paraît légitime. Ce travail est en réalité l'amorce d'une démarche qui dépasse la tentative de réponse aux questions initiales, une démarche aux implications essentielles qui aurait pour objectif global de permettre un monitoring du taux d'humidité des bois mis en œuvre. Le fait de se situer à l'extrême amont de cette démarche implique qu'aucune des mesures effectuées ici n'a encore été reproduite. Les conclusions que peuvent inspirer les résultats doivent dès lors être regardées comme des hypothèses, qu'il serait souhaitable de vérifier. Dans cette optique, il faudrait affiner la technique de mesure, allonger les périodes d'observations, multiplier les essences, les débits, et surtout les types de parois ou toitures, voire d'éléments de menuiseries à mesurer, etc. La nécessité de mettre le bois en œuvre à un taux d'humidité proche de son taux d'humidité d'équilibre à l'usage est considérée comme une des règles essentielles de l'usage du bois dans la construction. Mais l'application de cette règle est bien sûr subordonnée à la connaissance des taux d'humidité d'équilibre à l'usage, qui elle-même ne peut procéder que d'un monitoring. C'est dans cette voie que ce travail s'est engagé. C'est dans cette voie qu'il prend sans doute tout son sens et qu'il révèle son véritable intérêt.

Bibliographie

- Agence Qualité Construction (2016). *SYCODÉS Pathologie 2016*. Paris : Agence Qualité Construction.
- Agence Qualité Construction (2018). *OBSERVATOIRE de la Qualité de la Construction Édition 2018*. Paris : Agence Qualité Construction.
- Bureau de normalisation (NBN) (2002a). *Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois*. NBN EN 335, Juin2013.
- Bureau de normalisation (NBN) (2002b). *Teneur en humidité d'une pièce de bois - Partie 2 : Estimation par méthode électrique par résistance*. NBN EN 13183-2, Juin2002.
- Bureau de normalisation (NBN) (2005). *Eurocode 5 - Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités - Règles communes et règles pour les bâtiments*. NF EN 1995 1-1, Juillet 2005.
- Choong, E. & Skaar, C. (1969). Separating internal and external resistance to moisture removal in wood drying. *Wood Sci*, 1(4), 200–202.
- Christensen, G. & Hergt, H. (1969). Effect of previous history on kinetics of sorption by wood cell walls. *Journal of Polymer Science Part A-1 : Polymer Chemistry*, 7(8), 2427–2430.
- Christensen, G. & Kelsey, K. E. (1959). Die geschwindigkeit der wasserdampfsorption durch holz. *European Journal of Wood and Wood Products*, 17(5), 178–188.
- Droin, A., Taverdet, J., & Vergnaud, J. (1988). Modeling the kinetics of moisture adsorption by wood. *Wood Science and Technology*, 22(1), 11–20.
- Droin-Josserand, A., Taverdet, J., & Vergnaud, J. (1988). Modelling the absorption and desorption of moisture by wood in an atmosphere of constant and programmed relative humidity. *Wood science and technology*, 22(4), 299–310.

- Drain-Josserand, A., Taverdet, J., & Vergnaud, J. (1989). Modelling the process of moisture absorption in three dimensions by wood samples of various shapes : cubic, parallelepipedic. *Wood Science and Technology*, 23(3), 259–271.
- El Kouali, M. & Vergnaud, J. (1991). Modeling the process of absorption and desorption of water above and below the fiber saturation point. *Wood Science and Technology*, 25(5), 327–339.
- Forsén, H., Tarvainen, V., et al. (2000). *Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters*. Technical Research Centre of Finland Espoo,, Finland.
- Frère, H. (2019). Etat de la construction bois en belgique 2017-2018. *Hout Info Bois, Enquête*.
- GANN (2004). *Gann Hydromette HT 85 T, mode d'emploi*.
- GANN (2005). *La qualité porte un nom*.
- Gérard, J., Guibal, D., Cerre, J.-C., & Paradis, S. (2016). *Atlas des bois tropicaux : Caractéristiques technologiques et utilisations*. Editions Quae.
- Hearle, J. W. & Morton, W. E. (2008). *Physical properties of textile fibres*. Elsevier.
- Hoadley, R. B. (1967). Weather, water and wood. *Forestry series (University of Massachusetts (Amherst campus). Cooperative Extension Service)*. 8p.
- Hoadley, R. B. (2000). *Understanding wood : a craftsman's guide to wood technology*. Taunton press.
- Institut Royal Météorologique (2018). *Bilan climatologique annuel, 2018*. Technical report, IRM.
- Iweins d'Eeckhoutte, M. (2018). Comportement hygrothermique des constructions bois : cas des parois et des planchers sur vides ventilés. Master's thesis, ECAM Brussels Engineering School, Bruxelles.
- Keey, R. B., Langrish, T. A., & Walker, J. C. (2012). *Kiln-drying of lumber*. Springer Science & Business Media.
- Kelsey, K. E. (1957). The sorption of water vapor by wood. *Aust J Appl Sci*, 8, 42–54.
- Kollmann, F. (1951). Technologie des holzes und der holzwerkstoffe zweiter band : Holzschutz, oberflächenbehandlung, trocknung und dämpfen, veredelung, holzwerkstoffe, spanabhebende und spanlose holzbearbeitung holzverbindungen.

- Kollmann, F. F., Kuenzi, E. W., & Stamm, A. J. (2012). *Principles of Wood Science and Technology : Solid Wood*. Springer Science & Business Media.
- Kouchade, A. C. (2004). *Mass diffusivity of wood determined by inverse method from electrical resistance measurement in unsteady state*. PhD thesis.
- Mahieu, E. (2018). *Conception hygrothermique des toitures plates et cas de pathologie*. Paper presented at the Journée d'étude du CSTC - Conception hygrothermique des parois : partie 1, Bruxelles.
- Merakeb, S. (2006). *Modélisation des structures en bois en environnement variable*. PhD thesis, University of Limoges Limoges.
- Merakeb, S., Dubois, F., & Petit, C. (2009). Modeling of the sorption hysteresis for wood. *Wood science and technology*, 43(7-8), 575.
- Michaux, B. & Charron, S. (2018). Division « enveloppe du bâtiment et menuiserie » du centre scientifique et technique de la construction (cstc), communication au comité technique menuiserie du cstc.
- Organisation météorologique mondiale (2010). Mesures de variables météorologiques. *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologique*, 8, 133–136.
- Ressel, J. (2006). Fundamentals of wood moisture content measurement. *Course notes COST E53 Training School "Methods for measuring of moisture content and assessment of timber quality". BFH. Hamburg*.
- Rijsdijk, J. F. & Laming, P. B. (1994). *Physical and related properties of 145 timbers : information for practice*. Springer Science & Business Media.
- Shubin, G. (1990). Sushka i templovaia orbabotka drevesiny (drying and heat treatment of wood). *Lesnaia Promyshlenmust, Moskva*.
- Siau, J. et al. (1987). An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood. *Wood science and technology*, 21(3), 249–256.
- Siau, J. F. (1971). Flow in wood. *Syracuse wood science series*, 1.
- Simpson, W. T. (1999). Drying and control of moisture content and dimensional changes. *Wood handbook : wood as an engineering material. Madison, WI : USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL ; GTR-113 : Pages 12.1-12.20*, 113.
- Skaar, C. (2012). *Wood-water relations*. Springer Science & Business Media.

- Smith, H. H., Ellwood, E. L., Erickson, R. W., et al. (1959). Survey of the moisture content of wood in use in california.
- Sonderegger, W., Vecellio, M., Zwicker, P., & Niemz, P. (2011). Combined bound water and water vapour diffusion of norway spruce and european beech in and between the principal anatomical directions. *Holzforschung*, 65(6), 819–828.
- Spalt, H. (1958). Water vapor sorption by wood. *Forest Prod J*, 8, 288–295.
- SPF Économie, P.M.E., Classes moyennes et Énergie (2008a). Spécifications techniques unifiées sts 04 bois et panneaux à base de bois sts 04.3 traitements du bois.
- SPF Économie, P.M.E., Classes moyennes et Énergie (2008b). Spécifications techniques unifiées sts 31 charpenterie.
- Stamm, A. J. (1927). The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content. *Industrial & Engineering Chemistry*, 19(9), 1021–1025.
- Stamm, A. J. (1929). The fiber-saturation point of wood as obtained from electrical conductivity measurements. *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, 1(2), 94–97.
- Stamm, A. J. et al. (1964). Wood and cellulose science. *Wood and cellulose science*.
- Tsoumis, G. (1960). Untersuchungen über die schwankungen des feuchtigkeitsgehaltes von lufttrockenem holz. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 18(11), 415–422.
- Vinckbooms, M. (2018). Prototype de monitoring connecté d'une structure bois. Master's thesis, Haute École Robert Schuman, Arlon.
- Walker, J. C. (2006). *Primary wood processing : principles and practice*. Springer Science & Business Media.
- Zauer, M., Kretschmar, J., Großmann, L., Pfriem, A., & Wagenführ, A. (2014). Analysis of the pore-size distribution and fiber saturation point of native and thermally modified wood using differential scanning calorimetry. *Wood science and technology*, 48(1), 177–193.

ANNEXES

A | Mesures sur chantier

A.1 Taux d'humidité sur chantiers

TABLE A.1.1 – Mesures d'humidité du bois par type de pièces prises sur un chantier de l'entreprise Chimsco

| Entreprise Chimsco | | |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|
| Lisses basses (%) | Lisses hautes (%) | Montants verticaux (%) |
| 13,9 | 12,6 | 11,3 |
| 14,9 | 15,1 | 10,9 |
| 14,6 | 14,4 | 11,8 |
| | 13,9 | 12 |
| | 13,8 | 10,9 |

TABLE A.1.2 – Mesures d'humidité du bois par type de pièces prises sur un chantier de l'entreprise Synergie Bois

| Entreprise Synergie Bois | | |
|---------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Lisses basses (%) | Lisses hautes (%) | Montants verticaux (%) |
| 12,8 | 14 | 13,1 |
| 12,7 | 13,5 | 12,6 |
| 12,8 | 13,2 | 14,1 |
| | 13,4 | 12,8 |
| | 13,2 | 12,6 |

TABLE A.1.3 – Mesures d’humidité du bois par type de pièces prises sur un chantier de l’entreprise Paquet

| Entreprise Paquet | | |
|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| Lisses basses (%) | Lisses hautes (%) | Montants verticaux (%) |
| 13,4 | 15,2 | 12,4 |
| 14,9 | 12,5 | 11,4 |
| 14,7 | 12 | 12,7 |
| 13,2 | 11,9 | 12,1 |
| 16,3 | 12,5 | 12 |

TABLE A.1.4 – Mesures d’humidité du bois par type de pièces prises sur un chantier de l’entreprise Batisomme

| Entreprise Batisomme | | |
|-----------------------------|----------------------|---------------------------|
| Lisses basses (%) | Lisses hautes (%) | Montants verticaux (%) |
| 13,9 | 14,3 | 15,7 |
| 14,3 | 15,3 | 16,4 |
| 15,2 | 13,4 | 12,8 |
| 14,3 | 15,3 | 13,4 |
| 13,2 | 15 | 17,5 |

A.2 Autres taux d'humidité sur chantiers

TABLE A.2.5 – Mesures d'humidité du bois supplémentaires prises sur le chantier de l'entreprise Chimsco

| Entreprise Chimsco | |
|---------------------------|------|
| Fermettes industrialisées | (%) |
| | 15,1 |
| | 15,5 |
| | 15,4 |
| | 16,6 |
| | 15,6 |

TABLE A.2.6 – Mesures d'humidité du bois supplémentaires prises sur le chantier de l'entreprise Paquet

| Entreprise Paquet | | |
|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| Charpentes | Bois fraîchement arrivés | Bois entreposés 1 mois |
| (%) | (%) | (%) |
| 12,2 | 20 | 15,5 |
| 12,1 | 23,4 | 12,8 |
| 11,6 | 19,4 | 11,9 |
| 12,3 | 22,3 | 11,8 |
| 12,8 | 19,7 | 11,8 |

TABLE A.2.7 – Mesures supplémentaires prises sur le chantier de l'entreprise Batisomme

| Entreprise Batisomme | | |
|---|---|--|
| Pièces de bois non mis en œuvre entreposées sur chantier (%) | Bois entreposé 2 jours à l'intérieur (%) | Bois entreposé 2 semaines à l'intérieur (%) |
| 16,7 | 13,4 | 12,1 |
| 15,7 | 13,3 | |
| 15,1 | | |
| 14,8 | | |
| 15,8 | | |

B | Variation des taux d'humidité des caissons expérimentaux

B.1 Caissons décembre (1218)

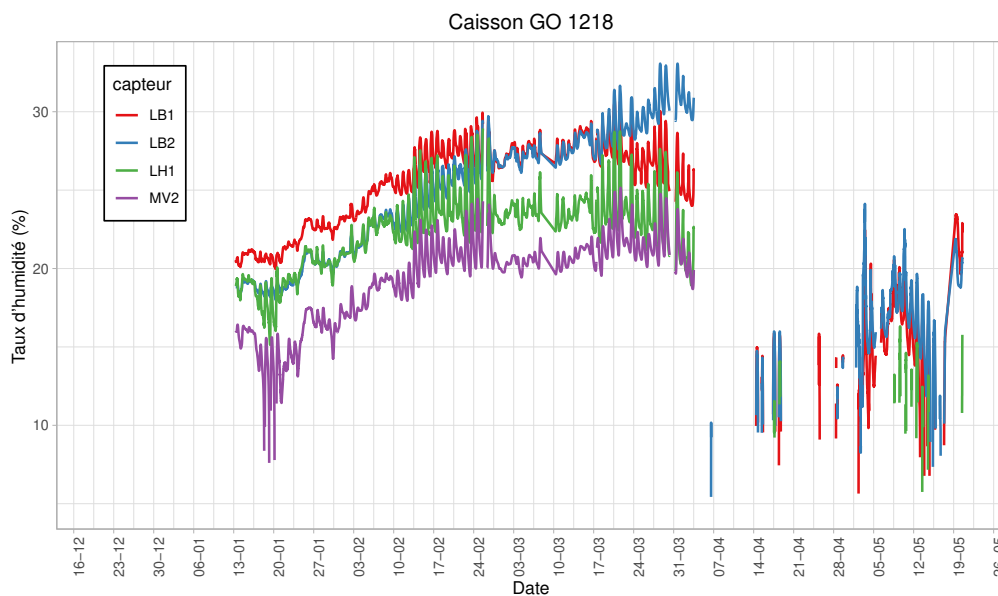


FIGURE B.1.1 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 1218.

B.2 Caissons janvier (0119)

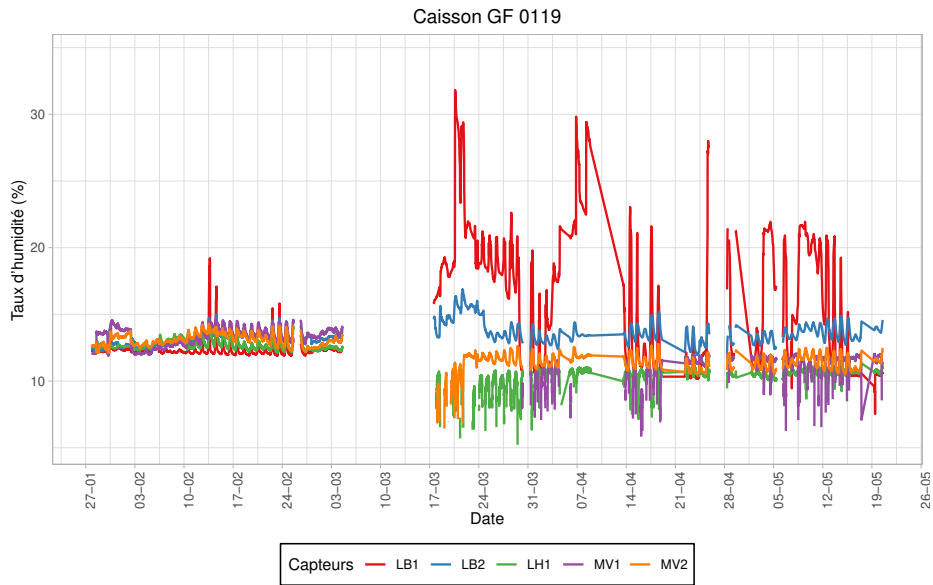


FIGURE B.2.2 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GF 0119.

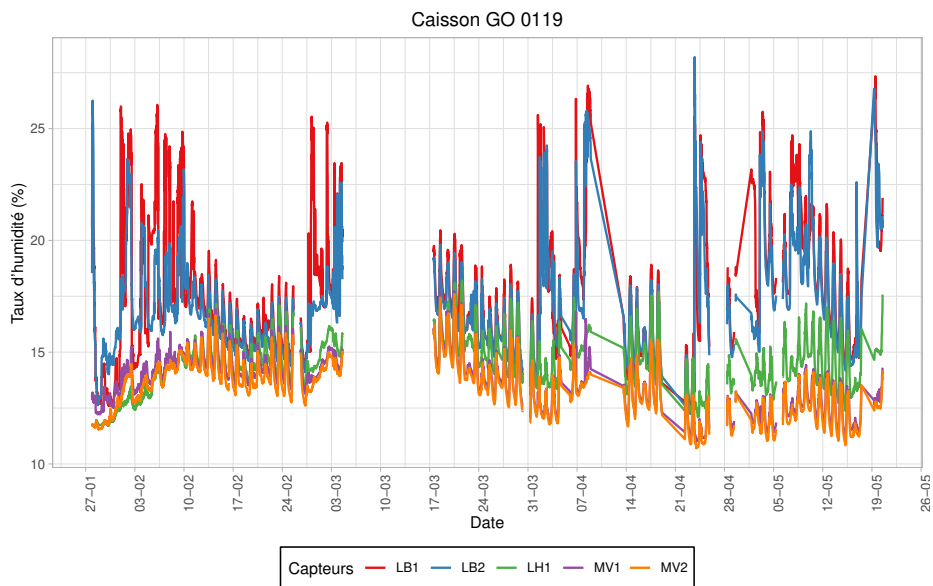


FIGURE B.2.3 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 0119.

B.3 Caissons février (0219)

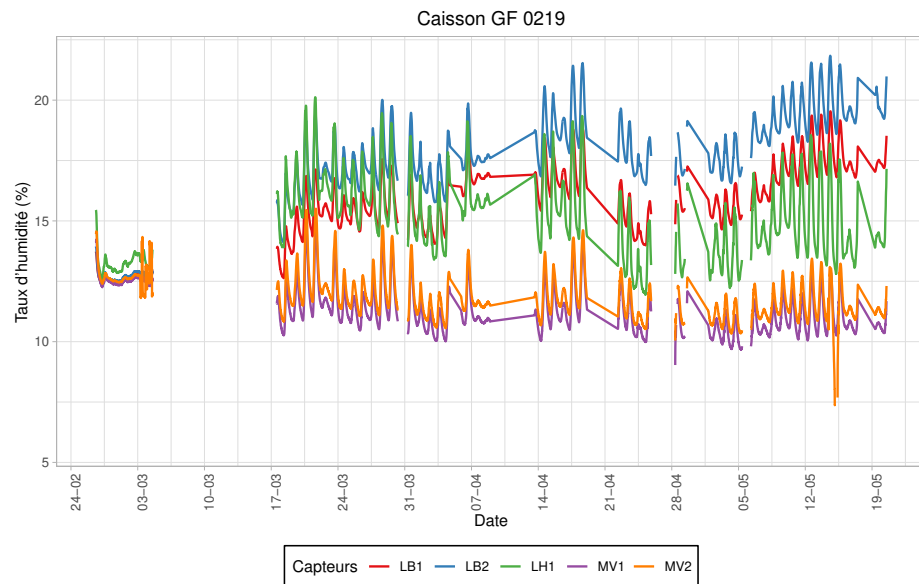


FIGURE B.3.4 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GF 0219.

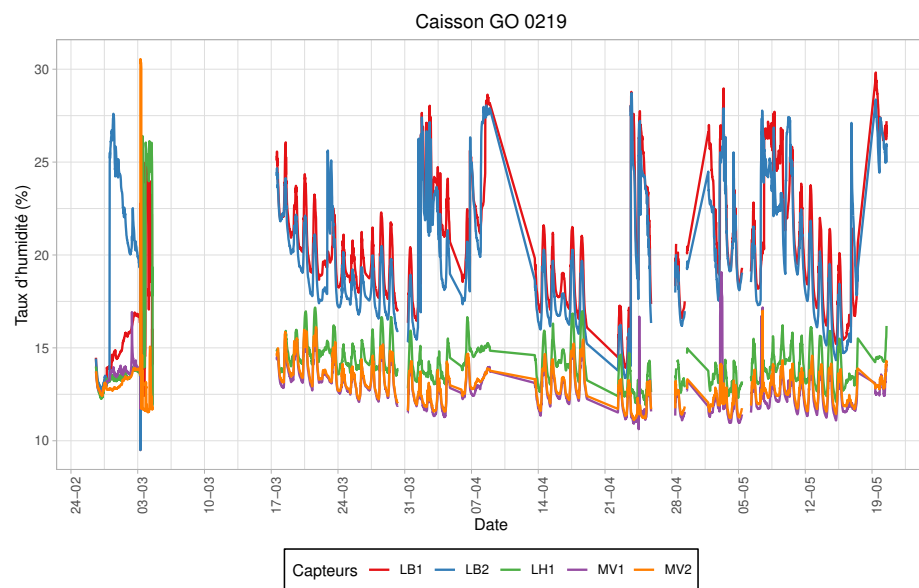


FIGURE B.3.5 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 0219.

B.4 Caissons mars (0319)

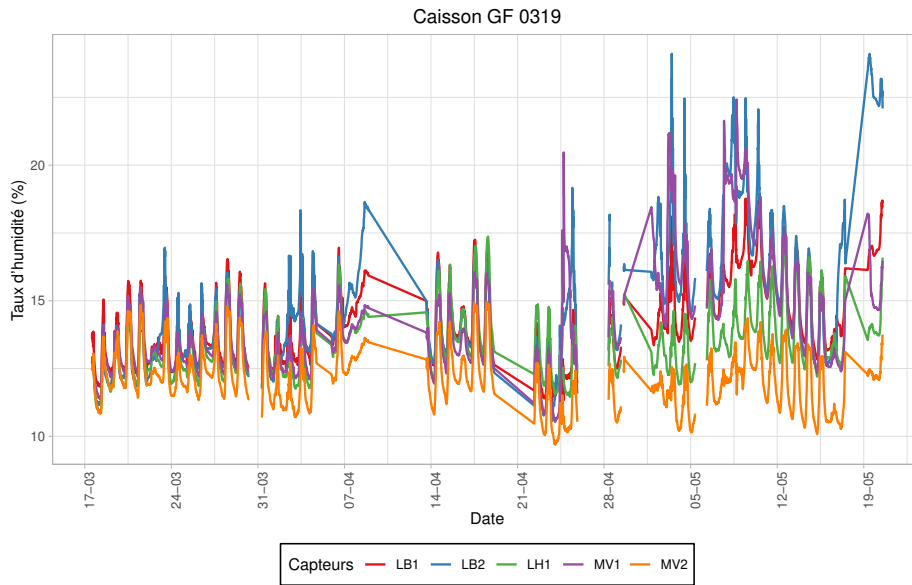


FIGURE B.4.6 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GF 0319.

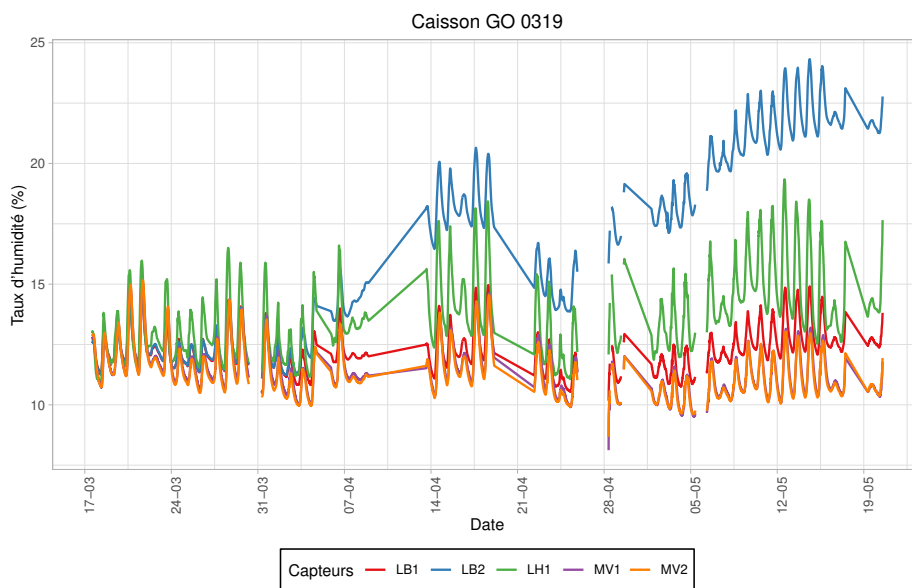


FIGURE B.4.7 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 0319.

B.5 Caissons avril (0419)

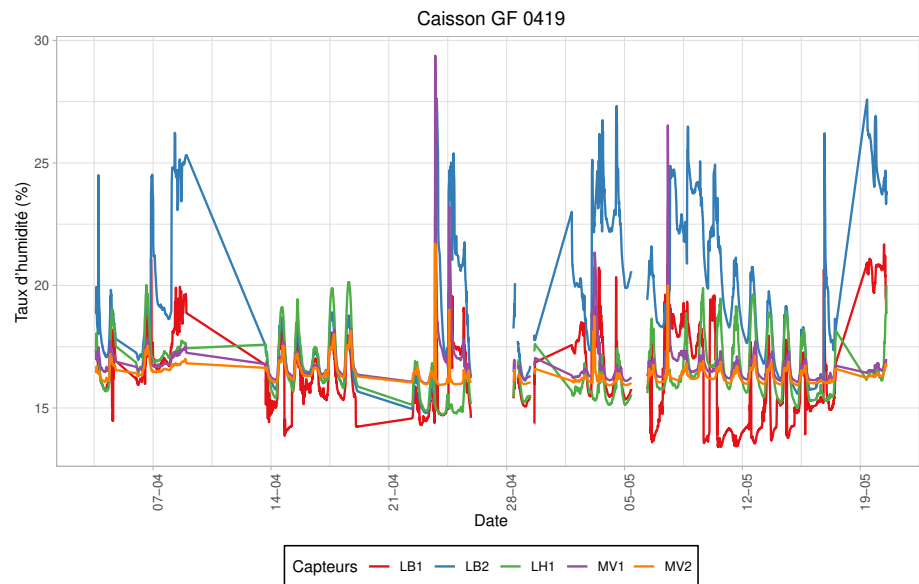


FIGURE B.5.8 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GF 0419.

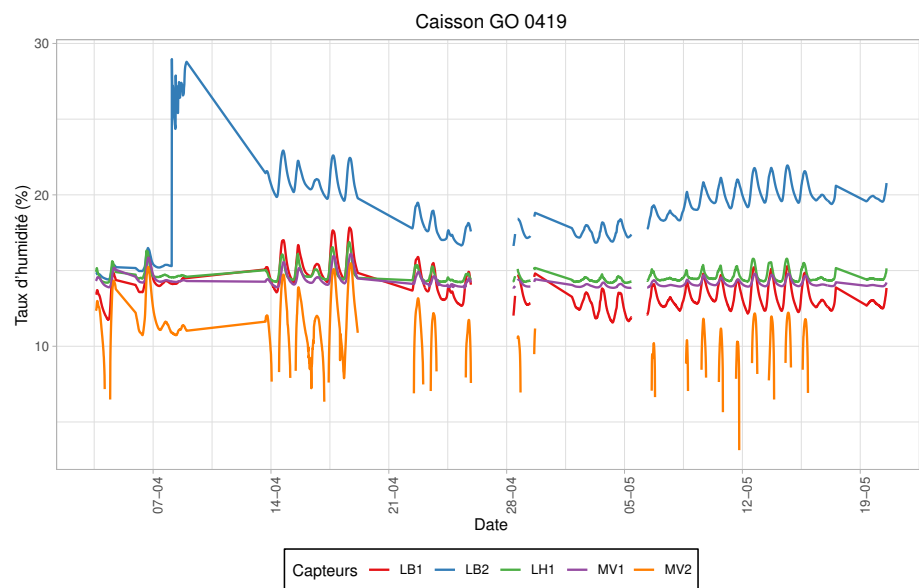


FIGURE B.5.9 – Variation du taux d'humidité des bois du caisson GO 0419.

C | Données météorologiques

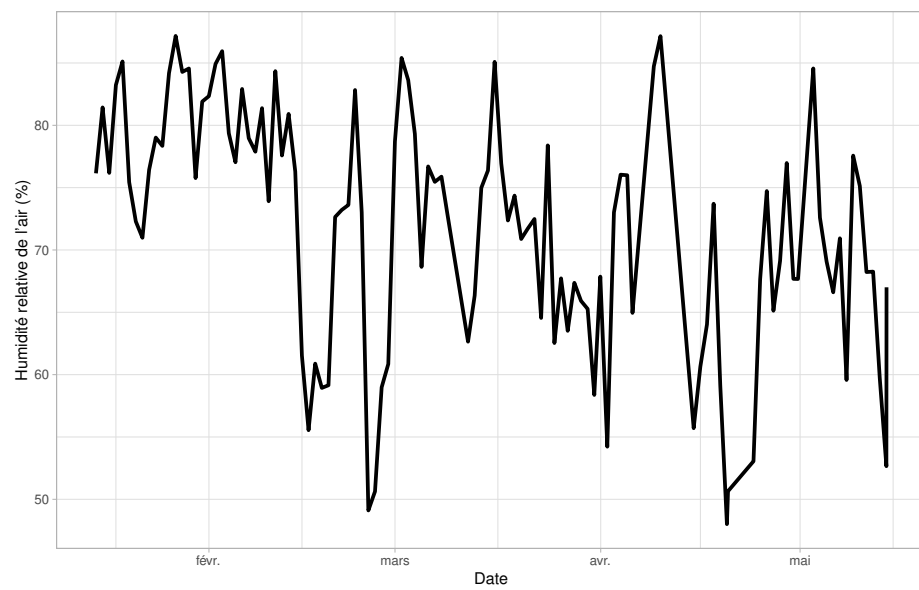


FIGURE C.0.1 – Variation des moyennes journalières de l'humidité relative de l'air durant toute la période d'expérimentation.

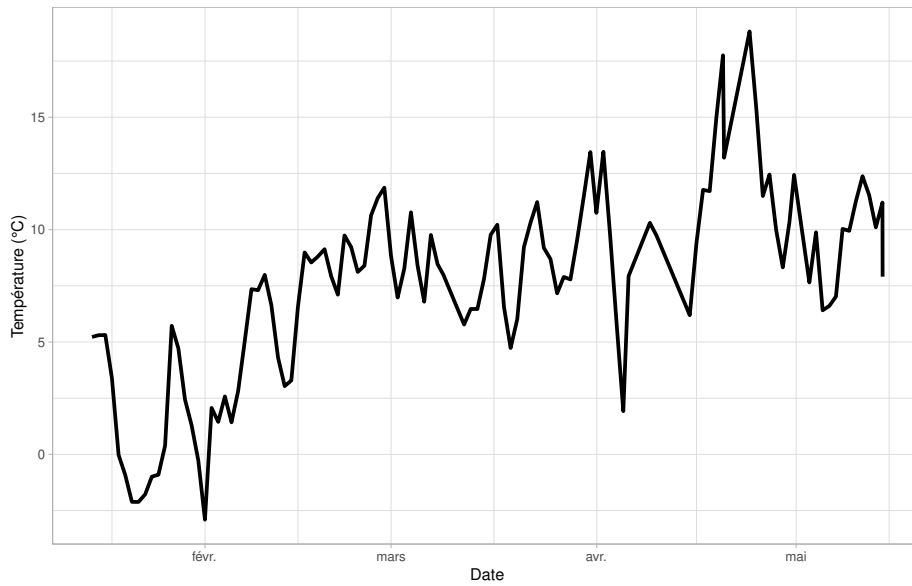


FIGURE C.0.2 – Variation des moyennes journalières de température de l'air durant toute la période d'expérimentation.

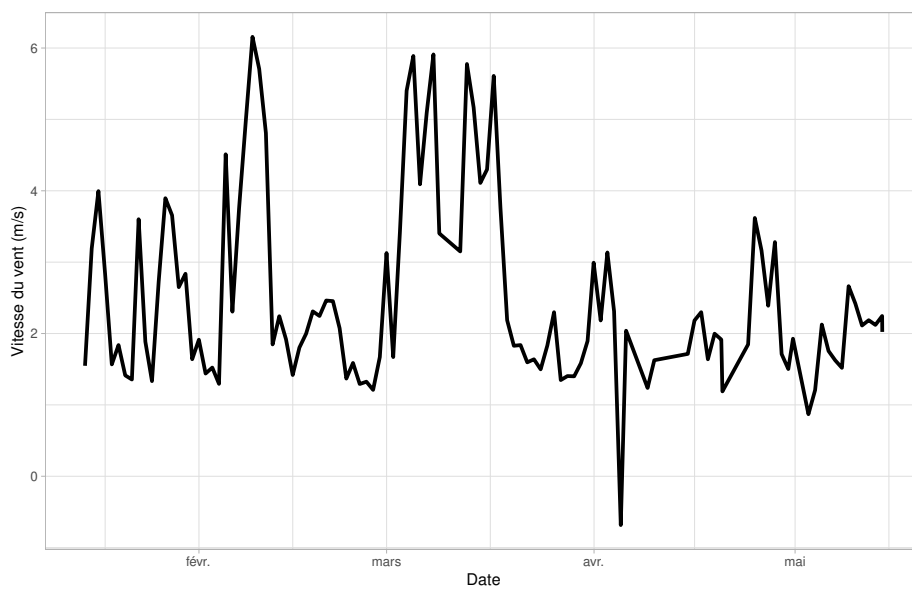


FIGURE C.0.3 – Variation des moyennes journalières de la vitesse du vent durant toute la période d'expérimentation.

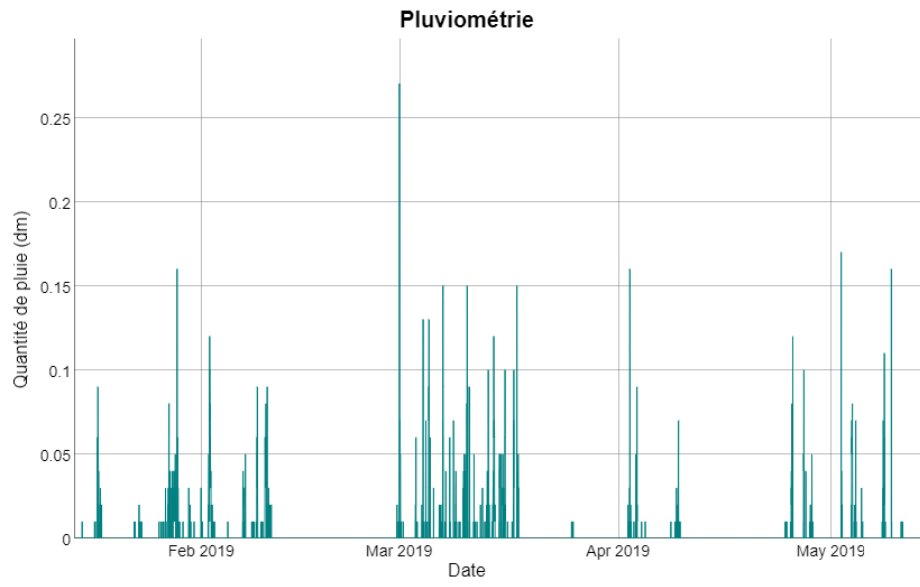


FIGURE C.0.4 – Pluviométrie moyenne par intervalle de 15 min durant toute période de l'expérience.

Cinétique de sorption/désorption dans les bois de structure exposés aux intempéries : première approche.

Vincent Defays

La construction bois est en plein essor en Belgique. Cette tendance devrait se confirmer, voire s'accroître à l'avenir car elle est puissamment soutenue par le développement de la conscience environnementale des consommateurs. Mais la construction bois ne pourra réellement tirer parti de cet éveil qu'à condition d'être techniquement complètement maîtrisée. L'hygroscopicité du bois constitue, en particulier, une difficulté potentielle. L'objectif de ce travail est de contribuer à l'établissement de la cinétique des variations du taux d'humidité de bois de structure exposés aux intempéries. Il s'agit en particulier de répondre aux questions suivantes. Combien de temps un bois de structure peut-il rester exposé aux intempéries avant que des problèmes ultérieurs ne soient à craindre? Ou combien de temps un bois de structure humide doit-il sécher à l'extérieur pour éviter de tels problèmes? Les recherches ont commencé par des mesures du taux d'humidité de bois de structure très récemment mis en œuvre sur chantier. Les résultats ont révélé que les bois de structure étaient généralement posés secs; la suite des travaux s'est dès lors focalisée sur la reprise d'humidité, donc sur la première des deux questions. Un suivi temporel du taux d'humidité de bois de structure a été effectué sur des caissons expérimentaux installés en extérieur successivement chaque mois, de décembre à avril. Il a montré un accroissement à la fois rapide et important du taux d'humidité des bois durant la période hivernale. En partant de 13%, des bois ont atteint et dépassé le seuil des 20% en moins de 6 semaines. Ensuite, durant le printemps, les bois ont lentement séché. Les taux d'humidité atteints dépassent les taux d'humidité à l'équilibre qu'indiquent les hystérèses de sorption/désorption. La connaissance de l'humidité relative de l'air est donc insuffisante pour évaluer le taux d'humidité des bois. La mise en correspondance des taux d'humidité avec les paramètres météorologiques a révélé l'importance de la pluviosité et de la température notamment. Compte tenu de son caractère exploratoire, ce travail a soulevé de nombreuses questions, dont le traitement réclamera une évolution des méthodes de mesure.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro