

**Interreg**  
POCTEFA  
iForWood



## **Le séchage des essences pyrénéennes**

Généralités & Appuis techniques pour six essences pyrénéennes.  
(Chêne, Hêtre, Sapin Pectiné, Pin Sylvestre, Pin Radiata et Pin à Crochets)

• **Guide Technique** •



Réalisé par le CRITT Bois Occitanie :



Avec la participation de :



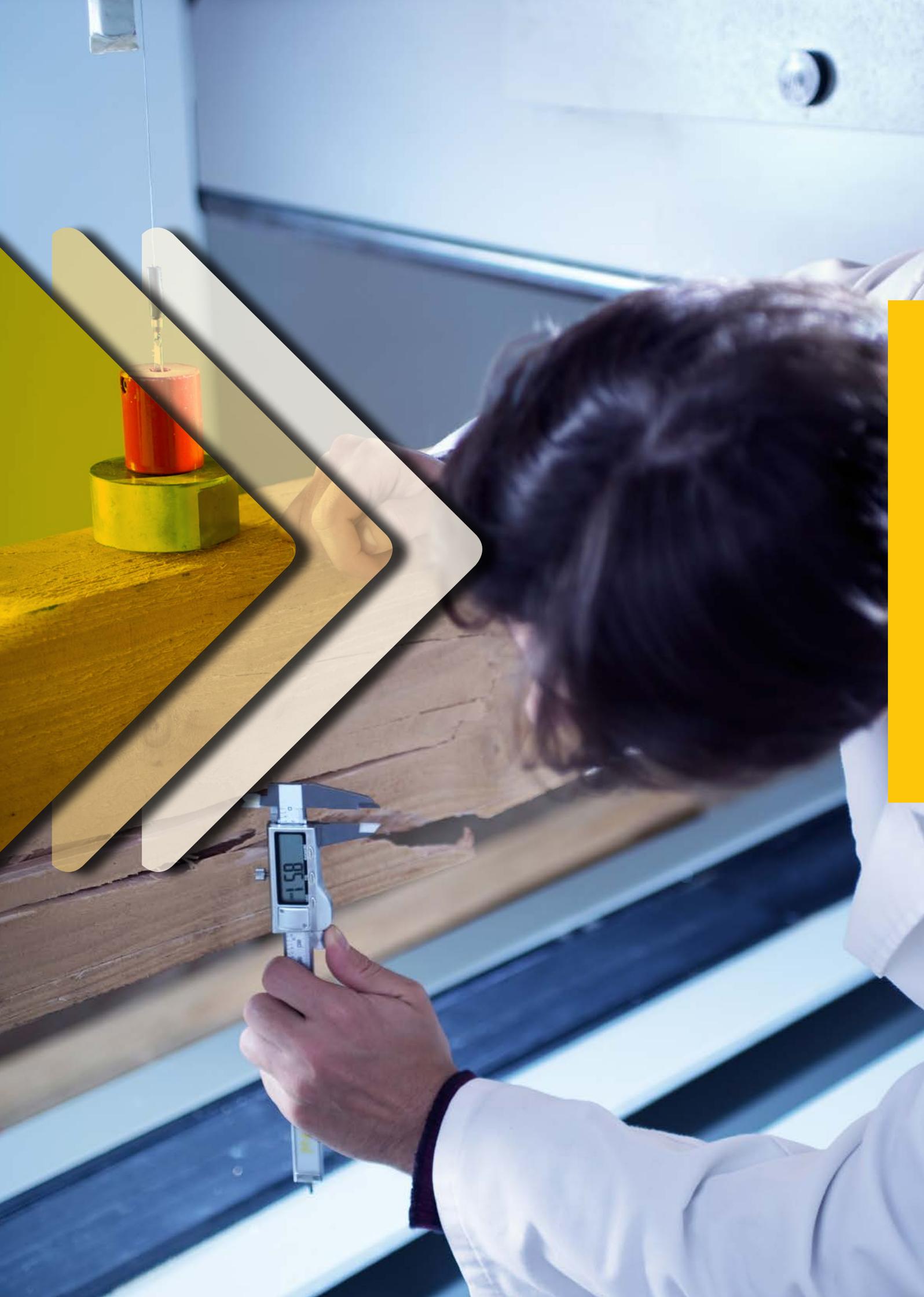


## Pourquoi un guide technique sur le séchage des essences Pyrénéennes ?

**Olivier GUÉRITTE** – Ingénieur d'Études – **CRITT Bois Occitanie** – Aveyron (12) – France

En tant qu'Ingénieur d'Études, nous avons régulièrement l'occasion d'observer, dans les Pyrénées, des entreprises ; scieries ou transformateurs ; qui rencontrent de réelles difficultés à sécher correctement leurs produits et/ou à intégrer convenablement le processus de séchage au sein de leur flux de production. La demande du marché en produits séchés s'est pourtant intensifiée depuis 2009. 12% des produits sciés sont séchés en France contre 6% en Occitanie (cf. Enquête du Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation – Décembre 2017). D'un autre côté et au regard du coût d'investissement d'un séchoir, la petite taille de nos entreprises peut expliquer cette situation. Ce guide a la volonté de rappeler les quelques bases théoriques nécessaires à tout entrepreneur pour qu'il intègre, en toute connaissance de cause, le procédé de séchage dans sa production et qu'il soit en mesure de proposer à ses clients, un produit sec de qualité, issu de nos massifs montagneux.

# Vood





## Génèse du projet

### iForWood

#### Innovation dans la mobilisation et la transformation du bois Pyrénéen

iForWood est un projet de coopération entre la France et l'Espagne qui vise à renforcer l'innovation dans la mobilisation et la transformation des bois Pyrénéens. Le Volet 4 du projet est centré sur l'aval de la filière forêt-bois et s'adresse particulièrement aux entreprises de première et seconde transformation du bois. Ce volet est composé de 5 actions :

- Le classement mécanique des bois ;
- Le séchage des essences pyrénéennes ;
- La commercialisation des produits bois des Pyrénées ;
- La qualité environnementale des colles ;
- Le développement de nouveaux produits en bois des Pyrénées.

Ce guide constitue l'aboutissement de l'action n°2 sur le séchage des essences pyrénéennes. Nous visons ici une montée en compétence des scieries pyrénéennes en promouvant l'utilisation du séchage du bois et en fournissant les outils nécessaires et suffisants aux opérateurs pour conduire un process de séchage efficace et assurer une maîtrise de la qualité. Cela doit permettre d'informer les opérateurs et de formaliser des procédures de suivies et de contrôle selon l'essence employée.

Ce guide de conduite d'unité de séchage tentera de s'adapter aux bois pyrénéens tout en rappelant les éléments suivants :

- Connaissances de base du processus de séchage et des possibilités et limites du matériel ;
- Modalités de chargement et de conduite des cycles (disposition des piles, mise en place des sondes de contrôle, ...) ;
- Connaissance des procédures de mesure et de contrôle du bois et du matériel (mesure de l'humidité du bois, palettisation, disposition des liteaux, taille des liteaux, ...) ;
- Connaissance de certain référentiel temps / qualité ;
- Méthode de diagnostic en cas de dysfonctionnement ;
- Procédure de réception et de contrôle en cas de prestations pour le compte de tiers.

Cet outil se veut être un support pédagogique pour favoriser l'appropriation des recommandations par les opérateurs.





# Sommaire

<b>COMMENT OBTENIR UN SÉCHAGE DE QUALITÉ .....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>13</b>
<b>I - LE RECOURS AU SÉCHAGE, UN IMPÉRATIF .....</b>	<b>15</b>
1. POURQUOI AVOIR RECOURS AU SÉCHAGE ? .....	15
2. DEUX MÉTHODES POUR SÉCHER LE BOIS .....	16
<b>II - UN BOIS CONSTITUÉ D'EAU ET ENTOURÉ D'AIR .....</b>	<b>17</b>
1. LES TROIS FONDAMENTAUX DU BOIS .....	17
2. L'EAU DANS LE BOIS : .....	20
A. Les eaux .....	20
B. Indicateur de référence .....	21
3. MESURER L'HUMIDITÉ DU BOIS : .....	22
A. Deux types de mesures possibles .....	22
B. Bien choisir son humidimètre .....	23
C. Calculer par les méthodes électriques le gradient d'humidité Gh .....	24
D. Quel est le taux d'humidité de mon bois ? .....	24
E. Cas où vous recevez du bois déjà préséché .....	26
F. Avantages et inconvénients .....	27
G. Précisions techniques sur les humidimètres .....	27
H. Quelques aberrations régulièrement rencontrées .....	27
4. L'ÉQUILIBRE HYGROSCOPIQUE DU BOIS .....	28
A. Humidité d'équilibre kézako ? .....	28
B. Humidité d'équilibre : une variable importante .....	29
5. TAUX D'HUMIDITÉ D'EMPLOI .....	31
6. RETRAIT ET COEFFICIENT DE RÉTRACTABILITÉ .....	32
A. Le retrait .....	32
B. Le coefficient de rétractabilité .....	33
C. Calcul du retrait .....	33
7. MÉCANISMES DU SÉCHAGE .....	34
A. Deux phénomènes importants : la circulation et l'évaporation .....	34
B. Le sens de circulation de l'eau .....	34
C. Les facteurs influençant les mécanismes de séchage .....	35
D. Le gradient de séchage .....	35
8. LES DÉFAUTS LIÉS AU SÉCHAGE DU BOIS .....	36
A. Déformation .....	36
B. Discoloration / Coloration .....	36



C.	<i>Bleuissement</i> .....	37
D.	<i>Fentes</i> .....	37
E.	<i>Collapse (Chêne)</i> .....	38
9.	MAÎTRISER L'HUMIDITÉ RELATIVE APRÈS LE SÉCHAGE C'EST MAÎTRISER LES DÉFAUTS .....	38

### **III - CONDUITE DU SÉCHAGE À L'AIR LIBRE .....41**

1.	EMPILAGE ET BAGUETTAGE POUR LE SÉCHAGE À L'AIR LIBRE.....	41
A.	<i>Caractéristiques des baguettes</i> .....	41
B.	<i>L'air de stockage</i> .....	42
C.	<i>Disposition et orientation des piles</i> .....	42
D.	<i>Date d'empilage et temps de séchage</i> .....	43
2.	AVANTAGES – INCONVÉNIENTS DU SÉCHAGE À L'AIR LIBRE.....	44

### **IV - CONDUITE DU SÉCHAGE THERMIQUE.....45**

1.	LES ÉLÉMENTS D'UNE CELLULE DE SÉCHAGE.....	45
2.	PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES EXISTANTS.....	45
A.	<i>Le séchage à Air Chaud Climatisé (ACC) dit « traditionnel »</i> .....	45
B.	<i>Le séchage à déshumidification par Pompe à Chaleur (PAC)</i> .....	46
C.	<i>Le séchage sous vide</i> .....	48
3.	COMPARAISON DES PROCÉDÉS DE SÉCHAGE SELON DIFFÉRENTS CRITÈRES .....	49
4.	L'EMPILAGE – BAGUETTAGE POUR LE SÉCHAGE THERMIQUE.....	50
A.	<i>Préambule</i> .....	50
B.	<i>Types et dimensions des baguettes</i> .....	50
C.	<i>Exemple de bon et de mauvais empilage</i> .....	51
5.	OPÉRATIONS PRÉLIMINAIRES AU REMPLISSAGE DU SÉCHOIR.....	52
6.	LA MISE EN PLACE DE VOS PAQUETS DANS LA CELLULE DE SÉCHAGE.....	52
7.	LES CYCLES DE SÉCHAGE.....	55
8.	LES TABLEAUX DE SÉCHAGE.....	56
9.	CONDUITE DU SÉCHAGE .....	57
10.	LE STOCKAGE POST SÉCHAGE .....	58

### **V - LE SÉCHAGE DES ESSENCES PYRÉNÉENNES.....59**

1.	PRÉAMBULE.....	59
2.	NOTES .....	59
3.	LE CHÊNE DES PYRÉNÉES.....	60
A.	<i>Propriétés physiques et mécanique du Chêne</i> .....	60
B.	<i>Propriété liée au séchage du Chêne des Pyrénées</i> .....	60
C.	<i>Table de séchage du Chêne des Pyrénées (épaisseur de 27 à 35mm)</i> .....	61
D.	<i>Explication pour le Chêne des Pyrénées</i> .....	61
4.	LE HÊTRE.....	62
A.	<i>Propriétés physiques et mécanique du Hêtre</i> .....	62

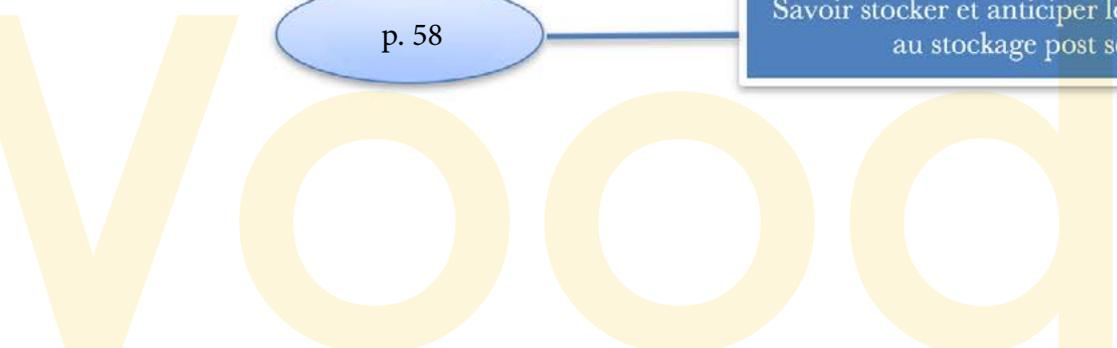
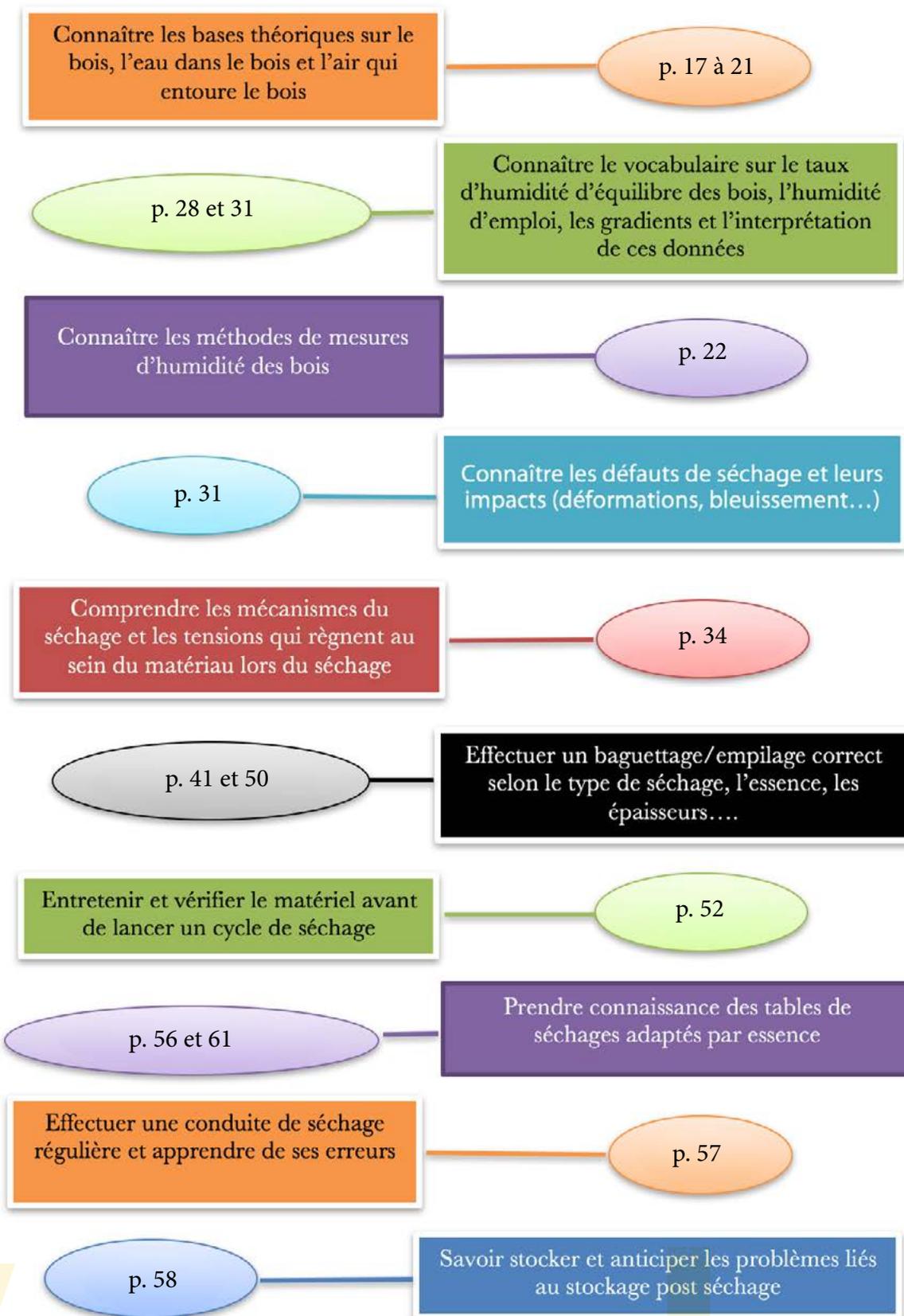


B.	<i>Propriété liée au séchage du Hêtre</i> .....	62
C.	<i>Table de séchage du Hêtre (épaisseur de 27 à 35mm)</i> .....	63
5.	LE SAPIN PECTINÉ.....	63
A.	<i>Propriétés physiques et mécanique du Sapin Pectiné</i> .....	63
B.	<i>Propriété liée au séchage du Sapin Pectiné</i> .....	64
C.	<i>Table de séchage du Sapin Pectiné (épaisseur de 27 à 35mm)</i> .....	64
D.	<i>Explication pour le Sapin Pectiné</i> .....	65
6.	LE PIN SYLVESTRE.....	65
A.	<i>Propriétés physiques et mécanique du Pin Sylvestre</i> .....	66
B.	<i>Propriété liée au séchage du Pin Sylvestre</i> .....	66
C.	<i>Table de séchage du Pin Sylvestre (épaisseur de 27 à 35mm)</i> .....	67
7.	LE PIN RADIATA.....	67
A.	<i>Propriétés physiques et mécaniques du Pin Radiata</i> .....	67
B.	<i>Table de séchage du Pin Radiata (épaisseur de 27 à 35mm)</i> .....	68
8.	LE PIN À CROCHETS.....	68
A.	<i>Propriétés physiques et mécaniques du Pin à crochets</i> .....	69
B.	<i>Nos conseils pour la table de séchage du Pin à crochets</i> .....	70
<b>VI -</b>	<b>RESUMÉ DES BONNES PRATIQUES ET NOS CONSEILS</b> .....	<b>71</b>
1.	MESURER L'HUMIDITÉ.....	71
2.	L'EMPLIAGE ET LE BAGUETTAGE.....	71
3.	EN AMONT DU REMPLISSAGE DU SÉCHOIR .....	72
4.	LA CONDUITE DU SÉCHAGE.....	73
5.	APRÈS LE SÉCHAGE.....	73
6.	INCIDENTS ET DÉFAUTS DE FONCTIONNEMENT.....	74
7.	CONSEILS ET MAINTENANCE.....	74
<b>VII -</b>	<b>TABLE DES HUMIDITÉS D'ÉQUILIBRE</b> .....	<b>75</b>
<b>VIII -</b>	<b>LÉXIQUE</b> .....	<b>77</b>
<b>IX -</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>79</b>
<b>X -</b>	<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS</b> .....	<b>81</b>
<b>XI -</b>	<b>TABLE DES TABLEAUX</b> .....	<b>83</b>
<b>XII -</b>	<b>PARTENAIRES DU PROJET IFORWOOD</b> .....	<b>85</b>
<b>XIII -</b>	<b>ANNEXES</b> .....	<b>87</b>





## Comment obtenir un séchage de qualité ?







## Introduction

Le séchage du bois est une étape essentielle de la transformation du bois car il lui confère les caractéristiques indispensables à une utilisation rationnelle et performante ; stabilité dimensionnelle, amélioration des caractéristiques mécaniques, préservation vis-à-vis de certains agents d'altération biologique, aptitude au collage et à recevoir les finitions.

Les secteurs de la première transformation du bois<sup>1</sup> et de la deuxième transformation du bois<sup>2</sup> doivent aujourd'hui reconnaître l'importance du séchage dans leurs activités. À la fin de la chaîne de transformation du bois, les produits finis doivent avoir une humidité moyenne d'équilibre en relation avec leurs emplois et s'acclimater à leurs lieux d'usages afin de minimiser les variations dimensionnelles au cours du temps.

Dans une stratégie entrepreneuriale de conquête de marché et d'optimisation des débouchés commerciaux, la maîtrise des processus de séchage peut apporter une forte valeur ajoutée aux entreprises. Elle est rendue nécessaire par une demande portant actuellement sur du bois sec avec des niveaux d'exigences élevés. Actuellement, l'offre pyrénéenne ne peut pas répondre à cette demande puisque :

- 1. Il y a encore peu de séchoirs dans les Pyrénées ;**
- 2. Les séchoirs disponibles ne sont pas utilisés au maximum de leur potentiel.**

Cet état de fait nous a conduit à la situation actuelle où « le bois pyrénéen reste peu utilisable pour l'industrie de seconde transformation » alors qu'une partie du problème est uniquement technique.

En effet, compte tenu des spécificités des bois de montagne, et, plus particulièrement, des Pyrénées, il n'est pas possible d'appliquer, pour arriver au résultat escompté, les standards techniques à ce processus de séchage. Il est donc nécessaire de définir un guide technique propre aux bois pyrénéens.

L'objectif de cet ouvrage est donc de tenter d'apporter des réponses aux acteurs de la filière sur les problématiques de séchage d'essences pyrénéennes en s'intéressant particulièrement aux 6 essences suivantes :

- **Chêne ;**
- **Sapin Pectiné ;**
- **Pin Radiata ;**
- **Hêtre ;**
- **Pin Sylvestre ;**
- **Pin à Crochet.**

Bien que ce guide se prédestine à améliorer les techniques de séchage de ces 6 essences, il n'en demeure pas moins important de faire des rappels pour les connaisseurs ou d'informer les personnes intéressées sur les connaissances de base, les méthodologies et les pratiques du séchage du bois.

<sup>1</sup> 1<sup>ère</sup> transformation du bois : Regroupe l'ensemble des activités de transformation du bois brut et de déchets de bois brut par sciage (plots, avivés, lames et frises), déroulage ou tranchage (feuilles de placage), broyage (pâte destinée à la fabrication de papier) ou pressage (panneaux).

<sup>2</sup> La deuxième transformation du bois apporte de la valeur ajoutée aux produits issus de la première transformation et les met à disposition de la distribution et de la mise en œuvre pour un usage direct par le consommateur.





# I- Le recours au séchage, un impératif

## 1. Pourquoi avoir recourt au séchage ?

Henri-Louis DUHAMEL DU MONCEAU, célèbre agronome et botaniste soulignait déjà au XVIII<sup>e</sup> siècle :



« On a vu que les bois se tourmentent et se fendent en se desséchant ; d'où l'on peut conclure que pour les ouvrages qui demandent de la précision, il faut que les bois soient très secs avant de les mettre en œuvre ; sans cette précaution, les assemblages de menuiserie se tourmenteraient, ils se déjetteraient, et comme ils se retirent beaucoup, les joints ne manqueraient pas de s'ouvrir ainsi tout l'ouvrage serait bientôt en désordre ».

**Henri-Louis DUHAMEL DU MONCEAU, agronome et botaniste du XVIII<sup>e</sup> siècle** (Tardieu)

Il a également ajouté : « Un autre inconvénient qui arrive aux poutres qu'on emploie quand le bois est encore vert, c'est qu'elles plient sous la charge et qu'elles deviennent courbes. Il n'est donc pas douteux qu'il faut autant qu'il est possible, n'employer que des bois secs, soit pour les ouvrages de menuiserie, si l'on évite qu'ils ne se déjettent, soit lorsqu'il s'agit de charpente, afin qu'ils conservent de la solidité dans leur assemblage, principalement lorsque les pièces ne doivent pas être apparentes. »

Le bois est un matériau **hygroscopique** susceptible d'absorber ou de perdre de l'eau en fonction des conditions dans lequel il est placé. Les **variations de son taux d'humidité** modifient la plupart de ses caractéristiques et au-dessous d'un certain seuil, elles s'accompagnent de **variations dimensionnelles**.

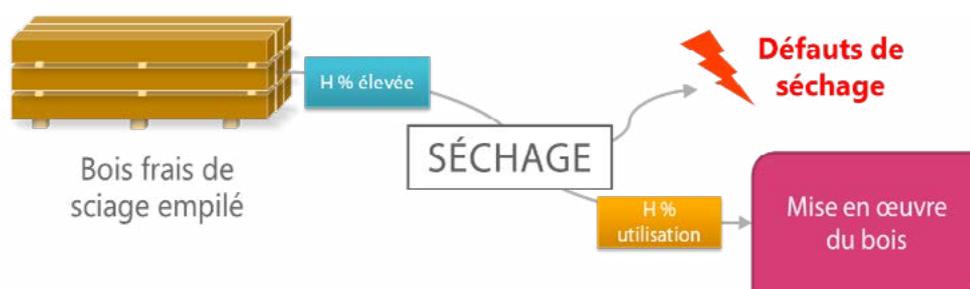
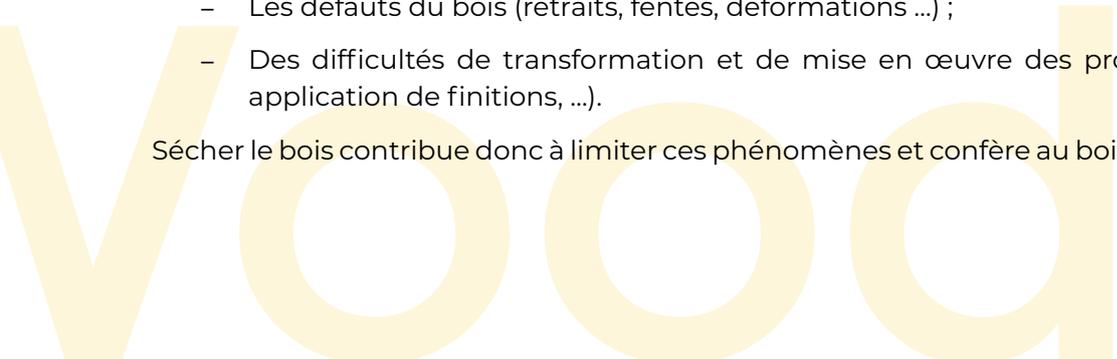


Figure 1 : Processus simplifié du séchage (CRITTBois, 2018)

Le caractère hygroscopique du bois génère ainsi trois typologies de contraintes :

- Les attaques d'insectes ou de champignons ;
- Les défauts du bois (retraits, fentes, déformations ...) ;
- Des difficultés de transformation et de mise en œuvre des produits (usinage, collage, application de finitions, ...).

Sécher le bois contribue donc à limiter ces phénomènes et confère au bois une certaine durabilité.





Le **séchage** est donc une opération, **incontournable** dans la transformation du bois, au cours de laquelle il est susceptible de présenter des défauts rédhibitoires pour son utilisation ultérieure. De plus, sécher le bois permet de faire des économies lors du transport du fait de la réduction de la masse mais bon nombre d'utilisations nécessitent une humidité du bois qui ne peut être atteinte à l'air libre. Tout le monde est donc aujourd'hui convaincu de la nécessité de sécher artificiellement les sciages dont la qualité et la destination le justifient.

## 2. Deux méthodes pour sécher le bois

En quoi consiste le séchage ? Il consiste à enlever toute ou partie de l'eau contenue dans un produit. Deux grandes voies existent pour atteindre cet objectif :

- L'extraction mécanique : l'eau sort du produit sous forme liquide. La gravité peut suffire pour une partie de l'eau mais une action plus musclée s'impose ce qui implique une augmentation des forces volumiques (essorage) ou la déformation par compression du produit (pressage).
- Le séchage thermique : il faut apporter de l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau et évacuer la vapeur d'eau qui en résulte.

La voie mécanique n'est pas utilisée pour le bois car le pressage n'est pas utilisé de façon industrielle pour les dimensions de bois et les volumes utilisées. C'est pourquoi seul le séchage thermique est exploité. On parlera par la suite des deux méthodes :

### 1. Le séchage à l'air libre ;

### 2. Le séchage artificiel.

#### Commentaire :

*On utilise trop souvent l'expression « Séchage naturel » pour évoquer le séchage à l'air libre afin de l'opposer au séchage artificiel. Cette expression laisse penser que le séchage doit s'effectuer « tout seul », naturellement, sans intervention particulière. Or, ce ne doit pas être le cas. La pratique montre qu'une bonne qualité de séchage s'obtient au prix d'un certain nombre d'opérations régulièrement répétées. Nous évoquerons ces aspects dans la suite de ce guide.*

Avant d'évoquer plus précisément le séchage à l'air libre et le séchage artificiel, nous allons en premier lieu aborder les points théoriques fondamentaux, qui vous permettront de sécher correctement votre bois. En effet, les problématiques de séchage du bois en France ne proviennent pas seulement d'un problème de marché. En France et l'Occitanie ne fait pas exception, le manque de compétences sur les phénomènes de séchage et le vocabulaire employé par les industriels, les clients et les fournisseurs sont sources de séchages mal réalisés.

Vous possédez un séchoir ? Vous êtes demandeur de bois sec ? Vos clients sont satisfaits de vos produits mais auraient aimé acheter du bois sec ? Dans ces trois cas concrets, il vous revient de connaître les fondamentaux du séchage, les caractéristiques du bois, de l'eau dans le bois, de l'air qui l'entoure ... La partie qui suit est destinée à vous informer sur ces compétences à acquérir impérativement.



## II. Un bois constitué d'eau et entouré d'air

### 1. Les trois fondamentaux du bois

Le bois est défini industriellement comme étant un matériau « fabriqué » dans l'arbre qui se constitue autour d'un axe. L'abatage de l'arbre fait apparaître la face transversale.

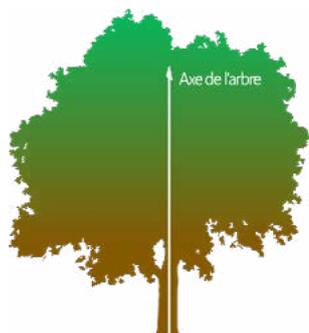


Figure 2 : Face transversale de l'arbre (CRITBois Occitanie)

Lorsqu'on observe cette face transversale de plus près, on observe un matériau non homogène avec différentes couches plus ou moins distinctes selon les essences.

Un descriptif s'impose :

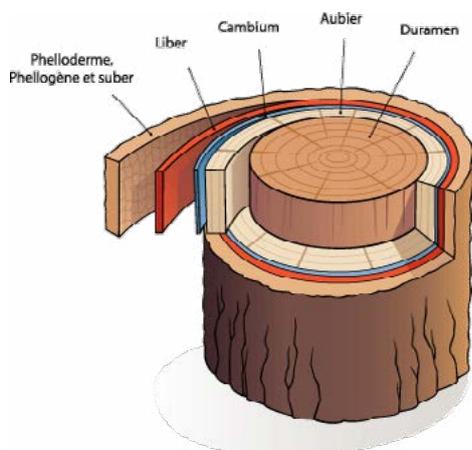


Figure 3 : Face transversale d'un arbre (ART LEVAGE)

Suber (Écorce externe) : Couche protectrice de l'arbre formée de tissu végétal. C'est la partie que l'on peut toucher.

Liber (Écorce interne) : Tissu végétal secondaire produit par le cambium des tiges et des racines, conducteur de la sève élaborée.

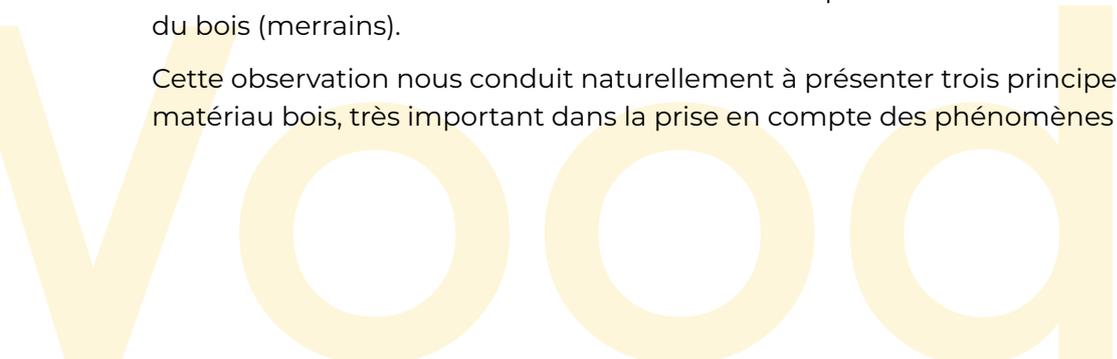
Cambium : Couche très fine où circule la sève. C'est la partie vivante de l'arbre puisque là, se fabriquent les fibres, les rayons et l'écorce.

Aubier (Bois fonctionnel) : Partie fonctionnelle de l'arbre correspondant aux zones d'accroissement les plus récemment formées, contenant des cellules vivantes.

Duramen (Bois parfait) : Partie morte où s'accumulent les déchets et où la sève ne circule plus. C'est le squelette de l'arbre, un noyau dur et résistant.

Rayons : Ce sont des lames rayonnantes qui recoupent les cernes en un grand nombre de secteurs. Ils constituent des éléments de faible résistance qui favorisent les fentes de séchage et la fente du bois (merrains).

Cette observation nous conduit naturellement à présenter trois principes fondamentaux du matériau bois, très important dans la prise en compte des phénomènes de séchage :





### ❖ Le bois est un matériau hygroscopique

Le bois est un matériau **hygroscopique** (comme les éponges) c'est à dire qu'il peut perdre ou absorber de l'eau. Qu'il soit à l'état vert, ressuyé, séché, stocké, mis en œuvre, il sera toujours en train de perdre ou de reprendre de l'eau en fonction des conditions climatiques de l'endroit où il se trouve. L'hygroscopie du bois est très importante par son influence sur les dimensions et la forme des pièces de bois, la densité du matériau, la résistance mécanique des ouvrages en bois, la durabilité du bois et les altérations qu'il peut subir, sa conductibilité électrique, phonique, thermique...

### ❖ Le bois est un matériau hétérogène<sup>3</sup>

Le bois est un matériau **hétérogène** puisqu'il est composé d'éléments (tissus) de nature différente. On parle de « Plan ligneux » (Norme NF B 50-002). Il existe une très grande variabilité d'une espèce à l'autre quant aux dimensions, à la forme, à la répartition, au nombre et à la couleur des rayons ligneux. Les cellules s'organisent parallèlement ou perpendiculairement à l'axe du tronc. On peut donc distinguer dans le bois trois directions privilégiées :

- La direction **axiale** suivant la longueur du tronc, c'est la direction de l'axe de symétrie du cylindre ;
- La direction **radiale** suivant les rayons du cercle de section droite du cylindre ;
- La direction **tangentielle**, perpendiculaire à la direction radiale, c'est-à-dire tangentes aux cercles d'accroissement.

### ❖ Le bois est un matériau anisotrope<sup>4</sup>

Le bois est un matériau anisotrope c'est une conséquence directe de son hétérogénéité. Le bois est anisotrope car ses éléments constitutifs sont orientés dans plusieurs directions déterminées. Il en résulte que ses propriétés mécaniques et physiques ne sont pas les mêmes dans tous les plans (longitudinal, radial, tangentiel). Le caractère anisotrope est également lié aux particularités suivantes :

- Perturbation du fil du bois ;
- Présence de bois juvénile et de bois adulte ;
- Présence de bois de compression et de bois de tension ;
- Présence de contraintes de croissance ;
- Présence de défauts et d'altérations.

<sup>3</sup> Hétérogène : Se dit des substances dont les propriétés physiques varient en fonction de la direction.

<sup>4</sup> Anisotrope : Se dit des substances dont les propriétés physiques varient en fonction de la direction.



**A retenir :**

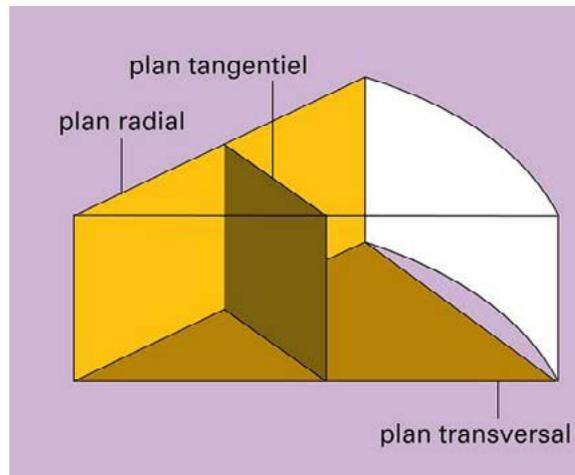
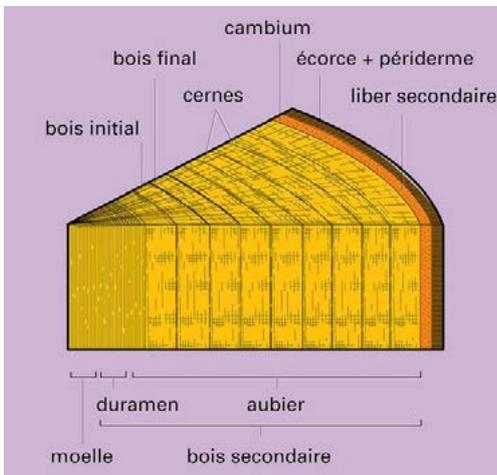
1



(Le sourire d'Isis)

Le bois est un matériau **hygroscopique** susceptible d'absorber ou de perdre de l'eau en fonction des conditions dans lequel il est placé.

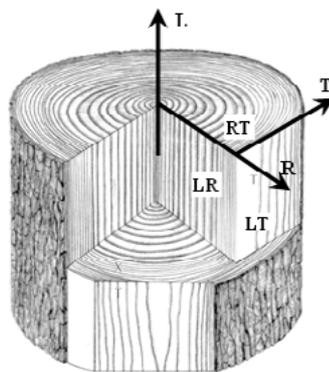
Le bois est un matériau **hétérogène** puisqu'il est composé d'élément (tissus) de nature différente. On parle de « Plan ligneux » (NF B 50-002).



2

(Édouard BOUREAU, 2018)

3



(Moutee, 2006)

Le bois est un matériau **anisotrope** puisqu'il n'a pas les mêmes propriétés dans toutes les directions.

## 2. L'eau dans le bois

L'eau contenue dans le bois a une influence sur :

- Sa densité ;
- Ses dimensions ;
- Ses caractéristiques mécaniques ;
- Ses caractéristiques physiques ;
- Son aptitude à l'usinage et au collage ;
- Son aptitude à recevoir les finitions ;
- Sa résistance aux attaques biologiques.

### A. Les eaux

L'eau existe sous différentes formes dans le bois (cf. Figure 4 ci-dessous) :

Eau libre (dite eau capillaire) : Remplit le vide cellulaire. Elle peut être extraite sans provoquer de variation dimensionnelle. Lorsque le bois sèche, c'est elle qui part la première.

Eau liée (dite eau hygroscopique) : Imprègne les parois cellulaires. Son extraction provoque des variations dimensionnelles (en dessous de 30% d'humidité).

Eau de constitution : Partie intégrante de la matière. Elle ne peut jamais être évacuée durant le séchage.

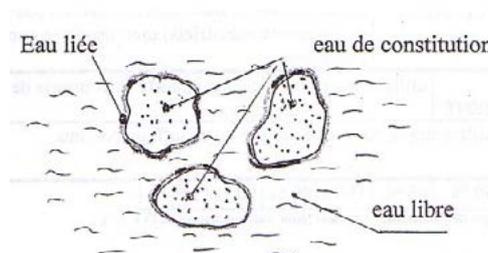


Figure 4 : Les eaux du bois (GénieCVL)

**Précision** : Lorsqu'un bois à l'état vert sèche, en un point donné de l'échantillon, l'eau qui part la première est l'eau libre. Cette eau libre peut être extraite sans variations dimensionnelles.

Puis, il arrive un moment où, à cet endroit de l'échantillon, toute l'eau libre est partie et il reste encore toute l'eau liée, c'est-à-dire que les parois cellulaires sont encore saturées d'humidité. Le bois a alors atteint en cet emplacement le **Point de Saturation des Fibres** (PSF). Le point de saturation des fibres peut varier suivant l'essence et suivant la température. Cependant, à 20°C le point de saturation des fibres se situe toujours au voisinage de **30%**. Au-dessous du point de saturation des fibres, donc dans le domaine hygroscopique, les variations d'humidité s'accompagnent de variations dimensionnelles.



**Sécher le bois consiste donc à retirer toute l'eau libre et une partie de l'eau liée.**

	Bois anhydre	PSF
Eau de constitution	Eau de constitution + Eau liée	Eau de constitution + Eau liée + Eau libre
	0%	30%

**Figure 5 : Répartition des différentes formes d'eau du matériau bois (CRITTBois, 2018)**

### B. Indicateur de référence

Pour caractériser l'eau dans le bois, on utilise à tort et à travers plusieurs termes. Pourtant, un seul indicateur caractérise la part d'eau dans le bois : **le taux d'humidité sur anhydre**.



**Figure 6 : Identification de l'indicateur de référence : le taux d'humidité sur anhydre (CRITTBois, 2018)**

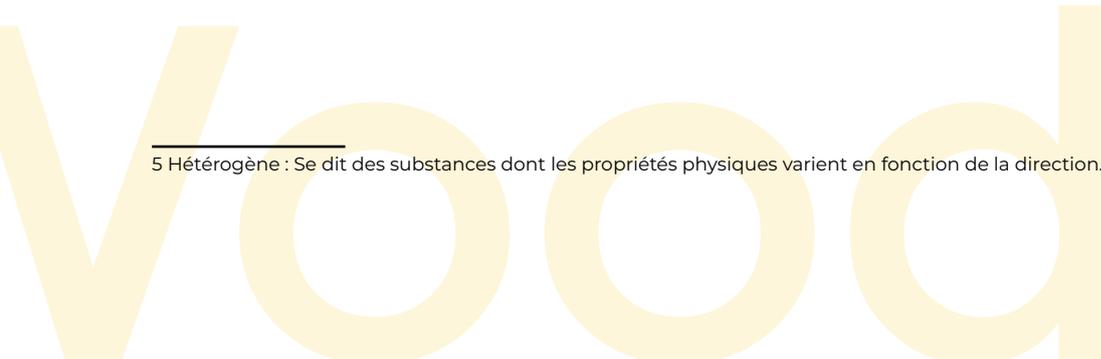
**Le taux d'humidité sur anhydre** ou plus couramment appelé taux d'humidité (terme employé dans la suite du guide) représente le rapport entre la masse d'eau et la masse du bois anhydre. On le nommera H, il s'exprime en pour cent (%) et il se formule ainsi :

$$H = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse anhydre}^5} \times 100 (\%) \text{ ce qui équivaut à dire}$$

$$H = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{anhydre}}}{M_{\text{anhydre}}} \times 100 (\%) \text{ ou encore}$$

$$H = \frac{M_h - M_0}{M_{a0}} \times 100 (\%)$$

<sup>5</sup> Hétérogène : Se dit des substances dont les propriétés physiques varient en fonction de la direction.



Pour information (ne pas confondre) :

### Humidité :

1. Teneur en eau d'un sol, de l'atmosphère.
2. Caractère de ce qui est humide, légèrement mouillé ou infiltré d'eau, d'un liquide.
3. Caractère d'un climat, d'une région où l'atmosphère est chargée d'eau.

### Siccité :

Qualité de ce qui est sec.  $S = \frac{M_{anhydre}}{M_{brut}}$  (Inverse du taux d'humidité).

### Hygrométrie (synonyme hygroskopie) :

Partie de la météorologie qui étudie la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air.

**Taux d'humidité sur humide :** C'est le rapport entre la masse d'eau et la masse de bois totale.

Concerne le bois énergie et s'exprime ainsi :  $H = \frac{M_{humide} - M_{anhydre}}{M_{humide}} \times 100$  (%).

Définitions issues du Larousse

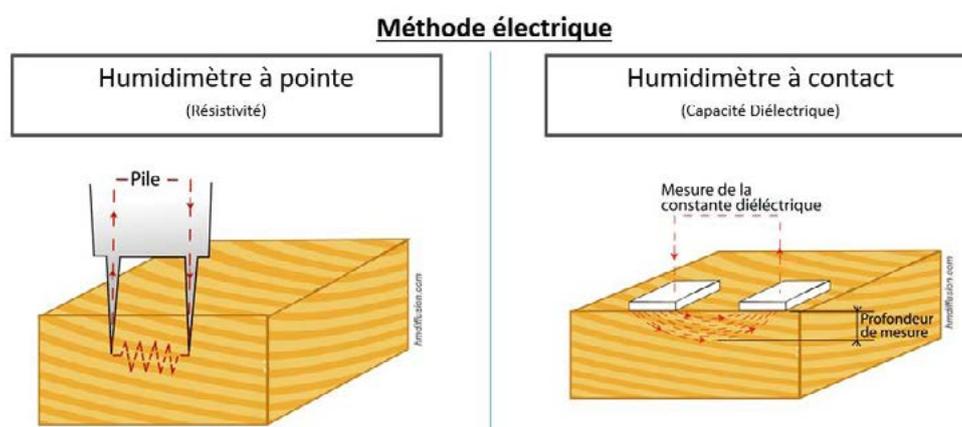
## 3. Mesurer l'humidité du bois

### A. Deux types de mesures possibles

Il existe deux types de mesures et elles font l'objet de deux normes européennes :

- La mesure par pesée et déshydratation (NF EN 13183-1<sup>6</sup>) ;
- La mesure par méthodes électriques (NF EN 13183-2<sup>7</sup>).

#### ❖ Méthode électrique



Enfoncer dans le bois perpendiculairement au fibre, à la profondeur souhaitée, deux électrodes qui peuvent être isolées ou non électriquement jusqu'à leur extrémité.

**Figure 7 : Détail de la méthode par mesure électrique (CRITBois, 2018)**

<sup>6</sup> « Teneur en humidité d'une pièce de bois scié. Partie 1 : Détermination par la méthode par dessiccation ».

<sup>7</sup> « Teneur en humidité d'une pièce de bois scié. Partie 2 : Estimation par méthode électrique par résistance ».



L'humidimètre à pointe est en fait un ohmmètre puisqu'il mesure la résistance électrique du bois qui varie en fonction de son humidité ; la résistance augmente lorsque l'humidité du bois diminue. On veillera pour ce type d'humidimètre à utiliser des électrodes (pointes) isolées électriquement jusqu'à leur extrémité afin de mesurer la répartition de l'humidité dans l'épaisseur du bois en les enfonçant à différentes profondeurs.

L'humidimètre à contact effectue une mesure dite « capacitive » en opposition à l'humidimètre à pointe qui effectue une mesure dite « résistive ». Cet humidimètre à contact s'applique sur la surface de la pièce de bois. Il n'y a pas d'électrodes à enfoncer. Il mesure l'humidité « globale » dans l'épaisseur de l'échantillon.

**Attention :** Des humidimètres à contact servent à mesurer l'humidité de sciages minces tandis que d'autres servent à mesurer l'humidité de bois épais. Le mauvais usage de l'humidimètre induira un résultat obligatoirement faux. Veuillez lire attentivement les notices de vos appareils.

Une fiche explicative pour la méthode électrique proposée par le CRITTBois Occitanie est fournie en annexe 1. (page 87)

#### ❖ Méthode par pesée et déshydratation

Quant à la première méthode, la mesure par pesée et déshydratation, elle consiste à débiter dans un sciage, perpendiculairement au fil du bois, une éprouvette puis à la peser à une humidité  $H_i$  recherchée puis de disposer l'échantillon dans une étuve de dessiccation réglée à 103 °C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ) pendant au moins 24h. On veillera à peser toutes les 2h l'échantillon.

Lorsque deux pesées successives obtiennent la même masse, l'échantillon aura alors atteint son état anhydre ( $H= 0\%$ ). Il suffit ensuite d'appliquer la formule vue précédemment pour obtenir le taux d'humidité sur anhydre initial :

$$H (\%) = \frac{M_{humide} - M_{anhydre}}{M_{anhydre}} \times 100 (\%)$$

Une fiche explicative pour la méthode par pesée proposée par le CRITTBois Occitanie est fournie en annexe 2. (page 88)

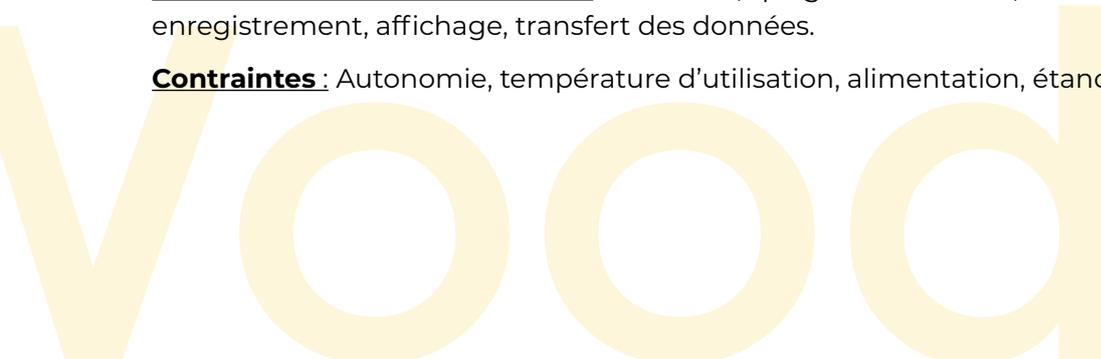
**NOTE :** Il y a également des sondes présentes dans les séchoirs. Elles utilisent la méthode de mesure résistive.

### *B. Bien choisir son humidimètre*

Les fonctions et contraintes principales à prendre en compte pour le choix d'un matériel sont les suivantes :

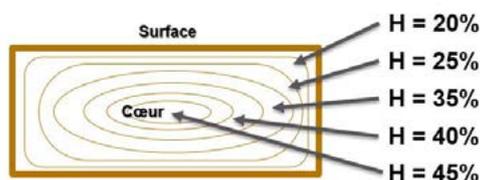
**Fonctions de l'humidimètre :** Précision, plage de mesure, nombre d'essences de bois, enregistrement, affichage, transfert des données.

**Contraintes :** Autonomie, température d'utilisation, alimentation, étanchéité, portabilité et prix.

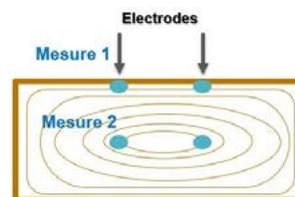


### C. Calculer par les méthodes électriques le gradient d'humidité $G_h$

Il existe, dès que le bois sèche, une différence d'humidité dans l'épaisseur qui est d'autant plus grande que le bois est épais. Le rapport entre l'humidité au cœur du bois et l'humidité à la surface s'appelle le gradient d'humidité (cf. Figure 8 ci-dessous).



**Figure 8 : Illustration d'un gradient d'humidité d'une pièce de bois** (CRITTBois, 2018)



**Figure 9 : Mesure de l'humidité avec un humidimètre à pointes** (CRITTBois, 2018)

En pratique, on mesure le gradient d'humidité en faisant le rapport de la valeur lue par les électrodes d'un humidimètre enfoncées à cœur et celles enfoncées à quelques millimètres de la surface (cf. Figure 9 ci-dessus).

Le gradient d'humidité renseigne lui aussi sur les tensions possibles qu'il peut y avoir à l'intérieur d'une pièce de bois. Plus le gradient d'humidité est élevé, c'est-à-dire, plus il y a de différence d'humidité entre l'humidité à cœur et celle de la surface, plus le bois sèche vite ; inversement, plus le gradient est faible, plus le bois sèche lentement. Un gradient d'humidité élevé aura donc de fortes chances de voir apparaître des défauts lors du séchage.

Le Gradient d'humidité  $G_h$  s'exprime de la manière suivante :

$$G_h(\%) = \frac{H_{\text{cœur}}(\%)}{H_{\text{surface}}(\%)}$$

### D. Quel est le taux d'humidité de mon bois ?

*« J'ai mesuré le taux d'humidité avec l'humidimètre à pointe de quelques planches de Chêne ; on est entre 45% et 63% d'humidité suivant les planches de la palette réceptionnée. Je l'ai notifié dans la fiche de contrôle de déchargement. »*

On a pu entendre cette phrase ci-dessus. Or, elle ne peut pas signifier grand-chose. Pourquoi ? Tout d'abord, il est n'est pas concevable de mesurer par les méthodes électriques (humidimètre à pointe ou à contact), les taux d'humidité sur anhydre de pièces de bois dont l'humidité est supérieure à 35%. Seule la méthode par pesée et déshydratation peut être utilisée. Ensuite, même si le tau d'humidité était compris entre 15 et 28%, il ne faut pas oublier de faire mention de quelques précisions supplémentaires.

En réalité, pour obtenir une bonne interprétation de la teneur en humidité d'une palette de bois d'une même essence, il faut notifier plusieurs données que l'on peut par exemple rassembler dans la grille suivante :

Date réception / Fin de cycle	Essence épaisseur	Humidité demandée	Date	Température du bois	Ech.1 Cœur	Ech.1 Surface	Ech.2 Cœur	Ech.2 Surface
Date1	Nom xx mm	H (%)	Date2	T	H1c	H1s	H2c	H2s



$$H1c \text{ moyen} = \frac{H1c + H2c}{2} ; H2s \text{ moyen} = \frac{H1s + H2s}{2} ;$$

$$G_{h1} = \frac{H1c}{H1s} ; G_{h2} = \frac{H2c}{H2s} ; G_h = \frac{G_{h1} + G_{h2}}{2} \text{ ou}$$

**Interprétation :** Le lot de **X- xx** mm, sortant du cycle de/réceptionné le **Date1**, demandée à un taux d'humidité de **H (%)** à un taux d'humidité moyen à cœur de **H1c moyen** et un taux d'humidité moyen en surface de **H2s moyen**, soit un gradient d'humidité de **G<sub>h</sub>**. On en conclue un manque d'homogénéité / une bonne homogénéité...

❖ Exemple 1

Date réception	Essence épaisseur	Humidité demandée	Date	Température du bois	Ech.1 Cœur	Ech.1 Surface	Ech.2 Cœur	Ech.2 Surface
13/05	Chêne 27mm	8%	14/05	20°C	8,6	8,1	8,3	7,9

$$H1c \text{ moyen} = \frac{H1c + H2c}{2} ; H2s \text{ moyen} = \frac{H1s + H2s}{2} ;$$

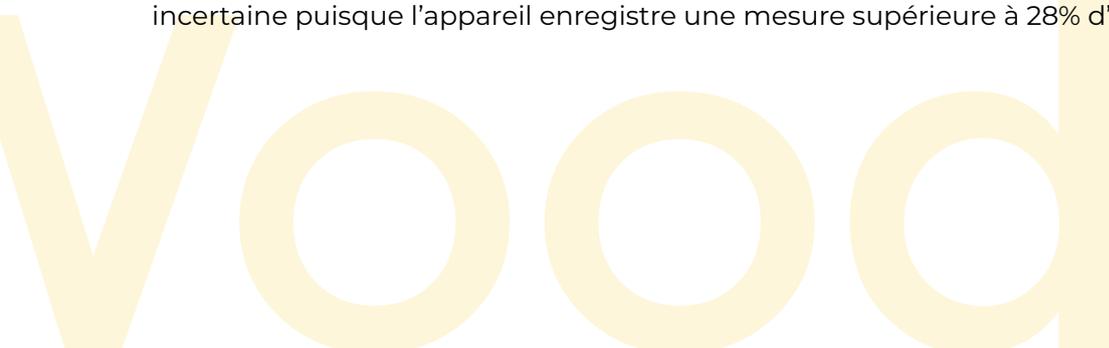
$$G_{h1} = \frac{H1c}{H1s} ; G_{h2} = \frac{H2c}{H2s} ; G_h = \frac{G_{h1} + G_{h2}}{2} \text{ ou}$$

**Interprétation :** Le lot de **Chêne - 27** mm, sortant du cycle de séchage le **13/05**, demandée à un taux d'humidité **8%** à un taux d'humidité moyen à cœur de **8,45%** et un taux d'humidité moyen en surface de **8,00%**, soit un gradient d'humidité de **1,055**. On en conclue à une bonne homogénéité...

❖ Exemple 2

Date réception	Essence épaisseur	Humidité demandée	Date	Température du bois	Ech.1 Cœur	Ech.1 Surface	Ech.2 Cœur	Ech.2 Surface
13/05	Chêne 27mm	/	17/10	8°C	28	17,4	44	22

**Interprétation :** Le lot de **Chêne - 27** mm, réceptionné le **13/05**, à un taux d'humidité moyen à cœur de **36%** et un taux d'humidité moyen en surface de **19,70%**, soit un gradient d'humidité de **1,805**. On en conclue une très mauvaise homogénéité. A noter que la mesure à cœur est très incertaine puisque l'appareil enregistre une mesure supérieure à 28% d'humidité.





### *E. Cas ou vous recevez du bois déjà préséché*

Certaines entreprises commandent d'ores et déjà du bois à un taux d'humidité entre 15 et 18% et souhaite à posteriori, sécher à nouveau le bois à un taux d'humidité de 10%. C'est le cas notamment de certains menuisiers. Dans ce cas, nous vous préconisons de bien contrôler les palettes livrées en remplissant une fiche de contrôle livraison établie en lien avec votre demande initiale ou le cahier des charges s'il existe. L'objectif est de vérifier les différentes dimensions des planches, hauteurs de piles, espacement des baguettes, taux d'humidité à cœur et en surface, homogénéité du premier séchage... En contrôlant un lot ou une palette à la réception, on s'informe sur l'homogénéité du séchage, la qualité du baguetage mais surtout, on peut établir un suivi sur plusieurs saisons afin que vous forgiez votre propre expérience sur l'impact des variations fournisseurs, des variations climatiques ou encore liés à la provenance des bois. Vous pourrez vérifier si le cahier des charges est respecté et affiner vos programmes de séchage en l'adaptant aux caractéristiques de vos palettes réceptionnées.

Une fiche de ce type est proposée par le CRITBois Occitanie en annexe 3. (page 89)



## F. Avantages et inconvénients

Voici un tableau qui compare les méthodes de mesures selon leurs avantages et inconvénients :

**Tableau 1 : Avantage et inconvénient des différentes méthodes de mesures**

Méthode	Avantage	Inconvénient
Méthode par pesée et déshydratation	Exactitude car application de la définition de l'humidité (Précision de 0,1% d'humidité) peu importe la plage d'humidité.	Long pour obtenir le résultat Méthode destructrice
Méthodes électriques Humidimètre à pointe	Rapidité de la mesure Méthode non destructive	Nécessite plusieurs mesures pour définir l'humidité globale Réglage de la température du bois nécessaire (Précision de 1 à 2% d'humidité dans l'intervalle 6% - 35%)
Méthodes électriques Humidimètre à contact	Rapidité de la mesure Méthode non destructive Insensibilité à la température Fonctionne à travers le vernis et la peinture.	Non pertinent pour des épaisseurs > 10mm Réglage de la densité nécessaire Utilisation conseillée sur bois raboté (nécessite un contact « intime ») (Précision de 1 à 2% d'humidité dans l'intervalle 6% - 35%)

## G. Précisions techniques sur les humidimètres

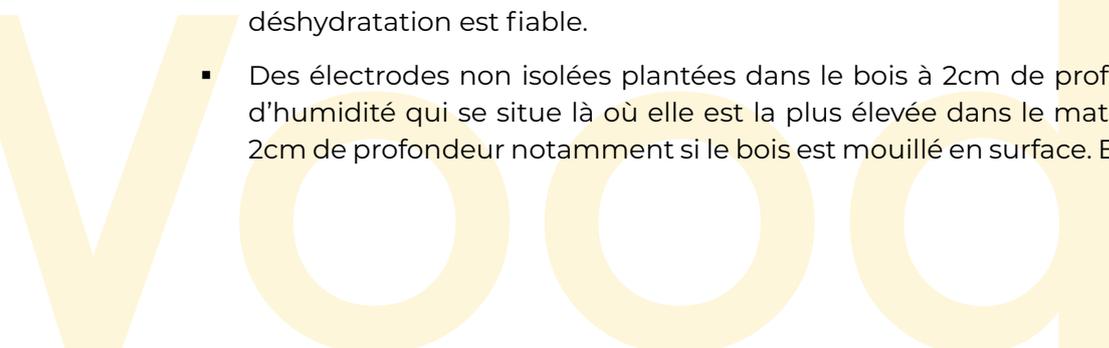
Ces appareils sont valables si la lecture est correctement corrigée en fonction :

- De la température du bois : Une élévation de température entraîne une diminution de la résistivité du bois anhydre ;
- De l'essence et de la densité du bois : Tenir compte des groupes (cf. Manuel d'utilisation) ;
- De la direction de la mesure : le bois est deux à trois fois moins résistant dans le sens longitudinal que dans le sens radial ou tangentiel. En général, les appareils sont étalonnés pour effectuer des mesures perpendiculaires aux fibres ;
- De la profondeur à laquelle on mesure l'humidité (attention aux électrodes non isolées).

## H. Quelques aberrations régulièrement rencontrées

On rencontre souvent des aberrations sources du manque d'informations et de connaissances du matériau. Ainsi, voici quelques rappels à connaître :

- Il est impossible de mesurer du bois vert par les méthodes électriques. Au-delà de 28% (jusqu'à 35% pour certains) les appareils vous indiqueront une valeur erronée. A titre d'exemple un H = 50% d'humidité peut aussi signifier 80%. Seule la méthode par pesée et déshydratation est fiable.
- Des électrodes non isolées plantées dans le bois à 2cm de profondeur donnera un taux d'humidité qui se situe là où elle est la plus élevée dans le matériau et pas forcément à 2cm de profondeur notamment si le bois est mouillé en surface. En effet, l'électricité prend





toujours le chemin le plus court ! Il est préconisé d'utiliser des électrodes isolées afin de mesurer avec précision le taux d'humidité en une profondeur donnée.

- Si vous souhaitez mesurer le taux d'humidité sur anhydre de vos bois en sortie de séchoirs, à l'aide d'un humidimètre à pointe ou à contact, il faut bien prendre en compte le paramètre « Température du bois ». En effet, ces appareils requièrent ce réglage pour donner une mesure précise. En sortant du séchoir, votre bois n'est pas à la température extérieure mais bien à la température de sortie de séchage qui est plus élevée.

## 4. L'équilibre hygroscopique du bois

### A. Humidité d'équilibre kézako ?

**Question :** Vers quel taux d'humidité va tendre ces deux pièces de bois en Chêne en les disposant longtemps dans un même environnement et des conditions climatiques stables (température et humidité relative) ?



**Figure 10 :** Bois ayant un taux d'humidité sur anhydre de 10%



**Figure 11 :** Bois ayant un taux d'humidité sur anhydre de 60% (Bois vert)

**Réponse :** Ils vont tendre vers le même taux d'humidité que l'on appelle l'équilibre hygroscopique.

**L'équilibre hygroscopique** ou « humidité d'équilibre » du bois est le taux d'humidité vers lequel tend le bois dans des conditions de température et d'humidité données qui ne varient pas. On le nomme « H% eq. », « HE », « UGL (allemand) » ou encore « EMC (Equilibrium Moisture Content) ». Cette humidité d'équilibre est pratiquement indépendante de l'essence du bois mais est fonction de deux caractéristiques la température  $T$  (°C) et l'humidité relative de l'air  $R_h$  (%).

Elle se mesure avec un thermo-hygro-mètre, au moyen des courbes de Keylwerth ou encore grâce aux buvards placés dans les séchoirs.

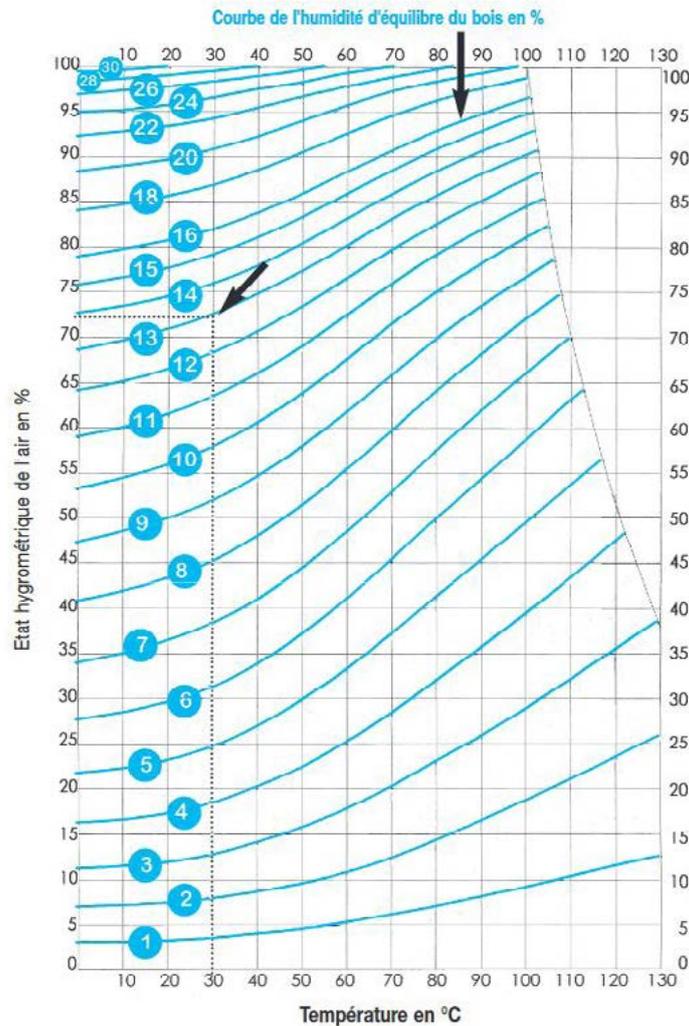


Figure 12 : Taux d'équilibre hygrométrique du bois (%) (Mémotech - Bois et matériaux associés, 2013)

❖ Exemple d'utilisation

**Exemple 1 :** Quel est l'humidité d'équilibre  $H_{eq}$  (%) d'une pièce de charpente disposée dans les conditions de température  $T=30^{\circ}C$  et d'humidité relative  $Rh$  (%) = 72 % ?

Réponse 1 :  $H_{eq}$  (%) = 13% environ.

**Exemple 2 :** Quel est l'humidité d'équilibre  $H_{eq}$  (%) d'une pièce de charpente disposée dans les conditions de température  $T=22^{\circ}C$  et d'humidité relative  $Rh$  (%) = 40 % ?

Réponse 2 :  $H_{eq}$  (%) = 7,5%.

Vous trouverez en « VII - Table des humidités d'équilibre » page 76, un tableau qui donne pour une température et une humidité relative donnée, l'humidité d'équilibre correspondante.

### B. Humidité d'équilibre : une variable importante

Sous le climat tempéré existant en France pendant la période la plus sèche, les conditions atmosphériques sont de l'ordre de  $20^{\circ}C$  et 70 % d'humidité relative de l'air (HR). Ceci correspond à un équilibre hygroscopique du bois d'environ **13%**. Pendant la période la plus humide, les conditions atmosphériques sont de l'ordre de  $0 - 5^{\circ}C$  et 85% d'humidité relative (HR), ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois de l'ordre de **19%**.

Ainsi, un ouvrage en bois situé à l'extérieur (fenêtres, volets, bardages) verra son humidité tendre vers 13 % en été et vers 19 % en hiver. Pour que le jeu du bois soit minimal, il faudra que son humidité se situe au milieu de la fourchette de variation, soit **15 à 16 %**. En finition extérieure, il faudra par ailleurs tenir compte des phénomènes de point de rosée<sup>8</sup> qui peuvent modifier considérablement l'humidité de la surface du bois.

Seuil pour l'extérieur	H <sub>r</sub> (%)	T (°C)	H <sub>éq.</sub> (%)	H <sub>bois</sub> à viser à l' <u>extérieur</u>
Été = Min	70	20	13	15 - 16%
Hiver = Max	85	0/+5	19	

De même, un bois situé à l'intérieur d'une maison chauffée verra son humidité varier selon les saisons. En été, les conditions de température et d'humidité relative de l'air sont voisines des conditions extérieures l'équilibre hygroscopique du bois est de l'ordre de 12 à 13 %. En revanche, en hiver, la température intérieure est de 20°C et l'humidité relative de l'air est voisine de 30 % l'humidité d'équilibre se situera autour de 7 %. L'humidité moyenne des bois lors de la fabrication des ouvrages intérieurs (parquets, lambris, portes) doit donc être voisine de **10%**.

Seuil pour intérieur	H <sub>r</sub> (%)	T (°C)	Héq. (%)	H <sub>bois</sub> à viser à l' <u>intérieur</u>
Hiver = Min	30	20	7	10 %
Été = Max	70	20	13	

On remarque bien que suivant l'utilisation du produit en intérieur ou extérieur, il faudra sécher à un taux d'humidité sur anhydre de manière rigoureuse pour éviter à notre produit d'avoir trop de jeu.

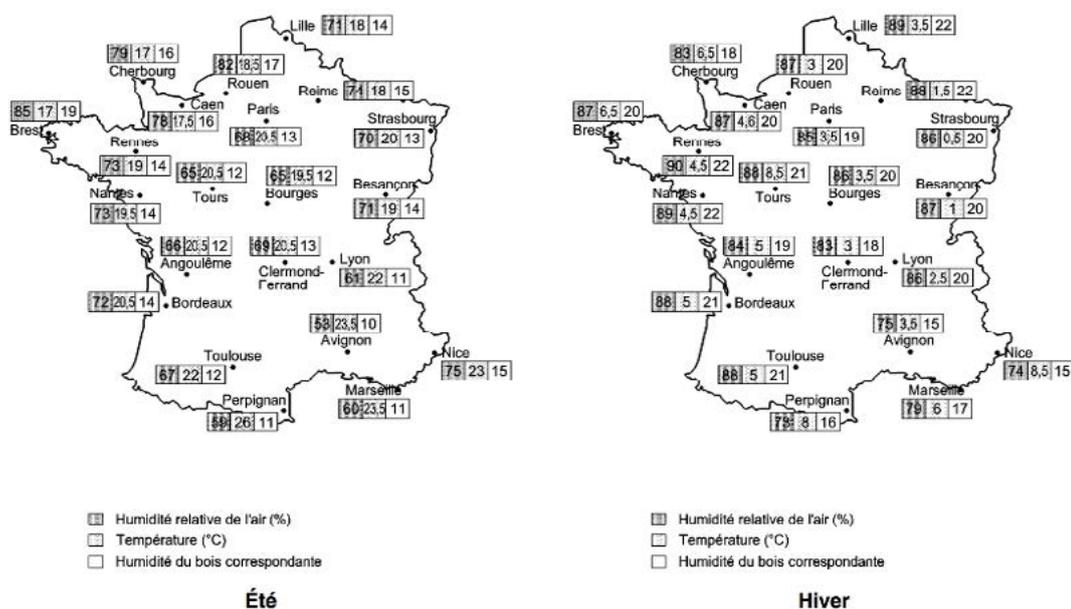


Figure 13 : Figure issue du DTU 41.2 « Revêtement extérieur » - Humidité

<sup>8</sup> Le point de rosée ou température de rosée est la température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise, à pression et humidité données, sans qu'il ne se produise une formation d'eau liquide par saturation.



Sécher le bois à un taux d'humidité d'équilibre afin d'anticiper ces variations dans le temps est d'ailleurs explicité dans plusieurs DTU<sup>9</sup> et on citera pour seul exemple le DTU 41.2 « Revêtements extérieurs en bois ». Cette notion très importante de l'humidité d'équilibre nous conduit naturellement à une autre notion : le taux d'humidité d'emploi des bois.

## 5. Taux d'humidité d'emploi

Il s'agit de l'humidité d'équilibre qui correspond aux conditions climatiques moyennes de l'endroit où il est employé. En France, on a pu déterminer des humidités d'emploi en tenant compte des moyennes climatiques sur une année à l'intérieur comme à l'extérieur. À ces données climatiques s'ajoutent des impératifs techniques dus par exemple aux opérations d'usinage, au collage ou encore au vernissage. On explique ainsi dans divers ouvrages techniques, qu'il faut atteindre un taux d'humidité en fonction de l'emploi final du produit. (cf. figure ci-dessous).

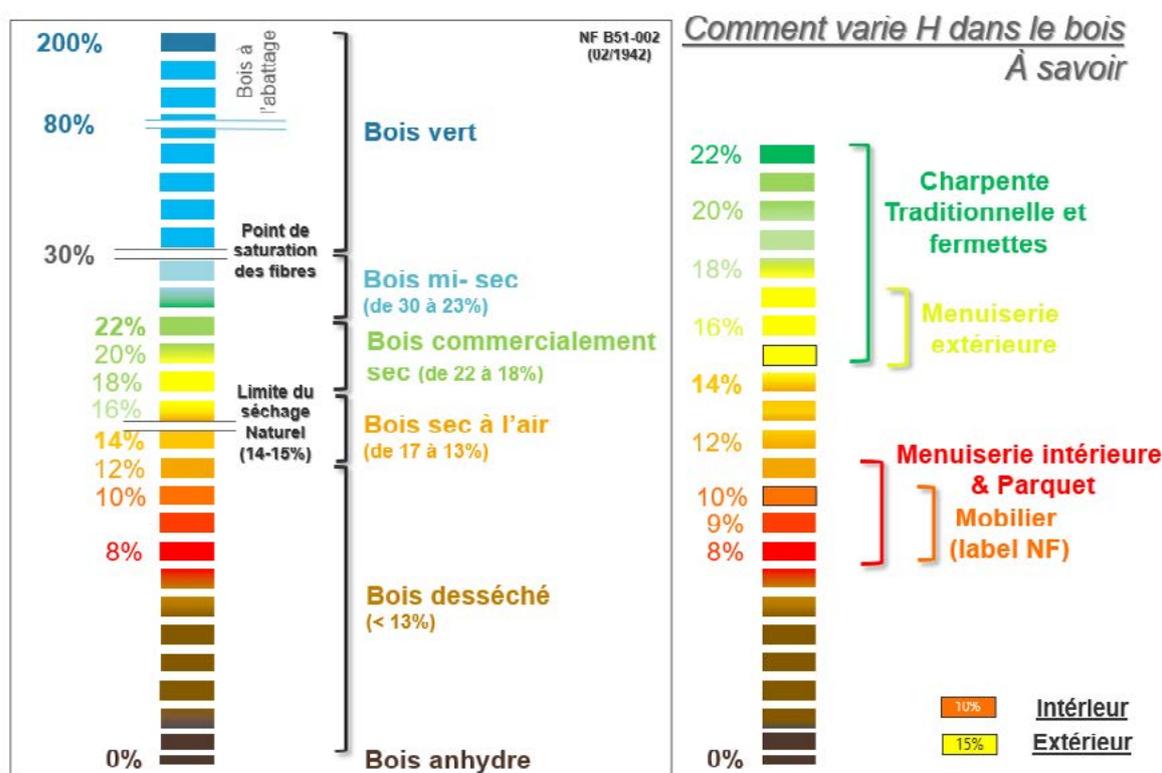


Figure 14 : Gauche : Appellation selon la NF B51-002<sup>10</sup>. Droite : Préconisation sur les taux d'humidité à viser selon le type d'emploi. (CRITBois, 2018)

Ainsi, si vous êtes charpentier, vos fermes devront avoir un taux d'humidité sur anhydre compris entre 18 et 22%. Un ébéniste souhaitera utiliser du bois compris entre 8 et 10%. De toutes évidences, un produit est soit disposé en extérieur, soit à l'intérieur. **Nous préconisons de toujours viser les humidités précisées à la page précédente, à savoir 10% pour des produits installés à l'intérieur et 15% pour des produits placés à l'extérieur.**

Ce dernier **propos est à nuancer** par un point important qui est l'opération de stockage du produit juste après le séchage. Si vous stockez un produit à H= 10% dans un hangar humide avant l'envoi en débit / usinage, il est certain qu'il reprendra de l'humidité.

9 DTU : Documents Techniques Unifiés.

10 NF B 51-002 (02/1942) : Bois - Caractéristiques physiques et mécaniques des bois.



Il est important de maîtriser l'opération post-séchage pour faciliter les opérations d'usinage et de collage par la suite. Certaines entreprises sèchent donc à un taux d'humidité légèrement plus bas afin de prendre en compte cette reprise d'humidité.

La partie « 10) Le stockage post séchage » page 56 évoque ces phénomènes de reprise d'humidité. Ces phénomènes sont bien sûr très variables et aléatoires selon la durée de stockage post séchage et les conditions de stockage.

## 6. Retrait et coefficient de rétractabilité

### A. Le retrait

Comme on la préciser p.14, en dessous du point de saturation des fibres, c'est-à-dire lorsque l'humidité d'une pièce de bois descend en dessous de 30% en moyenne, il n'y a plus d'eau libre au sein du matériau. C'est donc au tour de l'eau liée de s'évacuer. Or, lors de cette opération, la variation de l'humidité va être responsable de phénomènes de déformations provoquant le tassement du bois et une diminution de volume appelés « retrait ». On parlera à l'inverse de phénomène de « gonflement » lorsque le bois reprend de l'humidité. Ces deux phénomènes sont très sensibles à l'anisotropie du bois et ils ne s'exercent pas de la même manière ni de la même intensité suivant les directions axiale (longitudinale), radiale et tangentielle. Le retrait axial est considéré très faible, voire négligeable puisque 20 à 25 fois plus faible que le retrait radial. Le retrait radial est quant à lui deux fois inférieur au retrait tangentiel, ce dernier étant le plus important ou encore le plus pénalisant des trois.

Le retrait total est le pourcentage de variation dimensionnelle du bois, dans une direction donnée, entre le point de saturation des fibres et l'état anhydre. Pour une essence de bois donnée, le retrait total peut varier dans des proportions très importantes, en fonction des caractéristiques du sol et des conditions climatiques du lieu où l'arbre a poussé.

Le tableau ci-dessous donne des valeurs moyennes de retrait total pour des essences feuillues et résineuses courantes.

**Tableau 2 : Valeurs moyennes du retrait total des essences pyrénéennes.**

Essence	Retrait tangentiel total (%)	Retrait radial total (%)	Retrait volumique total (%)
Chêne	10,0	5,0	15,0
Hêtre	12,0	6,0	18,0
Sapin des Pyrénées	7,09	3,05	10,14
Pin sylvestre	8,0	5,0	13,0
Pin Radiata	*)	*)	*)
Pin à Crochets	*)	*)	*)

\*) Manque de données

## B. Le coefficient de rétractabilité

Les coefficients de rétractabilité moyens expriment, en pourcentage, la variation dimensionnelle du bois pour une différence d'humidité de 1% en dessous du point de saturation des fibres (PSF).

Le tableau ci-dessous, indique les coefficients de rétractabilité des essences pyrénéennes (on considèrera le retrait longitudinal nul) :

**Tableau 3 : Coefficients de rétractabilité des essences pyrénéennes.**

Essences	Coefficients de rétractabilités		
	Radial	Tangentielle (= 2 x retrait radial)	Volumétrique
Chêne	0,16	0,32	0,50
Hêtre	0,23	0,43	0,72
Sapin des Pyrénées	0,14	0,27	0,41
Pin Maritime	0,11	0,20	0,34
Pin Radiata	*)	*)	*)
Pin à Crochets	*)	*)	*)

\*) Manque de données

## C. Calcul du retrait

Le retrait (perte dimensionnelle) entre le point de saturation des fibres (30% en moyenne) et le taux d'humidité H, exprimé en % (compris entre 0 et 30) peut se calculer de deux manières :

---

---

Coefficient de rétractabilité volumétrique x (30 - H)

**OU**

Retrait total x (30 - H) / 30

---

---

À titre d'exemple, le retrait radial du chêne entre le point de saturation des fibres (30 %) et 12 % d'humidité finale est donc de  $0,17 \times (30 - 12) = 3,06 \%$ .

Désormais, vous en savez plus sur :

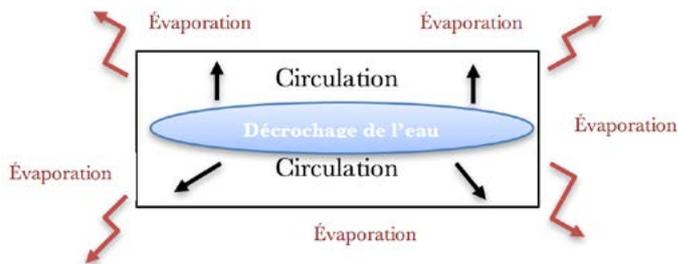
- Le matériau bois et ses 3 grandes propriétés ;
- Les eaux dans bois ;
- Les différentes méthodes de mesures du taux d'humidité sur anhydre ;
- Le vocabulaire à employer ;
- Les taux d'humidité à viser à l'intérieur et à l'extérieur ;
- Les calculs des coefficients de retrait et de rétractabilité.

Ces données théoriques vont vous permettre d'aborder maintenant le mécanisme du séchage afin de comprendre les phénomènes en jeu lorsque vous fermez la porte de votre séchoir !

## 7. Mécanismes du séchage

### A. Deux phénomènes importants : la circulation et l'évaporation.

Que ce soit dans le cadre du séchage naturel ou du séchage artificiel, il y a toujours le même mécanisme de séchage qui se traduit par deux phénomènes<sup>11</sup> (cf. Figure 15 ci-dessous) :



1. La circulation de l'eau du centre du matériau vers l'extérieur ;

2. L'évaporation de cette eau à l'intérieur du matériau et en surface.

Figure 15 : Mécanisme du séchage (CRITTBois, 2018)

Il est important de trouver le juste équilibre entre la circulation et l'évaporation de l'eau dans le bois. Si la circulation de l'eau s'effectue des zones humides vers les zones sèches, en théorie, il faut un gradient d'humidité du bois élevé mais il y aura de forts risques de dégradations. On retiendra donc qu'il est préférable d'appliquer une humidité relative de l'air élevée en début de séchage. (Humidification).

### B. Le sens de circulation de l'eau

L'eau dans le bois est présente sous forme liquide et sous forme vapeur. Lorsqu'il existe un gradient de température dans le bois, l'eau sous ces deux formes différentes, circule des zones chaudes vers les zones froides. C'est encore plus vrai pour l'eau sous forme de vapeur car lorsque la température augmente, la circulation de vapeur d'eau s'accélère. Il en est de même pour l'humidité puisque lorsqu'il existe un gradient d'humidité, l'eau va vouloir circuler des zones humides vers les zones sèches.

#### Gradient de température

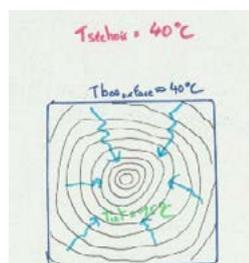


Figure 16 : Circulation des zones chaudes vers les zones froides (CRITTBois, 2018)

#### Gradient d'humidité

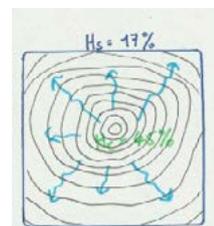


Figure 17 : Circulation des zones humides vers les zones sèches. (CRITTBois, 2018)

Si ces mécanismes s'opposent, c'est le **phénomène le plus fort qui impose le sens de circulation**

<sup>11</sup> Il y a trois phénomènes en réalité, le premier des phénomènes est appelé le décrochement. L'eau se décroche en effet des micelles avant d'entamer le phénomène de circulation. Cette omission volontaire n'a pas d'impact dans le cadre de ce guide.



de l'eau dans le bois. On comprend bien que ces différents paramètres vont influencer sur la circulation de l'eau au sein du matériau et peut être source de tensions et donc de défauts.

### C. Les facteurs influençant les mécanismes de séchage

Comme on l'a vu précédemment, la circulation et l'évaporation entraînent un gradient d'humidité. Un gradient d'humidité trop fort signifie que les parties externes du matériau bois commencent leur retrait, alors que les parties internes ont encore beaucoup d'eau libre. Il en résulte des tensions insupportables pour le bois et des déformations importantes. C'est ce gradient d'humidité qui est à l'origine de la circulation de l'eau dans le bois, du cœur vers l'extérieur. Des facteurs liés aux conditions de séchage influencent les phénomènes de circulation et d'évaporation (cf. Tableau 4 ci-dessous). On peut noter :

- La température de l'air ;
- L'humidité relative de l'air ;
- La vitesse de circulation de l'air dans l'enceinte du séchoir ;
- La pression ;
- Les caractéristiques du bois (essence, taux d'humidité, épaisseur, densité).

**Tableau 4 : Synthèse des facteurs influençant le séchage du bois (G. Gandon, OLERGIE)**

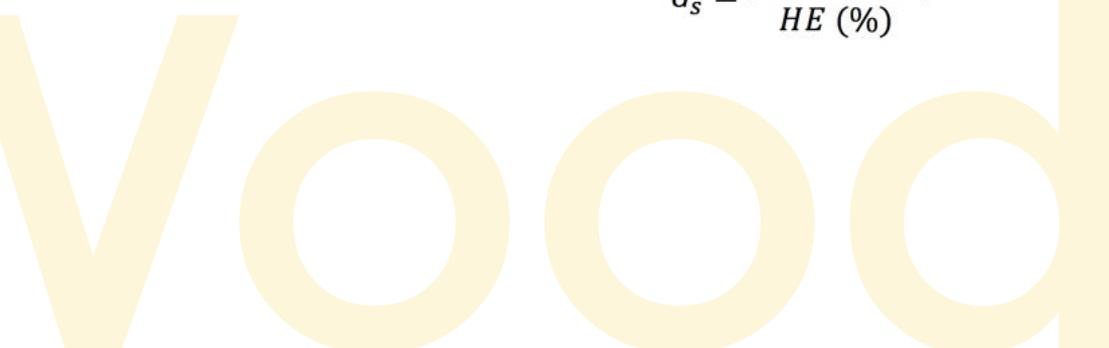
Bois	Air	T°C ↗	Humidité relative Rh (%) ↘	Vitesse (m/s) ↗	Pression (mb) ↘ (sous vide)
Circulation (Du cœur vers la surface)		↗↗	-	-	↗↗
Evaporation (De la surface vers l'extérieur)		↗	↗↗	↗↗	↗↗

On retiendra (hormis le facteur « pression » présent seulement dans les séchoirs sous vide), que **le facteur le plus influençant les mécanismes de séchage est la température**. Piloter un séchoir avec l'humidité relative de l'air ou la vitesse de circulation de l'air n'a aucun intérêt si ce n'est augmenter l'évaporation et donc créer des défauts.

### D. Le gradient de séchage

Le gradient de séchage est le rapport entre le taux d'humidité du bois en cours de séchage (indication donnée par les sondes) et l'équilibre hygroscopique du bois (indication donnée par le buvard dans le séchoir). On le note  $G_s$  et il s'exprime ainsi :

$$G_s = \frac{H\%(sonde)}{HE (\%)}$$



Un gradient de séchage élevé indique une intensité de séchage importante. Il faut savoir que les résineux supportent un gradient de séchage plus élevé que les feuillus. Un gradient de séchage de  $G_s = 2$  pour du chêne est correct, tout comme l'est un gradient de séchage  $G_s = 4$  pour du pin.

**Il est préférable d'avoir un gradient de séchage quasi-constant à tout moment du processus de séchage.**

## 8. Les défauts liés au séchage du bois

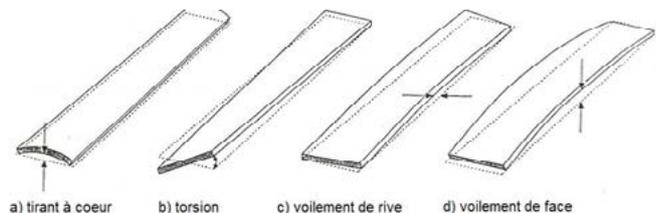
Le bois est donc sujet aux variations dimensionnelles et par conséquent, aux défauts. Il est très important de connaître leurs noms et leurs caractéristiques afin de les éviter ou d'être capable de les identifier afin de mieux maîtriser son processus de séchage et éviter tous défauts rédhibitoires à l'emploi du matériau. Voici donc les différents défauts que l'on peut rencontrer lors du séchage du bois :

- Déformation ;
- Discoloration / Coloration ;
- Bleuissement ;
- Fentes ;
- Collapse.

### A. Déformation

Quatre types courants de déformations peuvent apparaître suite au séchage de vos bois (cf. Figure 3 ci-dessous) :

- Flèche de face ou voilement de face ;
- Flèche de rive ou voilement de rive ;
- Gauchissement ou torsion ;
- Tuilage ou tirant à cœur.



**Figure 18 : Différents types de déformations (Moutee, 2006)**

### B. Discoloration / Coloration

La décoloration ou discoloration se traduit par un changement de couleur de certains acides contenus dans certaines essences. Le Chêne est très sensible à ce phénomène qui aura une teinte virant au gris brun. Le hêtre quant à lui aura une couleur rose.

#### ❖ La règle des 30 pour le Chêne et le Hêtre

Lorsque le taux d'humidité des bois est supérieur au Point de saturation des fibres soit aux alentours de 30% et que la température environnante est supérieure à 30°C, il y a un fort risque de discoloration. Pour l'éviter il faut bien respecter les deux premiers cycles de séchages (cf. 3) Le Chêne p.58 et 4) Le Hêtre p.61).

## C. Bleuissement

Le bleuissement est dû à des champignons à mycélium coloré, d'espèces variées, qui se développent presque uniquement dans les cellules vivantes. Le bleuissement se manifeste toujours par une teinte générale bleuâtre, parfois assez claire mais pouvant aller jusqu'au bleu foncé. Cette coloration peut être généralisée dans presque toute la masse du bois ou plus localisée comme dans les sections transversales du matériau.



**Figure 19 : Bleuissement** (CRITTBois, 2018)

On constate ce phénomène sur diverses essences résineuses de bois et particulièrement sur les pins. On note que le Sapin y est peu sensible. Ce phénomène modifie l'aspect mais pas les qualités techniques du matériau.

Le bleuissement apparaît toujours un certain temps après l'abatage sur les bois en grumes ou débités. On parvient à éviter le bleuissement en effectuant un séchage suffisamment rapide des bois débités peu après l'exploitation forestière.

## D. Fentes

### ❖ Fentes externes

Les fentes externes peuvent généralement se produire en début de séchage. Lorsque le cœur du bois est moins en avance sur le retrait que les parties en surface, ils résistent à la rétractation du bois de surface soumis à des contraintes de tension. Le cœur du bois par opposition est en contrainte de compression. Lorsque les tensions sont excessives, la surface du bois se rompt et créer ainsi des fentes externes.

### ❖ Fentes internes

Lorsque toute la masse du bois à un taux d'humidité sur anhydre inférieur au point de saturation des fibres (PSF), les zones internes sont soumises à des contraintes de traction et la surface à de la compression C'est-à-dire qu'il y a un gradient d'humidité trop élevé entre la partie centrale du sciage et sa surface. Si ces contraintes sont supérieures à la résistance mécanique, il apparaîtra des fentes internes, non visible de l'extérieur. Ce défaut est dû à un air trop sec quand les zones internes étaient encore au-dessus du PSF. L'effet apparaît donc après la cause. Le remède est d'appliquer une hygrométrie de l'air plus élevée dès le début du séchage.

### ❖ Fentes en bout



**Figure 20 : Fentes en bout sur du Hêtre en sortie de séchoir** (CRITTBois, 2018)

Les fentes en bouts sont également dues à une évaporation trop intense aux extrémités des planches, l'eau circulant en effet très facilement dans le sens longitudinal du bois.

### E. Collapse (Chêne)



**Figure 21: Collapse (effondrement cellulaire)**  
(ABARCO EXPERTISES)

Il s'agit d'effondrement cellulaires qui se caractérisent par des ondulations en surfaces. Ils sont souvent accompagnés de fentes. Le collapse se produit lorsqu'on applique une température de l'air trop élevée en début de cycle et que le bois est très humide. C'est un défaut grave pour lequel il n'y a pas de rattrapage possible. Le chêne est particulièrement sensible au collapse. On peut prévenir ce phénomène en maintenant en début de cycle une température assez basse.

Vous trouverez en annexe 4, un document du CRITTBois Occitanie sur le traitement des défauts. (page 90)

## 9. Maîtriser l'humidité relative après le séchage c'est maîtriser les défauts

Il arrive régulièrement que des défauts apparaissent après le séchage du bois et ce même si vous avez bien maîtriser les opérations en amont du séchage et les opérations de conduite du séchage. Le problème que l'on rencontre fréquemment est de croire que le taux d'humidité des bois en sortie du séchoir ne variera pas ou peu. Or, comme on l'a plusieurs fois expliqués dans ce guide, le bois est un matériau hygroscopique ce qui signifie que son taux d'humidité sur anhydre va varier en fonction des conditions climatiques dans lequel il est placé. Ces préconisations sont surtout valables pour les menuisiers ébénistes ou tout corps de métier travaillant du bois à un taux d'humidité entre 6 et 11 %.

Par conséquent, si vous disposez vos lots de hêtre séchés à 10% en extérieur quelques jours avant d'effectuer les opérations d'usinage ou de collage, vous risquez assurément d'avoir des défauts dues à la reprise d'humidité. Ces défauts de toutes natures, apparaîtront durant cette phase de conditionnement post séchage ou durant les opérations d'usinage/collage. Il en est de même pour des lots positionnés dans des hangars non fermés et très ventilés.

Les menuisiers travaillant des produits à faibles taux d'humidité peuvent se référer aux valeurs marquées en vert dans VII - Table des humidités d'équilibre page 76. Ces données démontrent qu'il faut maîtriser les conditions de température et surtout d'humidité relative de vos bâtiments de stockage des lots de bois séchés afin que les taux d'humidités des pièces de bois ne varient pas trop avant les opérations d'usinage et de collage.

Dans ces ateliers, pour des températures entre 15 et 25%, l'humidité relative doit impérativement être située entre 45 et 60%. Nous vous préconisons de cibler les 50-55%.



Pour maîtriser ce facteur, plusieurs dispositifs existent et plusieurs fournisseurs industriels pourront vous accompagner sur le type d'outils, le nombre, leur disposition et leurs fonctionnements.

Maintenant que les bases théoriques n'ont plus de secrets pour vous, il est temps d'évoquer la conduite du séchage. On va donc détailler les étapes essentielles à respecter, garantes de la bonne conduite d'un séchage du bois. Et comme ce guide se destine à donner des préconisations sur les essences pyrénéennes que sont le Chêne, le Hêtre, le Pin Radiata, le Pin Maritime, le Pin à Crochet et le Sapin Pectiné, nous aborderons en dernière partie des préconisations personnalisées par essence.

Les **deux chapitres** qui vont suivre vont aborder deux techniques de séchage : le séchage à l'air libre et le séchage artificiel.

Ces deux parties vont exposer un point similaire et très important pour que le séchage de vos produits se déroule correctement : **le baguettage et l'empilage de vos produits en amont du séchage.**

Ces deux procédés sont décisifs dans la qualité du séchage du bois puisque ces simples procédés mettent en application tout ce que l'on a pu voir précédemment au sujet des bases théoriques du bois. Ils sont garants pour une très large partie de votre technique de séchage.





1010

1010

1010



### III. Conduite du séchage À l'air libre

#### 1. Empilage et baguettage pour le séchage à l'air libre

##### A. Caractéristiques des baguettes

Pour que le bois sèche, il faut qu'il y ait échange avec l'air. Les planches qui viennent d'être sciées doivent donc être empilées dans un endroit aéré, voir ventilé. La constitution des piles a donc une très grande importance pour un bon résultat de séchage. Une pile est constituée de lits de planche superposées entre lesquels on dispose des baguettes. Celles-ci permettent la circulation de l'air entre les planches. Les dimensions des piles varient en fonction des impératifs locaux et des dimensions des planches ou des plots. La hauteur peut varier de 1 à 2m et la largeur de 1 à 2,5m en fonction du type de chariot élévateur possédé par l'entreprise. La longueur est celle des planches. Dans une même pile, on ne mettra que des bois de **même essence**, de **même épaisseur** et enfin de **même taux d'humidité initiale, dans la mesure du possible**.

Les baguettes doivent répondre à certains critères car un bon baguettage dépend souvent un bon séchage. On retiendra, notamment, pour les baguettes en bois, les critères suivants :

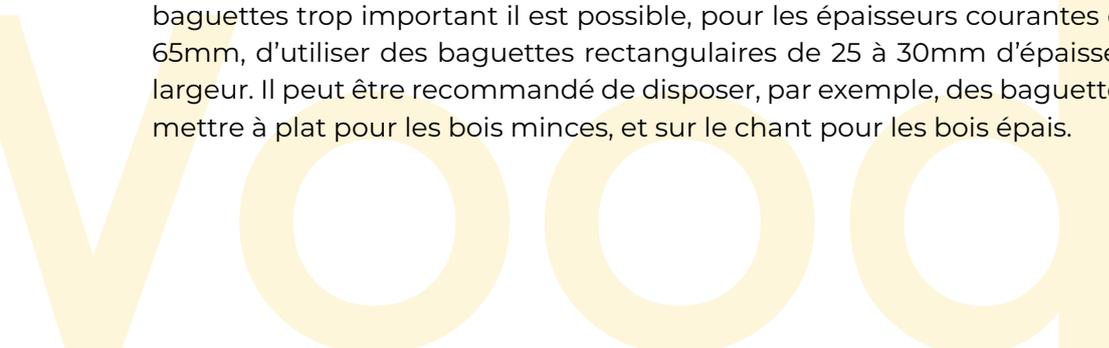
- Être séchées à l'air (c'est-à-dire entre 15 et 18%). L'essence a peu d'importance, mais on utilise souvent des résineux neutres comme le pin ou des feuillus tendres, sans aubier ;
- Être la plus droites possibles ;
- Être disposées lors de la constitution des piles, de façon qu'elles soient bien alignées, suivant une verticale et placées perpendiculairement au fil du bois ;
- Par ailleurs, la première et la dernière rangée de baguettes doivent être le plus près possible de l'extrémité des planches.

Enfin, la distance entre les rangées doit être en rapport avec l'épaisseur des planches. C'est à dire que plus les bois sont minces, plus les rangées de baguettes doivent être rapprochées. Et plus les bois sont épais, plus elles peuvent être écartées. On peut prendre comme base les valeurs indiquées dans le tableau ci-après :

**Tableau 5 : Caractéristiques des baguettes à employer pour le séchage naturel (CRITTBois, 2018)**

Épaisseur des bois (mm)	Épaisseur des baguettes (mm)	Écart des baguettes (cm)
18 à 20	20	30 à 40
20 à 35	25	40 à 50
40 à 50	30	50 à 60
50 à 65	35	70 à 80
65 à 80	40	90
Au-delà de 80	45	100

**Note :** Même si la géométrie carrée est préconisée, en pratique, pour éviter d'avoir un jeu de baguettes trop important il est possible, pour les épaisseurs courantes qui se situent entre 27 et 65mm, d'utiliser des baguettes rectangulaires de 25 à 30mm d'épaisseur et de 30 à 40mm de largeur. Il peut être recommandé de disposer, par exemple, des baguettes de 25 x 35mm et de les mettre à plat pour les bois minces, et sur le chant pour les bois épais.





Il est souvent souhaitable de ralentir la vitesse de séchage au bout des planches, une migration trop rapide de l'humidité favorise en effet l'apparition de fente plus ou moins importantes. Pour éviter ce phénomène, on peut **peindre l'extrémité de ces planches** ou plateaux avec de la peinture paraffine. Moins courant, on peut également clouer en bout des lattes de l'épaisseur des bois qui auront indirectement le rôle de limiter l'intensité de l'évaporation aux extrémités. D'autres entreprises utilisent des « S » métalliques de faibles épaisseurs qu'ils viennent fixer de la même manière en bout des planches.

### *B. L'air de stockage*



+ 50cm

Le sol sur lequel vont être disposées les piles doit être propre et dégagé de tous vieux morceaux de bois, herbes, etc. qui favoriseraient l'attaque de champignons ou d'insectes. Le sol doit être si possible goudronné ou recouvert de sable compact. Les piles sont posées sur des dés en béton de **50cm** de hauteur environ. Dans le cas de bois mince, les dés de béton sont espacés de façon que les rangées de baguettes correspondent aux plots de béton.

### *C. Disposition et orientation des piles*

Les piles ainsi constituées et correctement baguettées doivent être disposées sur le chantier de séchage. On peut alors les aligner en rangées parallèles avec, par exemple, deux piles côte à côte si elles ne sont pas trop larges et deux piles l'une sur l'autre. Les rangées de piles ont ainsi une longueur qui varie selon la surface disponible, une hauteur de 3 à 4 m et une largeur de 2 à 2,5 m.

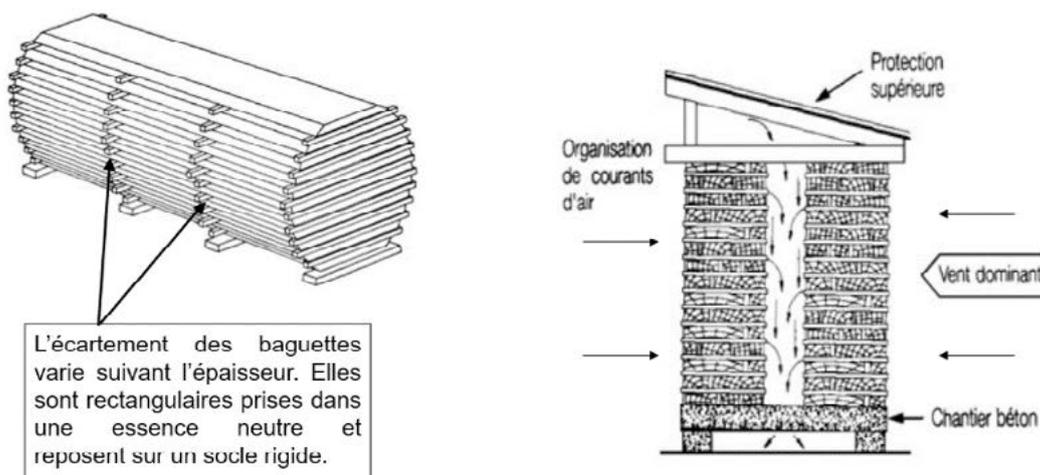
Pour deux rangées côte à côte, on doit respecter un intervalle de 60cm. Ensuite, entre ces doubles rangés, on constitue des allées dont la largeur dépend des engins de manutention.

L'orientation des piles est choisie en fonction des vents dominants qui doivent **souffler perpendiculairement à ces dernières**.

Le premier lit de planches ne doit pas être à moins de 50cm du sol de façon à ce que l'air humide et froid qui a tendance à s'accumuler à la partie basse des piles puissent être éliminé. Il faut comprendre que dans le séchage à l'air libre, s'il n'y a pas de vent, il se crée une circulation d'air naturelle de haut en bas, puisque l'air en s'humidifiant refroidit et donc descend.

Enfin, si cela est possible, il est préconisé de couvrir le haut des piles pour les protéger de la pluie ou d'un soleil trop fort.

**Le petit plus :** Dans certaines régions Pyrénéennes exposées à la neige, on pourra suspendre un filet (ce qu'on peut retrouver dans les récoltes de fruit) sur le haut de la pile ou sur le toit du hangar et on le fera tomber jusqu'au sol. La neige ne sera ainsi pas en contact avec les pièces de bois.



**Figure 22 : Disposition des piles de bois pour le séchage naturel** (G. Gandon, OLERGIE)

#### D. Date d'empilage et temps de séchage

Il ressort que la date d'empilage a une très grande influence sur la durée du séchage à l'air. Voici quelques exemples de temps en séchage à l'air libre :

**Tableau 6 : Quelques exemples de temps de séchage à l'air libre (CSTB)**

Essence	Épaisseur (mm)	Humidité du bois (%)		Période d'empilage	Temps de séchage (semaine)
		Initiale	Finale		
Sapin	27	60	20	Juillet	2
Sapin	27	120	20	Juillet	3
Hêtre	34	120	25	Mars	19 à 20
Chêne	27	85	20	Mars	19
Chêne	27	80	18	Décembre	26
Chêne	27	80	15	Décembre	32
Pin sylvestre	41	100	15	Mars	10

Toutes les essences ne sont pas mentionnées ici et ces données sont très variables. L'usage d'un humidimètre et d'une feuille de suivi est recommandé pour se façonner ses propres temps de séchage selon votre site géographique et les essences de bois séchées.

## 2. Avantages – inconvénients du séchage à l'air libre

Le séchage à l'air libre est une méthode simple à mettre en œuvre mais à l'inconvénient majeur d'être très aléatoire du fait des conditions météorologiques et topographiques qui sont propres à l'entreprise. L'autre inconvénient est la durée de séchage puisque l'entreprise doit immobiliser une grande quantité de bois sur son parc. Ces immobilisations physiques occupent de la surface au sol et représentent des immobilisations en capital. Par ailleurs, plus la clientèle est diversifiée et l'éventail des produits qu'elle demande est important, plus la surface au sol immobilisée pour le stockage est importante. La faible rotation des stocks engendre des temps de séchage importants et des hétérogénéités fréquentes d'humidité.

On notera dans un second temps que la pratique étant ancienne, elle est bien connue des scieurs, elle ne consomme aucunes énergies extérieures et a peut servir d'argument commercial aux clients attachés aux traditions. Voici une liste non exhaustive des avantages et inconvénients de ce procédé issue de (Le séchage des feuillus une nécessité économique, 1991):

### Avantages



### Inconvénients

Figure 23: Avantages et inconvénients du séchage à l'air libre (schéma reproduit selon (Le séchage des feuillus une nécessité économique, 1991, p. 50)



## IV. Conduite du séchage thermique

### 1. Les éléments d'une cellule de séchage

Les conditions qui règnent à l'intérieur d'un séchoir sont très rudes ; en effet, les températures peuvent atteindre 100°C voire 120°C, le degré hygrométrique de l'air peut atteindre les 100% et le bois au cours du séchage libère des acides qui peuvent attaquer fortement les parois du séchoir. Il ne faut pas omettre les conditions de température extérieures qui elles aussi peuvent varier entre -15°C et 40°C.

Une cellule correctement fabriquée doit donc répondre aux critères suivants :

- Avoir des dimensions adaptées aux besoins ;
- Etre bien isolée ;
- Etre étanche ;
- Avoir une porte pratique et fermant parfaitement.

Il existe sur le marché trois principaux types de séchoirs fonctionnant de manière différente.

### 2. Présentation des différents systèmes existants

Il existe trois grandes typologies de séchoirs :

- Le séchage à Air Chaud Climatisé ACC dit traditionnel ;
- Le séchage par pompe à chaleur dit par déshumidification ;
- Le séchage sous-vide.

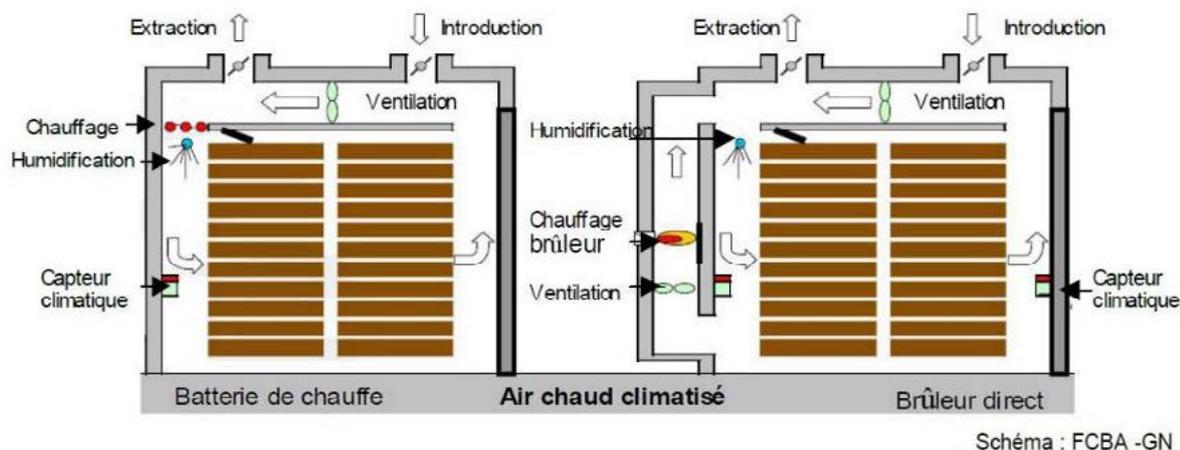
#### A. Le séchage à Air Chaud Climatisé (ACC) dit « traditionnel »

##### ❖ Présentation du séchage ACC

Des dispositifs de chauffage réchauffent de l'air pulsé par des ventilateurs. Ces dispositifs sont soit des résistances électriques soit des ailettes dans lesquelles circulent de l'eau chaude ou de l'huile chaude ou de la vapeur. Une fois l'air de la cellule réchauffé, les ventilateurs dirigent cet air sur la pile de bois. Le bois est porté à une température comprise entre 50 et 120°C auquel il prend l'humidité présente en surface. L'air est ensuite repris par les ventilateurs qui évacuent une partie de cet air par les cheminées vers l'extérieur tandis qu'une autre cheminée fait pénétrer l'équivalent de l'air sorti. Ce nouvel air se mélange à l'ancien. Le résultat est un air refroidi ayant perdu son humidité, il repasse par les éléments de chauffe et suit le parcours précédemment expliqué et ainsi de suite. Un dispositif d'humidification permet à tout moment de ré humidifier l'intérieur de la cellule si l'air est trop sec.



❖ Schéma de principe du séchoir ACC



**Figure 24: Le séchoir à Air Chaud Climatisé (G. Négrié, FCBA)**

❖ Quelques informations sur le séchage ACC

Domaine :	Résineux et feuillus Toutes épaisseurs
Capacité utile :	De 5 à 200m <sup>3</sup>
Procédé :	Moyenne température Haute température
Finalité :	Toutes plages d'humidité NIMP15
Fournisseurs :	Cathild (France), Bashild (Italie), Mûlhbock (Autriche), Incomac (Italie).
Investissements :	1,5K à 2,2K€ /m <sup>3</sup> Capacité utile (Cpu)

## B. Le séchage à déshumidification par Pompe à Chaleur (PAC)

❖ Présentation du séchage PAC

Un compresseur frigorigène comprime un fluide frigorigène qui est ensuite détendu. Le cycle compression-détente « produit du chaud » lors de la condensation du fluide et « produit du froid » lors de l'évaporation.

L'appareil comporte une batterie d'ailettes froides (3°C à 10°C) appelée évaporateur et une batterie d'ailettes chaudes (35°C à 70°C) appelée condensateur.

Un ventilateur force l'air chaud et sec à passer sur le bois puis dans les 2 batteries. Au contact de la batterie froide, l'air qui est chargé d'humidité en passant dans la pile de bois la perd par condensation. Ainsi, l'air redevient sec, il passe alors dans la batterie chaude qui le réchauffe. Le ventilateur force cet air chaud et sec à circuler dans la pile de bois où il prélève de l'humidité tout en lui transférant sa chaleur. Le cycle peut ainsi se perpétuer. L'air n'est jamais au contact de l'extérieur ce qui permet d'éviter, au maximum, les pertes calorifiques.



L'appareil est aussi doté de batteries de chauffe qui trouvent leur utilité au début du cycle. Leur rôle étant d'amener progressivement le bois à la température de la cellule, ceci est d'autant plus vrai en hiver.

La température de séchage peut varier entre 30 et 60°C. Il existe 2 grandes classes de fluide frigorigène mais nous vous conseillons l'utilisation de fluide HFC plus propre pour l'environnement.

Enfin, le système de batterie peut-être soit situé à l'intérieur de la cellule soit à l'extérieur.

❖ Schéma de principe du séchoir PAC

## POMPE A CHALEUR

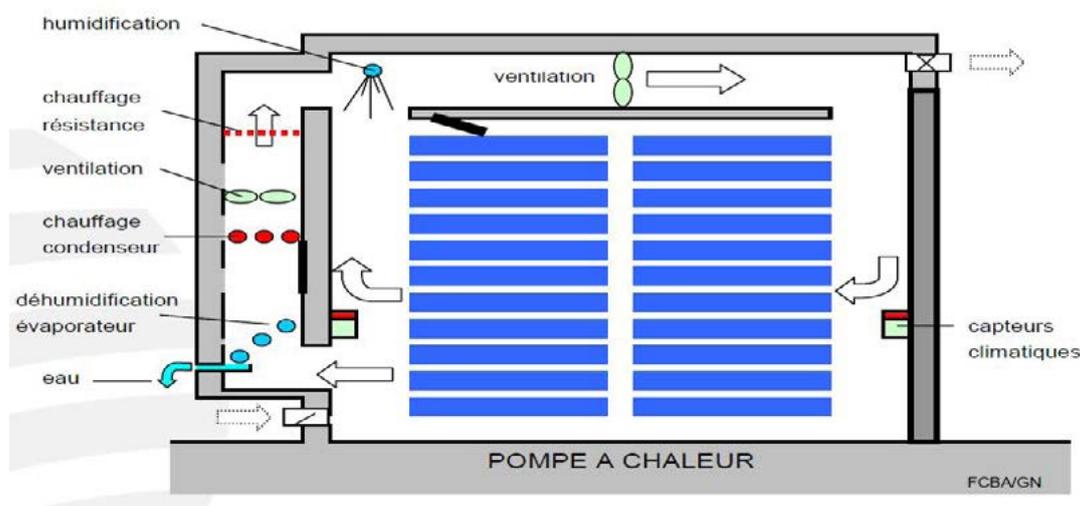


Figure 25 : Séchage par déshumidification (G. Négrié, FCBA)

❖ Quelques informations sur le séchage par déshumidification

Domaine :	Principalement feuillus Toutes épaisseurs
Capacité utile :	De 5 à 100m <sup>3</sup>
Procédé :	Circuit ouvert ou Circuit fermé
Finalité :	14% < H (%) < Bois vert Ressources énergétiques limités
Fournisseurs :	Incomac (Autriche), 3A (France), MS System...
Investissements :	2,2K à 2,7K€ / m <sup>3</sup> Cpu

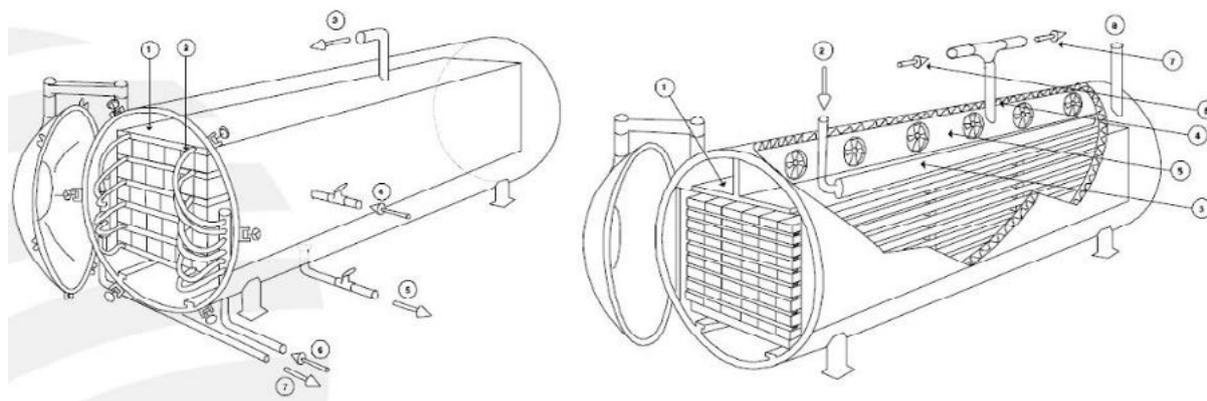
## C. Le séchage sous vide

### ❖ Présentation du séchage sous vide

Dans la cellule, on fait ce qu'on appelle « le vide ». L'augmentation de la pression favorise la circulation de l'eau dans le bois à basse température : du cœur vers la surface. Favoriser la circulation de l'eau dans l'épaisseur permet de diminuer le gradient de séchage d'où le risque de tensions internes ce qui signifie le risque de fentes. A noter également que les temps de séchage sont plus courts.

Les prix peuvent varier selon les fabricants à savoir que les différences résident dans la valeur du vide. Plus elle est basse et plus la durée des cycles de séchages sera raccourcie et la qualité améliorée. De la même manière, la température d'ébullition de l'eau dans le bois sera faible puisque à titre d'exemple dans un vide total, l'eau boue à 0°C

### ❖ Schéma de principe du séchoir sous vide



**Figure 26 : Séchage sous vide à plaques et à vapeur surchauffée (G. Négrié, FCBA)**

### ❖ Quelques informations sur le séchage sous vide :

Domaine :	Résineux et feuillus
Capacité utile :	De 1,5 à 80m <sup>3</sup>
Procédé :	Vide continu Vide discontinu Vapeur surchauffée
Finalité :	Vitesse de séchage Petit volume Fortes épaisseurs <sup>1</sup>
Fournisseurs :	Kronseeder (Allemagne), Maspell (Italie), Mühlbock, Eberl, Brunner, IWT
Investissements :	7K à 15K€ / m <sup>3</sup> Cpu



### 3. Comparaison des procédés de séchage selon différents critères

Le Tableau 7 ci-dessous compare les différents procédés de séchage selon plusieurs critères techniques :

**Tableau 7 : Tableau de comparaison des procédés selon plusieurs critères (G. Gandon, OLERGIE)**

Critères de choix	Air Chaud Climatisé	Pompe à chaleur	Sous vide
Essences	Feuillus ++ Résineux ++	Feuillus ++ Résineux +	Feuillus ++ Résineux +
Débits	Plots ++ Avivés ++	Plots ++ Avivés ++	Plots - Avivés ++
Epaisseurs	Toutes +	Moyennes & Fortes + Faibles -	Fortes ++
Taux d'humidité sur anhydre initial	Etat vert + Ressuyé ++	Etat vert ++ Ressuyé -	Etat vert - Ressuyé ++
Taux d'humidité sur anhydre final basses	+	-	++
Volume à sécher	Moyen à important	Faible à moyen	Faible à important
Energie de type déchet	Oui	Non	Oui
Electricité	Oui	Oui	Oui
Gaz ou Fioul	Oui	Non	Oui
Rendement énergétique	+	++	+
Temps de séchage	Rapide	Plutôt lent	Très rapide
++ : très favorable. + : favorable - : peu favorable ou peu conseillé			

- On retiendra que le séchage ACC est 1,5 fois plus rapide que le séchage par pompe à chaleur.
- On retiendra que le séchage sous vide est 3 à 8 fois plus rapide que le séchage ACC.



## 4. L'empilage – Baguettagage pour le séchage thermique

### A. Preamble

Le séchage du bois est obtenu par un apport d'énergie au matériau transmis par l'air qui passe à sa surface. Tout comme pour le séchage naturel, il est donc nécessaire que l'air puisse traverser la pile de bois. C'est la raison pour laquelle le bois doit reposer sur des baguettes.

Lors de son passage à travers la pile de bois, l'air se charge d'humidité qui provient du matériau et se refroidit en raison de l'évaporation de l'eau. Pour que le séchage soit homogène, il faut que les conditions d'air, de température et d'humidité relative ne se modifient pas beaucoup entre l'entrée et la sortie de cette pile. Il faut que le débit d'air, donc sa vitesse à travers la pile, soit suffisant.

L'air rencontre en effet une résistance à sa circulation tout au long de son passage et il y a par conséquent, une perte de charge qui augmente quand l'épaisseur des baguettes diminue. **Le choix des épaisseurs de baguettes doit être fonction de celle des échantillons de bois à sécher.**

Ensuite, l'écartement des rangées de baguettes est en rapport avec l'épaisseur des planches. L'alignement doit être parfait entre les baguettes. Chaque rangée de baguettes doit reposer sur un chevron à la partie inférieure de la pile et la dernière rangée de baguettes doit être le plus près possible de l'extrémité des planches.

### B. Types et dimensions des baguettes

En principe, des baguettes de section carrée sont le plus souvent utilisées. On retrouve régulièrement des sections de 20x20mm ou 27x27mm. C'est souvent le matériau bois qui est utilisé avec une essence la plus neutre possible. On pourra utiliser du pin sylvestre. Les baguettes doivent être sèches (10 à 15%) et saines.

Certaines entreprises utilisent des baguettes en aluminium de forme carré de mêmes dimensions.

La largeur des baguettes doit être suffisante pour ne pas « poinçonner » les bois tendres mais pas trop large non plus pour éviter d'obtenir des tâches. Il est préconisé de suivre le tableau ci-dessous :

**Tableau 8 : Dimensions des baguettes en fonction de l'épaisseur des sciages**

Épaisseur (E) des sciages (mm)	Épaisseur (e) des baguettes (mm)	Écartement (l) des rangées (cm)
$E < 30$	$18 < e < 20$ Exemple : 20mm	$40 < l < 60$ Exemple : 50cm
$30 < E < 55$	$20 < e < 27$ Exemple : 25mm	$60 < l < 100$ Exemple : 80cm
$55 < E < 80$	$27 < e < 35$ Exemple : 30mm	$80 < l < 150$ Exemple : 100cm
$E > 80$	$e = 35$	$100 < l < 150$ Exemple : 120cm

Par exemple, pour du chêne <30 mm, on veillera à utiliser des liteaux de 20x20mm et on espacera ces liteaux tous les 50cm.

### C. Exemple de bon et de mauvais empilage

#### Empilage correct



Les bois sont espacés entre eux d'1cm et le litage en bout est correctement réalisé.

#### Empilage incorrect



La première rangée de baguette est trop éloignée du bout.

#### Empilage correct



Les espacements sont précis et la superposition des baguettes correctement effectuées.

#### Empilage incorrect



La superposition des baguettes n'est pas effectuée correctement.

**Figure 27 : Bon et mauvais empilage (Crédits photos (CRITTBois, 2018))**

## 5. Opérations préliminaires au remplissage du séchoir

Avant de remplir votre séchoir, il est important d'effectuer les opérations suivantes :

- Vérifier les buses d'humidification et les nettoyer à l'eau vinaigrée le cas échéant ;
- Nettoyer toutes les sondes en enlevant les saletés car celles-ci pourraient fausser les mesures ;
- Changer vos buvards (mesure de l'humidité d'équilibre) avant chaque cycle de séchage (cf. image ci-dessous).

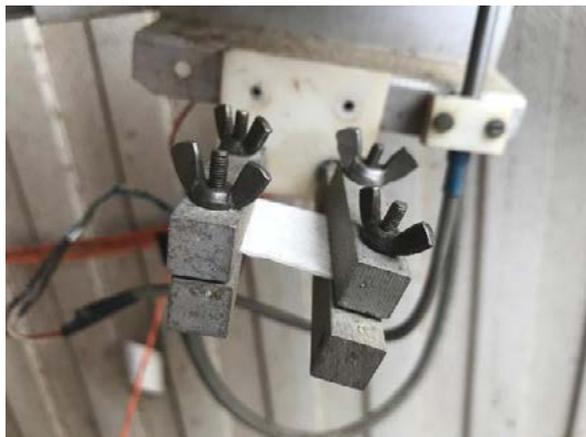


Figure 28 : Buvard à changer lors de chaque cycle (CRITBois, 2018)

### **Pour information :**

Les buvards sont des humidimètres utilisant les méthodes électriques résistives (cf. « Deux types de mesures possibles » page 17). Il nous indique lors du séchage, le taux d'humidité d'équilibre du bois dans les conditions où le séchoir se trouve à l'instant « t ». Le buvard **ne mesure pas** l'humidité de l'air à l'intérieur du séchoir.

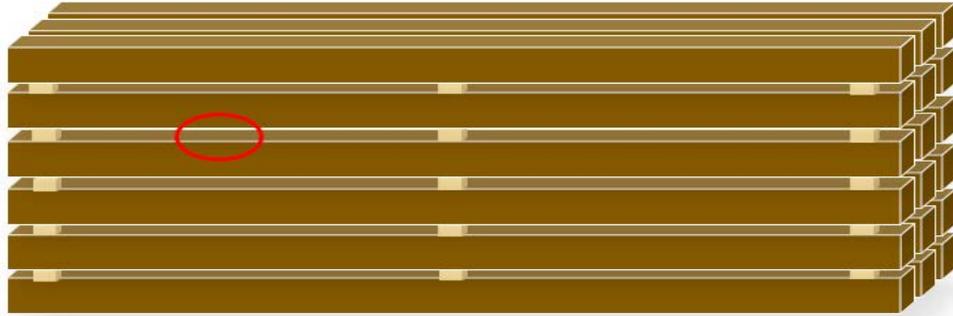
Si les sondes vous indiquent un  $H_{\text{équi.}}(\%) = 8\%$ , et que votre consigne est de 9%, alors il est probable que des organes de régulations soient défectueux.

## 6. La mise en place de vos paquets dans la cellule de séchage

Lors de la mise en place des paquets de produits dans le séchoir, on vous préconise de respecter les points suivants :

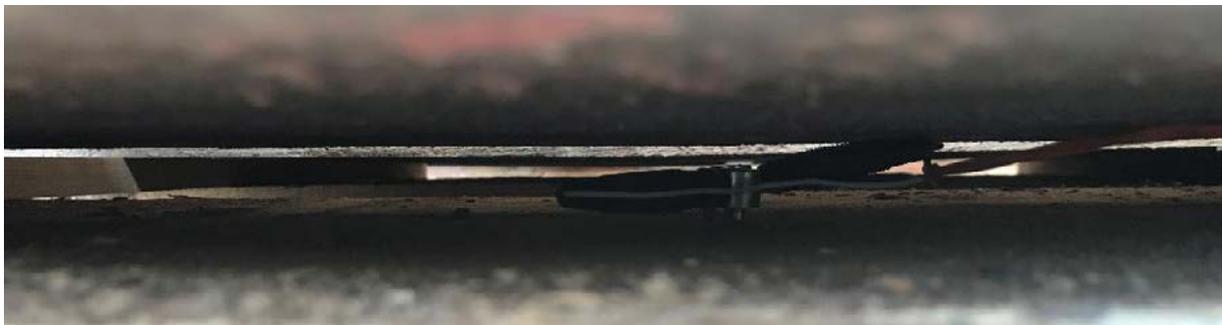
- Positionner les piles de façon à ce que le courant d'air circule perpendiculairement au fil du bois ;
- Mettre les bois les plus humides au fond du séchoir ou sur le devant du séchoir.
- Mettre les bois les plus secs au milieu de la cellule ;
- Même si nous ne sommes pas favorables au mélange d'épaisseur, en cas de mélange, mettre les épaisseurs les plus faibles au milieu de la cellule ;
- Positionner les paquets de sorte à ne pas créer de courant d'air trop important de part et d'autre de la pile ;

- Positionner des piles successives de même hauteur finale afin de ne pas créer de perturbations en hauteur.
- Positionner les sondes en priorité dans les piles au milieu du séchoir. Il est préférable de la positionner sur l'avant dernière pile en partant du bas (cf image ci-dessous).



**Figure 29 : Positionnement des sondes : Exemple possible de localisation des sondes (CRITTBois, 2018)**

- Il est préférable de positionner des sondes à cœur et des sondes en surface ;
- Mettre les sondes dans les bois de cœur, perpendiculairement au fil du bois, et sans traverser le bois avec un écartement d'environ 2,5cm. Prévoir des trous de perçage plus petit que le diamètre des sondes.

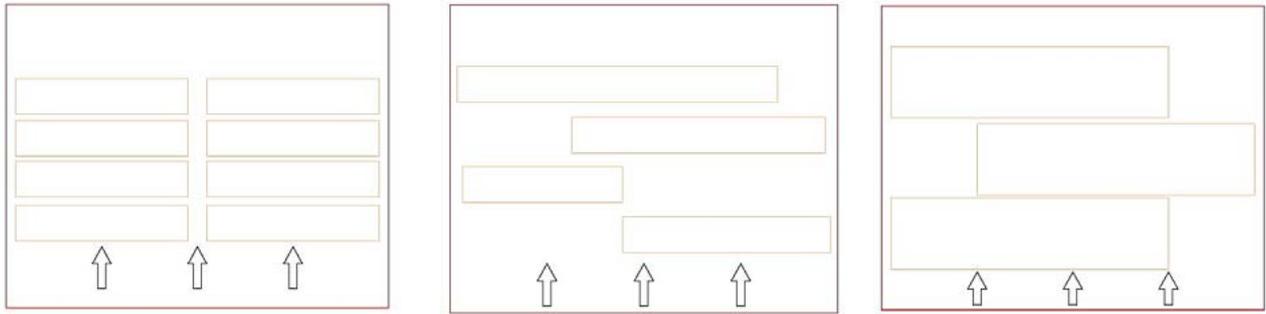


**Figure 30 : Sondes positionnées perpendiculaire au sens du fil, sous l'avant dernière rangée d'une palette. (CRITTBois, 2018)**

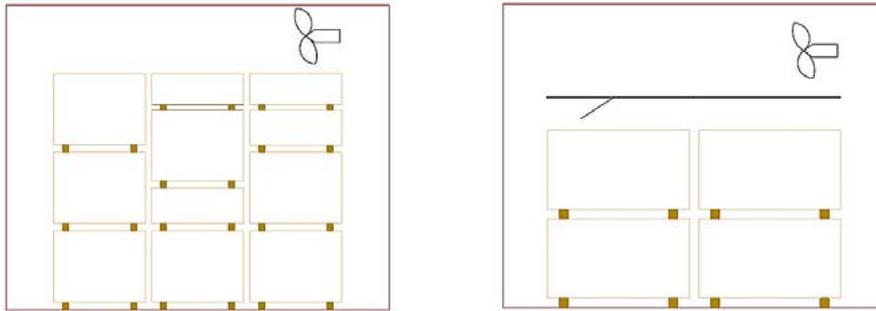
**A noter :** On préférera faire des avants trou à l'aide d'une perceuse dans les pièces de bois, plutôt que d'utiliser le marteau ou la masse pour enfoncer les sondes. Cette méthode permet de gagner en précision.



**Positionnement correct**

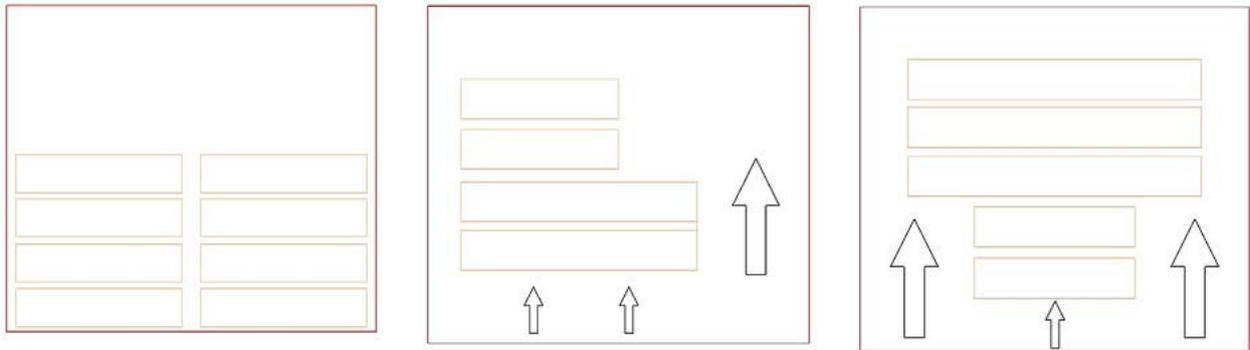


Vue de dessus – Positionnement correct

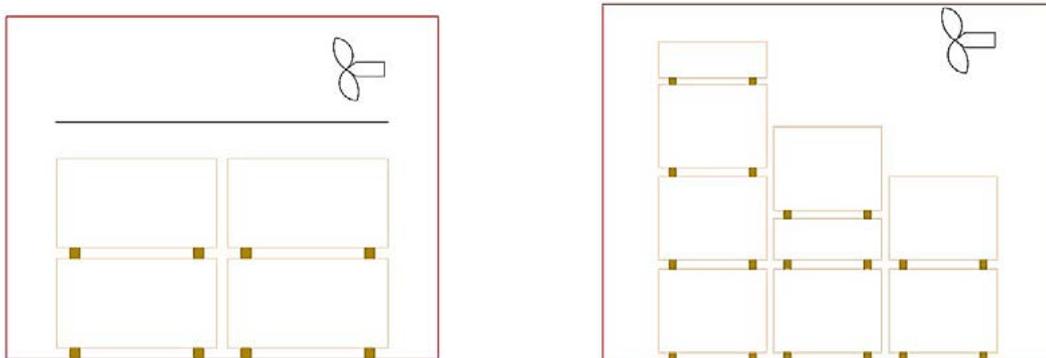


Vue de Face - Positionnement correct

**Positionnement incorrect**

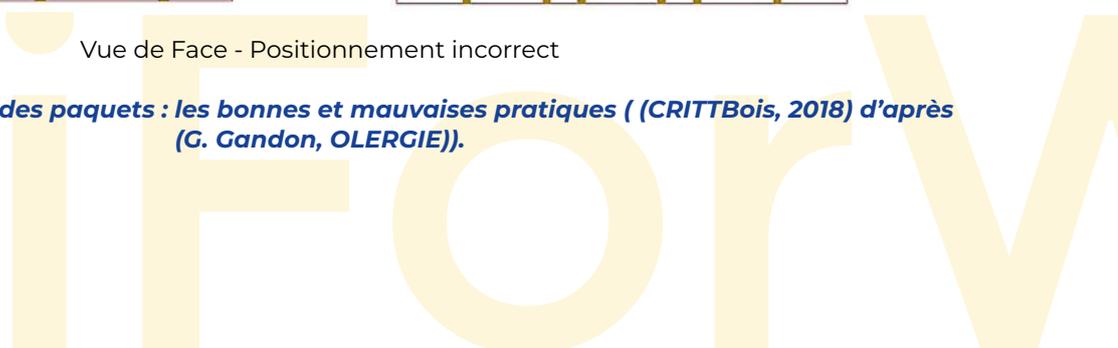


Vue de dessus – Positionnement incorrect



Vue de Face - Positionnement incorrect

**Figure 31 : Mise en place des paquets : les bonnes et mauvaises pratiques ( (CRITTBois, 2018) d'après (G. Gandon, OLERGIE)).**





## 7. Les cycles de séchage

Les séchoirs peuvent être configurés au moyen de programmes de séchage. Ces programmes sont définis pour :

- Une essence de bois ;
- Une épaisseur ;
- Un procédé de séchage ;
- L'humidité initiale ;
- L'humidité finale.

Dans certains cas, ils seront également définis selon la provenance du bois, sa qualité, une demande spécifique client etc.

Ces programmes, suivent obligatoirement un processus comprenant six « cycles de séchage » qui s'établissent dans l'ordre suivant :

- Préchauffage 1 ;
- Préchauffage 2 (chauffage à cœur) ;
- Séchage 1 ( $H (\%) > PSF$ ) ;
- Séchage 2 ( $H (\%) \leq PSF$ ) ;
- Equilibrage (Stabilisation) ;
- Refroidissement.

Ces différents cycles sont représentés sur des tables de séchage.

## 8. Les tableaux de séchage

Les tableaux de séchages sont le plus souvent représentés comme dans le Tableau 9 ci-dessous. On le rappelle, chaque tableau est à utiliser en lien avec une essence spécifique, une épaisseur spécifique, un procédé précis et des humidités initiales et finales données.

**Tableau 9 : Tableau vierge d'une table de séchage traditionnelle**

1	2	3	4	5	6
	PROGRAMME	Durée Cycle (heure)	HR (%) (Humidité à cœur (sonde))	T (°C)	HE (%)
S1	Préchauffage 1				
S2	Préchauffage 2				
S3	Séchage 1				
S4	Séchage 2				
S5	Équilibrage				
S6	Refroidissement				

**Explication :** Les programmes sont définis selon plusieurs paramètres. La colonne 3, donne la durée du cycle en heure. La colonne 4 donne le taux d'humidité du bois transmis par les sondes. Soit, vous relevez l'humidité moyenne de l'ensemble des sondes disposées dans les séchoirs. Soit, vous tenez compte de la sonde sur la valeur mesurée la plus élevée ou la plus faible. À noter qu'il est important de positionner les sondes à cœur et en surface et que nous vous conseillons de ne plus utiliser les sondes donnant des résultats aberrants.

Les deux dernières colonnes donnent la température qui doit régner dans la cellule et l'humidité d'équilibre de consigne.



## 9. Conduite du séchage

Le séchoir à bois se pilote en fixant l'humidité d'équilibre du bois ou en fixant l'humidité relative de l'air. Pour déterminer l'humidité d'équilibre, vous pouvez utiliser les courbes d'équilibre hygroscopique du bois (courbes de Keylwerth) qui donne l'humidité d'équilibre en fonction de l'humidité relative et de la température.

Une fois que vous avez choisi le bon programme de séchage et que le lancement du cycle de séchage est effectué, nous vous conseillons de contrôler régulièrement le déroulement du séchage et d'intervenir en cas de dérive. Dans certaines entreprises séchant du feuillus, la surveillance est effectuée toutes les deux heures. Dans d'autres entreprises, il n'y a jamais de suivi. Pourtant, sur l'ordinateur de bord, des informations vous sont fournies et des graphiques peuvent être affichés en direct. On peut notamment chez certains fabricants choisir les courbes à faire apparaître et vérifier que les consignes sont respectées.

C'est votre rigueur et votre prise d'expérience qui seront ici la seule garantie d'un séchage optimisé. Le conducteur du séchoir s'il n'est pas formé initialement à cette activité, doit prendre connaissance des bases théoriques sur le séchage et sur le matériau bois et s'imprégner des règles de base du séchage. Cette formation et cette implication seront gages d'un séchage et d'un suivi de qualité.

Voici ci-dessous, une proposition d'une fiche de suivi du séchage du CRITT.

**Tableau 10 : Fiche de suivi du séchage (CRITTBois, 2018)**

Séchoir N° :										
Début du Séchage :					Fin du séchage :					
Essence :					Epaisseur :					
Type de baguette :					Epaisseur :					
Volume de bois séché :										
Date	Heure	Sondes						T (°C)	HE (%)	Commentaire
		S1	S2	S3	S4	S5	S6			



## 10. Le stockage post séchage

Vous vous posez souvent la question suivante : les bois séchés à 8 – 10 ou 12%, vont-ils rester à ce taux d'humidité lorsque, sortis du séchoir, on ne peut les utiliser tout de suite ?

Comme il a souvent été mentionné dans ce guide, les bois ne sont jamais réellement stabilisés puisque c'est un matériau hygroscopique qui peut perdre ou reprendre de l'humidité selon l'ambiance qui l'entoure. Pour conserver les bois à l'humidité qu'ils ont atteinte en fin de séchage, il faudrait donc les stocker dans un air présentant des caractéristiques de température et d'hygrométrie qui correspondent à cette humidité.

- Dans les petites entreprises, la faible quantité de bois secs peut être stockée dans l'atelier où il règne en général un air relativement sec (parfois trop même pour les emplois extérieurs).
- Dans les grandes entreprises c'est un réel problème et l'idéal serait de posséder un hall climatisé. Si l'entreprise dispose d'un hangar, cela peut se réaliser à peu de frais : il est possible de disposer tout autour du hall des rangées de tuyaux à ailettes qui maintiendront pendant les périodes de froid une certaine température et un air plus sec qu'au dehors. Et l'été au contraire, il faudra humidifier l'atmosphère et pour cela on disposera au plafond du hall des diffuseurs d'humidité (vapeur ou eau pulvérisée). Le tableau « VII - Table des humidités d'équilibre » page 76 affiche en [vert](#), pour des températures entre 15 et 25°C, les humidités relatives à viser pour conserver des taux d'humidité des bois entre 8 et 11%.
- Dans le cas de scieries ou de négociants de bois, sécher les bois à des humidités basses (inférieur à l'humidité d'équilibre qu'aurait le bois lorsqu'il est stocké) ne sert à rien si on ne les livre pas immédiatement aux clients.

Pour des temps de stockage plus long, il est conseillé de dépiler les sciages puis de les réempiler bois sur bois afin de limiter toute reprise d'humidité et, par la même occasion, de diminuer le volume des paquets. Cette méthode, même si elle présente l'inconvénient de mobiliser un temps de manutention important, est cependant efficace contre la reprise d'humidité.



## V. Le séchage des essences pyrénéennes

### 1. Préambule

Nous allons dans ce dernier chapitre vous communiquer des données sur le séchage des essences pyrénéennes qui nous intéressent.

Les éléments qui vont suivre sont données à titre indicatif et sont à valider par une mise en application dans le respect des règles de l'art. Il va de soi que se contenter ou se limiter à ces données ne vous garantira pas un séchage de qualité puisque le séchage du bois regroupe les opérations en amont du séchage (séchage naturel, baguettage entre autres), et des opérations post séchage (lieu et condition climatique de stockage, transport...).

Ces données sont issues de retours de plusieurs entreprises, des données issues de la littérature et d'un fabricant français de séchoir ACC (Cathild®). Nous avons volontairement choisis de vous présenter des données exclusivement pour le séchage ACC car cette technologie représente 75 voir 80% des séchoirs.

### 2. Notes

Note 1 : Pour l'ensemble des tableaux, l'humidité d'équilibre de la phase d'équilibrage doit être calculée de telle manière que **HE = 0,85 x H% final**.

Note 2 : La phase de refroidissement n'a pas de durée fixe puisqu'elle dépend de la température extérieure. Il faut donc laisser le bois dans le séchoir tant que l'écart entre la température extérieure et la température du bois est supérieur de 30°C.

Note 3 : Ces tables ne conviennent pas pour les séchoirs sous-vides dans la mesure où le paramètre de pression n'apparaît pas. Nous vous conseillons d'adapter les données qui suivent avec les données de votre fournisseur de séchoir.

Note 4 : Les vitesses des ventilateurs (la vitesse de l'air) n'a pas été communiqué car cette donnée dépend fortement du séchoir que vous utilisez et fournir cette donnée serait contre-productif.

### 3. Le Chêne des Pyrénées

#### A. Propriétés physiques et mécaniques du Chêne

Voici ci-dessous des propriétés physiques et mécaniques du Chêne selon des essais normalisés sur plusieurs éprouvettes issue des fiches TROPIX © du CIRAD.

**Tableau 11 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Chêne**

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique (*)	740 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité (*)	13 300 Mpa
Contrainte à la rupture en flexion (*)	105 MPa
Contrainte à la rupture en compression axiale (*)	58 MPa
Dureté Monin (*)	4,2 (mi-dur)
Retrait tangentiel (H% = 0% à PSF)	9,7 %
Retrait Radial (H% = 0% à PSF)	4,5 %
Point de saturation des fibres (PSF)	31%
(*) Propriétés déterminées sur des bois stabilisés à 12%	

De plus, la norme NF B 52-001-1 qui vient d'être révisée (14 Avril 2018), nous donne la correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Chêne :

**Tableau 12 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Chêne (AFNOR, 2018)**

Classe visuelle selon NF B 52 001-1	Classe de résistance selon NF EN 338
1	D30
2	D24
3	D18
Pour plus d'informations sur les combinaisons, voir la norme NF B 52-001-1 (04/18)	

#### B. Propriétés liées au séchage du Chêne des Pyrénées

Vitesse de séchage : lente.

Risque de déformation : élevé.

Risque de cémentation : non.

Risque de gerces : élevé.

Risque de collapse : oui.

Cette essence est à sécher lentement et avec prudence.

### C. Table de séchage du Chêne des Pyrénées (épaisseur de 27 à 35mm)

PROG Chêne des Pyrénées	Durée Cycle (heure)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Préchauffage 1		26	16,0
2	Préchauffage 2	3	27	16,0
3	Séchage 1	> 50	28	15,0
		50-40	28	14,0
		40-35	28	13,5
		35-30	28	12,5
4	Séchage 2	30-27	29	11,0
		27-24	35	10,0
		24-21	40	8,5
		21-18	45	7,5
		18-15	53	6,5
		15-12	58	6,0
		12-09	61	5,0
09-06	63	4,5		
5	Équilibrage	8	54	
6	Refroidissement		30	

(Cathild®)

### D. Explications pour le Chêne des Pyrénées

**Tableau 13 : Détails cycle par cycle pour le chêne des Pyrénées (CRITBois, 2018)**

Cycle	Nom	Déroulement
Cycles 1/6	Préchauffage 1	Ce cycle permet de monter lentement à une température de 26°C.
Cycle 2/6	Préchauffage 2	On augmente légèrement à 27°C, et on augmente la vitesse de ventilation. Ce cycle assez court doit permettre d'éviter la cémentation et également les phénomènes de coloration.
Cycle 3/6	Séchage 1 (H (%) > PSF)	Le séchage 1 permet d'abaisser lentement l'humidité à cœur à 30% (PSF) à une température de 28°C
Cycle 4/6	Séchage 2 (H (%) ≤ PSF)	Une fois le PSF atteint, on augmente la température progressivement afin d'abaisser l'humidité à cœur.
Cycle 5/6	Equilibrage (Stabilisation)	On équilibre les bois à un taux d'humidité sur anhydre inférieur de 0,8 à 0,9 fois le taux d'humidité d'équilibre souhaité. <u>Exemple</u> : Si vous souhaitez des bois à Hf = 14%, vous viserez lors du cycle 5, un taux H=0,85 x 14 soit H= 11,9%.
Cycle 6/6	Refroidissement	On abaisse la température à l'intérieur du séchoir de sorte à avoir un écart de 30°C entre la température extérieure et la température du bois dans le séchoir. <u>Exemple</u> : T <sub>ext</sub> = 5°C. On pourra arrêter le dernier cycle de séchage lorsque les bois auront une température de 35°C.

## 4. Le Hêtre

### A. Propriétés physiques et mécaniques du Hêtre

Voici ci-dessous des propriétés physiques et mécaniques du Hêtre selon des essais normalisés sur plusieurs éprouvettes issue des fiches TROPIX © du CIRAD.

**Tableau 15 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Hêtre**

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique (*)	710 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité (*)	15 300 Mpa
Contrainte à la rupture en flexion (*)	111 MPa
Contrainte à la rupture en compression axiale (*)	57 MPa
Dureté Monin (*)	4,2 (mi-dur)
Retrait tangentiel (H% = 0% à PSF)	11,6 %
Retrait Radial (H% = 0% à PSF)	5,7 %
Point de saturation des fibres (PSF)	32%

(\*) Propriétés déterminées sur des bois stabilisés à 12%

De plus, la norme NF B 52-001-1 qui vient d'être révisée (14 Avril 2018), nous donne la correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Hêtre :

**Tableau 15 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Hêtre (AFNOR, 2018)**

Classe visuelle selon NF B 52 001-1		Classe de résistance selon NF EN 338
Combinaison 1 (H1 + H3)	H1	D40
	H3	D24
Combinaison 1 (H2 + H4)	H2	D35
	H4	D18

Pour plus d'informations sur les combinaisons, voir la norme NF B 52-001-1 (04/18)

### B. Propriétés liées au séchage du Hêtre

Vitesse de séchage : lente.

Risque de déformation : élevé.

Risque de cémentation : oui.

Risque de gerces : élevé.

Risque de collapse : oui.

Cette essence est sensible au bleuissement.



### C. Table de séchage du Hêtre (épaisseur de 27 à 35mm)

	PROG Hêtre	Durée Cycle (heure)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Préchauffage 1			50	17,0
2	Préchauffage 2	4		50	16,5
3	Séchage 1		> 50	53	15,2
			50-40	53	14,1
			40-35	54	13,9
			35-30	55	12,5
4	Séchage 2		30-27	57	11,0
			27-24	58	9,4
			24-21	59	7,9
			21-18	61	7,3
			18-15	62	6,1
			15-12	62	5,6
			12-09	72	5,0
5	Équilibrage	8		55	
6	Refroidissement			30	

(Cathild®)

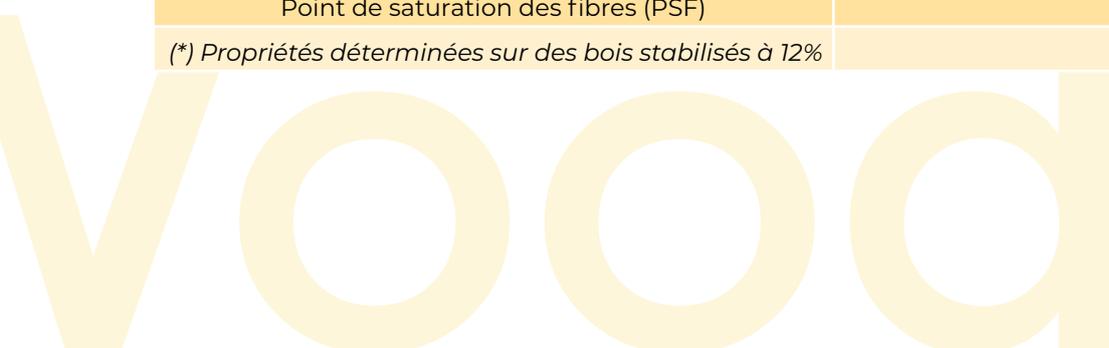
## 5. Le Sapin pectiné

### A. Propriétés physiques et mécaniques du Sapin pectiné

Voici ci-dessous des propriétés physiques et mécaniques du Sapin selon des essais normalisés sur plusieurs éprouvettes issue des fiches TROPIX © du CIRAD.

**Tableau 16 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Sapin**

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique (*)	490 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité (*)	14 300 Mpa
Contrainte à la rupture en flexion (*)	80 MPa
Contrainte à la rupture en compression axiale (*)	41 MPa
Dureté Monin (*)	2,5 (tendre)
Retrait tangentiel (H% = 0% à PSF)	8,7 %
Retrait Radial (H% = 0% à PSF)	4,0 %
Point de saturation des fibres (PSF)	29%
(*) Propriétés déterminées sur des bois stabilisés à 12%	



De plus, la norme NF B 52-001-1 qui vient d'être révisée (14 Avril 2018), nous donne la correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Sapin Pectiné :

**Tableau 17 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Sapin Pectiné (AFNOR, 2018)**

Classe de résistance Essence	ST-I	ST-II	ST-III	ST-IV
Sapin Pectiné	C30	C24	C18	-

### B. Propriétés liées au séchage du Sapin Pectiné

Vitesse de séchage : rapide.

Risque de déformation : élevé.

Risque de cémentation : non, pas de risque connu.

Risque de gerces : élevé.

Risque de collapse : non.

### C. Table de séchage du Sapin Pectiné (épaisseur de 27 à 35mm)

	PROG Sapin Pectiné	Durée Cycle (heure)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Préchauffage 1			50	14
2	Préchauffage 2	6		55	12,5
3	Séchage 1		> 50	62	12
			50-40	62	11,5
			40-35	62	10
			35-30	62	9
4	Séchage 2		30-27	65	8
			27-24	65	7,5
			24-21	65	7
			21-18	65	6,5
			18-15	65	6
			15-12	67	5
			12-09	70	4
			09-06	70	3,5
5	Équilibrage	12		54	
6	Refroidissement			30	

(Cathild®)

## D. Explications pour le Sapin Pectiné

**Tableau 18 : Détails cycle par cycle pour le Sapin Pectiné (CRITBois, 2018)**

Cycle	Nom	Déroulement
Cycles 1/6	Préchauffage 1	Ce cycle permet de monter lentement à une température de 50°C.
Cycle 2/6	Préchauffage 2	On augmente encore la température à 55°C et on accélère la vitesse de ventilation.
Cycle 3/6	Séchage 1 (H (%) > PSF)	Le séchage 1 permet d'abaisser l'humidité à cœur à 30% (PSF) en stabilisant la température autour de 62°C.
Cycle 4/6	Séchage 2 (H (%) ≤ PSF)	Une fois le PSF atteint, on augmente la température progressivement jusqu'à 65°C afin d'abaisser l'humidité à cœur entre 15 et 18%
Cycle 5/6	Equilibrage (Stabilisation)	On équilibre les bois à un taux d'humidité sur anhydre inférieur de 0,8 à 0,9 fois le taux d'humidité d'équilibre souhaité. <u>Exemple</u> : Si vous souhaitez des bois à Hf = 14%, vous viserez lors du cycle 5, un taux H=0,85 x 14 soit H= 11,9%.
Cycle 6/6	Refroidissement	On abaisse la température à l'intérieur du séchoir de sorte à avoir un écart de 30°C entre la température extérieure et la température du bois dans le séchoir. <u>Exemple</u> : T <sub>ext</sub> = 5°C. On pourra arrêter le dernier cycle de séchage lorsque les bois auront une température de 35°C.

## 6. Le Pin sylvestre

### A. Propriétés physiques et mécaniques du Pin Sylvestre

Voici ci-dessous des propriétés physiques et mécaniques du Pin Sylvestre selon des essais normalisés sur plusieurs éprouvettes issues des fiches TROPIX © du CIRAD.

**Tableau 19 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Pin Sylvestre**

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique (*)	550 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité (*)	12 900 Mpa
Contrainte à la rupture en flexion (*)	105 MPa
Contrainte à la rupture en compression axiale (*)	58 MPa
Dureté Monin (*)	2,6 (tendre)
Retrait tangentiel (H% = 0% à PSF)	9,7 %
Retrait Radial (H% = 0% à PSF)	4,5 %
Point de saturation des fibres (PSF)	30 - 31%
(*) Propriétés déterminées sur des bois stabilisés à 12%	

De plus, la norme NF B 52-001-1 qui vient d'être révisée (14 Avril 2018), nous donne la correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Pin sylvestre :

**Tableau 20 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Pin Sylvestre (AFNOR, 2018)**

Classe de résistance Essence	ST-I	ST-II	ST-III	ST-IV
Pin sylvestre	C30 <sup>1)</sup>	C24	C18	C14 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Ces catégories ne sont pas répertoriées dans la NF EN 1912 (Bois de structure – Classes de résistances – Affectation des classes visuelles et des essences)

### B. Propriétés liées au séchage du Pin Sylvestre

Vitesse de séchage : rapide à normale.

Risque de déformation : peu élevé.

Risque de cémentation : non.

Risque de gerces : peu élevés.

Risque de collapse : non.

### C. Table de séchage du Pin Sylvestre (épaisseur de 27 à 35mm)

PROG	Pin Sylvestre	Durée Cycle (heure)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Préchauffage 1			60	14,0
2	Préchauffage 2	3		65	12,0
3	Séchage 1		> 50	68	10,0
			50-40	70	9,1
			40-35	70	8,7
			35-30	70	7,9
4	Séchage 2		30-27	72	7,0
			27-24	72	6,3
			24-21	75	5,5
			21-18	75	4,9
			18-15	75	4,3
			15-12	80	3,9
			12-09	80	3,4
			09-06	80	3,2
5	Équilibrage	6		73	
6	Refroidissement				

(Cathild®)



## 7. Le Pin Radiata

Le Pin Radiata est avec le Pin à Crochets parmi les essences dont nous avons le moins d'informations sur les propriétés et les caractéristiques de séchage. Néanmoins, plusieurs travaux engagés ces dernières années nous ont permis d'en savoir un peu plus sur cette essence.

### A. Propriétés physiques et mécaniques du Pin Radiata

Voici ci-dessous des propriétés physiques et mécaniques du Pin Radiata selon des données fournies par un site Néo-Zélandais, [www.nzwood.co.nz/](http://www.nzwood.co.nz/).

**Tableau 21 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Pin Radiata**

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique (*)	460 à 560 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité (*)	8 300 Mpa
Contrainte à la rupture en flexion (*)	85,8 MPa
Contrainte à la rupture en compression axiale (*)	36,8 MPa
Dureté Monin (*)	1,6 à 2,2 (tendre)
Point de saturation des fibres (PSF)	35%

(\*) Propriétés déterminées sur des bois stabilisés à 12%

### B. Table de séchage du Pin Radiata (épaisseur de 27 à 35mm)

PROG	Pin Radiata	Durée Cycle (heure)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Préchauffage 1			65	14,0
2	Préchauffage 2	3		70	12,0
3	Séchage 1		> 50	73	10,0
			50-40	75	9,1
			40-35	75	8,7
			35-30	75	7,9
4	Séchage 2		30-27	77	7,0
			27-24	77	6,3
			24-21	78	5,5
			21-18	78	4,9
			18-15	80	4,3
			15-12	80	3,9
			12-09	80	3,4
			09-06	80	3,2
5	Équilibrage	6		73	
6	Refroidissement			58	

(Cathild®)



## 8. Le Pin à crochets

Le Pin à crochets est parmi les 6 essences travaillées dans ce guide, celle dont on a le moins d'informations sur ses propriétés et ses caractéristiques de séchage. A titre d'information, il n'existe pas de table de séchage pour cette essence. Néanmoins, plusieurs travaux engagés ces dernières années nous ont permis d'en savoir un peu plus sur cette essence.

### A. Propriétés physiques et mécaniques du Pin à crochets

Voici ci-dessous des propriétés physiques et mécaniques du Pin à Crochets selon des essais normalisés sur plusieurs éprouvettes provenant de 9 placettes différentes des Pyrénées catalanes (France) issue du projet UNCI'PLUS.

**Tableau 22 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Pin à crochets (CENTRE DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES FORESTIÈRES DE CATALOGNE, 2012)**

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique (*)	474 à 526 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité (*)	10 300 à 13 500 Mpa
Contrainte à la rupture en flexion (*)	87,7 à 102,7 MPa
Contrainte à la rupture en compression axiale (*)	40,5 à 45,8 MPa
Dureté Monin (*)	1,6 à 2,2 (tendre)
Retrait tangentiel (H% = 0% à PSF)	7,8% à 8,9%
Retrait Radial (H% = 0% à PSF)	3,5% à 4,5%
Point de saturation des fibres (PSF)	27,4% à 29,1%
(*) Propriétés déterminées sur des bois stabilisés à 12%	

De plus, la norme NF B 52-001-1 qui vient d'être révisée (14 Avril 2018), nous donne la correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Pin à Crochets :

**Tableau 23 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Pin à Crochets (AFNOR, 2018)**

Essence	Classe de résistance			
	ST-I	ST-II	ST-III	ST-IV
Pin à crochets Catalan	C22 <sup>1)</sup>	C18 <sup>1)</sup>	C18 <sup>1)</sup>	C14 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Ces catégories ne sont pas répertoriées dans la NF EN 1912 (Bois de structure – Classes de résistances – Affectation des classes visuelles et des essences)



## B. Nos conseils pour la table de séchage du Pin à crochets

Il n'existe pas de table de séchage pour cette essence. Lorsque l'on est dans cette situation, il est d'usage de trouver une essence ayant des propriétés physiques et mécaniques similaires et d'utiliser la table de séchage de cette essence de façon « adoucie ». Puis au fur et à mesure des cycles de séchages, il vous faudra très certainement ajuster un paramètre en fonction des problèmes ou des défauts rencontrés lors des cycles précédents. Ce n'est qu'ainsi que vous pourrez vous constituer votre table de séchage pour cette essence.

Au travers de nos recherches et de nos rencontres, nous n'avons pas trouver de retours d'expériences qui pourrait orienter la manière de sécher cette essence.

Nous proposons néanmoins une table de séchage pour le Pin à crochets. Nous rappelons encore une fois que les données qui vont suivre sont données à titre indicatif et sont à valider par une mise en application dans le respect des règles de l'art. Il va de soi que se contenter ou se limiter à ces données ne vous garantira pas un séchage de qualité puisque le séchage du bois regroupe les opérations en amont du séchage (séchage naturel, baguettage entre autres), et des opérations post séchage (lieu et condition climatique de stockage, transport...).

	PROG Pin à Crochets	Durée Cycle (heure)	HR (%)	T (°C)	HE (%)
1	Préchauffage 1			60	14,0
2	Préchauffage 2	3		65	12,0
3	Séchage 1		> 50	68	10,0
			50-40	70	9,1
			40-35	70	8,7
			35-30	70	7,9
4	Séchage 2		30-27	72	7,0
			27-24	72	6,3
			24-21	75	5,5
			21-18	75	4,9
			18-15	75	4,3
			15-12	75	3,9
			12-09	77	3,4
			09-06	77	3,2
5	Équilibrage	6		73	
6	Refroidissement				





## VI - Résumé des bonnes pratiques et nos conseils

### 1. Mesurer l'humidité

Nous vous conseillons dans l'usage quotidien l'utilisation des méthodes électriques pour sa rapidité. Les mesures doivent être correctement effectuées au risque d'avoir une valeur erronée. N'oubliez pas de respecter les éléments suivants :

- Le choix de l'essence de bois ;
- La température du bois ;
- Utiliser des électrodes (pointes) isolées électriquement jusqu'à leurs extrémités ;
- Les électrodes doivent être placées perpendiculairement au fil du bois.
- Effectuer pour une pièce de bois une mesure à la surface en premier pour obtenir  $H_s$  puis une mesure à cœur pour obtenir  $H_c$  et ainsi calculer le Gradient d'humidité  $G_n$  afin d'évaluer l'homogénéité ;
- Renseigner les valeurs lues et calculées sur plusieurs échantillons d'une palette ou d'un lot sur des fiches de suivies.

Rappel : Souvenez-vous qu'un résultat supérieur à 35% ne signifiera rien puisque l'appareil n'est précis que sur la plage 6-35%. Seule la méthode par pesée peut vous donner un résultat probant et ce sur toutes les plages.

### 2. L'empilage et le baguettage

Que ce soit pour le séchage à l'air libre ou le séchage artificiel, veuillez respecter les éléments suivants :

#### ❖ Baguette :

Les baguettes doivent :

- Être sec ( $H=15$  à  $18\%$  maximum) ;
- Être en Pin ou provenant d'un feuillus tendre et sans aubier ;
- Être le plus droit possible.

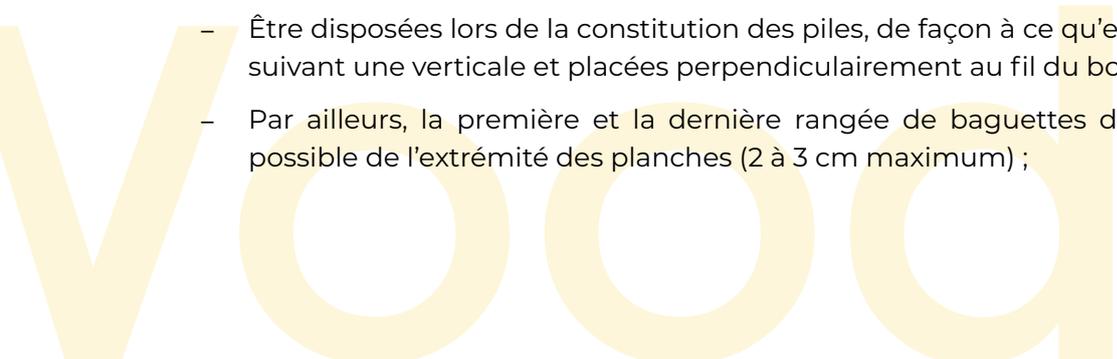
#### ❖ Lot de bois à sécher :

Les pièces de bois à sécher doivent :

- Être de même essence et de même épaisseur ;
- Avoir un taux d'humidité initial le plus homogène possible.

#### ❖ Baguettage :

- Être disposées lors de la constitution des piles, de façon à ce qu'elles soient bien alignées, suivant une verticale et placées perpendiculairement au fil du bois ;
- Par ailleurs, la première et la dernière rangée de baguettes doivent être le plus près possible de l'extrémité des planches (2 à 3 cm maximum) ;



- Pour le **séchage à l'air libre**, veuillez à respecter les épaisseurs des baguettes et les écarts entre elles selon le tableau suivant :

Épaisseur des bois (mm)	Épaisseur des baguettes (mm)	Écart des baguettes (cm)
18 à 20	20	30 à 40
20 à 35	25	40 à 50
40 à 50	30	50 à 60
50 à 65	35	70 à 80
65 à 80	40	90
Au-delà de 80	45	100

De plus, il est nécessaire de favoriser une circulation verticale de l'air puisque sa vitesse est faible ; il faudra donc ménager des espaces de 1 à 5cm entre les échantillons de bois.

- Pour le **séchage artificiel**, veuillez à respecter les épaisseurs des baguettes et les écarts entre elles selon le tableau suivant :

Épaisseur (E) des sciages (mm)	Épaisseur (e) des baguettes (mm)	Écartement (I) des rangées (cm)
$E < 30$	$18 < e < 20$ <i>Exemple : 20mm</i>	$40 < I < 60$ <i>Exemple : 50cm</i>
$30 < E < 55$	$20 < e < 27$ <i>Exemple : 25mm</i>	$60 < I < 100$ <i>Exemple : 80cm</i>
$55 < E < 80$	$27 < e < 35$ <i>Exemple : 30mm</i>	$80 < I < 150$ <i>Exemple : 100cm</i>
$E > 80$	$e = 35$	$100 < I < 150$ <i>Exemple : 120cm</i>

Il est conseillé d'effectuer un empilage sans laisser d'espaces entre les échantillons, contrairement au séchage naturel.

### 3. En amont du remplissage du séchoir

- Vérifier les buses d'humidification et les nettoyer à l'eau vinaigrée le cas échéant ;
- Nettoyer toutes les sondes en enlevant les saletés car celles-ci pourraient faussées les mesures ;
- Changer vos buvards (mesure de l'humidité d'équilibre) avant chaque cycle de séchage ;
- Positionner les piles de façon à ce que le courant d'air circule perpendiculairement au fil du bois ;
- Mettre les bois les plus humides au fond du séchoir ou sur le devant du séchoir.
- Mettre les bois les plus secs au milieu de la cellule ;
- Même si nous ne sommes pas favorables au mélange d'épaisseur, en cas de mélange, mettre les épaisseurs les plus faible au milieu de la cellule ;



- Positionner les paquets de sorte à ne pas créer de courant d'air trop important de part et d'autre de la pile ;
- Positionner des piles successives de même hauteur finale afin de ne pas créer de perturbations en hauteur.
- Positionner les sondes en priorité dans les piles au milieu du séchoir. Il est préférable de la positionner sur l'avant dernière pile en partant du bas.
- Il est préférable de positionner des sondes à cœur et des sondes en surface ;
- Mettre les sondes dans les bois de cœur, perpendiculairement au fil du bois, et sans traverser le bois avec un écartement d'environ 2,5cm. Prévoir des trous de perçage plus petit que le diamètre des sondes.

## 4. La conduite du séchage

Effectuer un suivi régulier et apprendre de ses erreurs ou de ses réussites !

Séchoir N° :										
Début du Séchage :				Fin du séchage :						
Essence :				Epaisseur :						
Type de baguette :				Epaisseur :						
Volume de bois séché :										
Date	Heure	Sondes						T (°C)	HE (%)	Commentaires
		S1	S2	S3	S4	S5	S6			

Ne pas oublier de suivre le gradient de séchage. Ce paramètre doit rester quasiment constant durant tout un processus de séchage.

## 5. Après le séchage

Maîtriser le séchage ne s'arrête pas à l'opération de séchage. Il vous faut intégrer le temps d'immobilisation du bois car durant cette période, le bois va reprendre de l'humidité.

Maîtriser les conditions de température et d'humidité relative du lieu de stock, c'est maîtriser l'humidité d'équilibre de ses bois. C'est la dernière étape du processus de séchage et ne pas y prêter attention vous fera perdre tout le travail réalisé précédemment.





## 6. Incidents et défauts de fonctionnement

Les incidents de fonctionnement de vos séchoirs sont de deux ordres :

- La régulation donne des données précises mais ne sont pas bien exécutées par les organes de réglages ;
- La régulation ne fonctionne pas correctement et vous fourni des données qui ne correspondent pas à ce qui est affiché.

Avant d'appeler le service de maintenance ou d'incriminer la régulation, nous vous préconisons de vérifier en premier certains points et nous allons citer des exemples d'incidents les plus courants pour étayer ces différents points :

- La température ne monte pas :
  - Les batteries de chauffes doivent être purgées. On s'en aperçoit lorsqu'une partie seulement des tuyaux est chaude) ;
  - La vanne de chauffage peut être bloquée en position fermée ou à moitié ouverte ;
  - Les purgeurs ne fonctionnent pas bien ;
  - Les filtres sont bouchés.
- L'humidité relative de l'air dans le séchoir ne peut être maintenue à un niveau élevé. L'air est donc trop sec :
  - La rampe d'humidification est bouchée ou en partie bouchée ;
  - Les volets des cheminées sont bloqués en position ouverte ;
  - Il y a des fuites sur les portes d'accès au séchoir.
- L'air est trop humide :
  - La vanne d'humidification est ouverte ;
  - Les volets des cheminées ne s'ouvrent pas.

## 7. Conseils et maintenance

La technologie peut avoir ses limites et le temps peut également parfois vous manquer. Dans ces deux cas, ne rester pas dans un processus dégradé de séchage. Votre fournisseur peut vous aider sur la résolution des problèmes matériels et certains d'entre eux assure une intervention sous 24 à 48h.

Des bureaux d'études peuvent également vous accompagner dans l'analyse et la résolution de vos problématiques de séchage.

## VII - Table des humidités d'équilibre

Température (°C)	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C
Humidité Relative (%)	<b>Humidité d'équilibre Héq (%)</b>																
5 %	1,45	1,49	1,52	1,53	1,53	1,53	1,51	1,49	1,46	1,42	1,37	1,33	1,28	1,22	1,17	1,11	1,05
10 %	2,64	2,69	2,72	2,74	2,73	2,71	2,67	2,62	2,56	2,49	2,41	2,32	2,24	2,14	2,05	1,95	1,85
15 %	3,65	3,71	3,74	3,74	3,72	3,68	3,63	3,55	3,46	3,36	3,26	3,14	3,02	2,90	2,77	2,65	2,52
20 %	4,56	4,62	4,64	4,63	4,60	4,54	4,46	4,37	4,25	4,13	4,00	3,86	3,71	3,56	3,41	3,26	3,11
25 %	5,41	5,46	5,47	5,45	5,41	5,33	5,23	5,12	4,98	4,84	4,68	4,52	4,35	4,18	4,01	3,83	3,66
30 %	6,21	6,26	6,27	6,24	6,17	6,08	5,97	5,83	5,68	5,51	5,34	5,15	4,96	4,77	4,58	4,39	4,20
35 %	7,00	7,05	7,04	7,00	6,93	6,82	6,69	6,54	6,37	6,18	5,99	5,79	5,58	5,37	5,16	4,95	4,74
40 %	7,80	7,84	7,83	7,78	7,69	7,57	7,43	7,26	7,07	6,87	6,66	6,44	6,21	5,98	5,76	5,53	5,30
45 %	8,61	8,65	8,64	8,58	8,48	8,35	8,19	8,01	7,81	7,59	7,36	7,12	6,88	6,63	6,39	6,15	5,91
50 %	9,46	9,50	9,48	9,42	9,31	9,17	9,00	8,81	8,59	8,36	8,11	7,86	7,60	7,34	7,08	6,82	6,56
55 %	10,36	10,40	10,38	10,32	10,21	10,06	9,88	9,67	9,44	9,19	8,94	8,67	8,39	8,12	7,84	7,57	7,30
60 %	11,33	11,37	11,36	11,29	11,18	11,03	10,84	10,62	10,38	10,13	9,85	9,57	9,29	9,00	8,71	8,42	8,14
65 %	12,39	12,44	12,44	12,37	12,26	12,11	11,92	11,69	11,45	11,18	10,90	10,61	10,31	10,01	9,71	9,41	9,12
70 %	13,56	13,63	13,64	13,59	13,48	13,33	13,14	12,92	12,67	12,40	12,11	11,81	11,51	11,20	10,89	10,59	10,28
75 %	14,88	14,97	15,00	14,97	14,88	14,74	14,56	14,34	14,09	13,83	13,54	13,24	12,94	12,63			
80 %	16,38	16,52	16,58	16,57	16,51	16,39	16,23	16,03	15,80	15,54	15,27	14,98	14,69	14,39			
85 %	18,13	18,31	18,42	18,46	18,44	18,36	18,24	18,07	17,87	17,65	17,41	17,15	16,89	16,63			

**Note 1 :** Les humidités d'équilibre données ici sont issues d'une formule mathématique complexe, non précise pour des températures et des humidités relatives trop élevées. Par conséquent, les valeurs en **orange** et en **rouge** sont moins précises et sont données à titre consultatifs.

**Note 2 :** Les valeurs en **vert** correspondent aux plages de températures courantes dans un atelier et mettent en avant les humidités relatives à contrôler et à respecter afin maîtriser les taux d'humidité des bois entre 8,5 et 11% (menuiserie) (cf. page 34).

**Note 3 :** L'usage de ce tableau ne saurait remplacer l'utilisation des courbes de Kleywerth mais permet de donner rapidement une humidité d'équilibre en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air.





## VIII - L  xique

A **Anhydre** : Qui ne contient pas d'eau.

**Anisotrope** : Substances dont les propriétés physiques varient en fonction de la direction.

**Aubier (Bois fonctionnel)** : Partie fonctionnelle de l'arbre correspondant aux zones d'accroissement les plus récemment formées, contenant des cellules vivantes.

C **Cambium** : Couche très fine où circule la sève. C'est la partie vivante de l'arbre ou, se fabriquent les fibres, les rayons et l'écorce.

**Convection** : Transfert de chaleur accompagné d'un transport de matière à l'état de fluide.

D **Duramen (Bois parfait)** : Partie morte où s'accumulent les déchets et où la sève ne circule plus. C'est le squelette de l'arbre, un noyau dur et résistant.

**Dureté Monnin** : La dureté Monnin est une mesure prise sur un bois contenant entre 10 et 12% d'humidité. Elle permet de tester sa résistance à la pénétration sur la face radiale du bois. Ce test est réalisé à l'aide d'un cylindre métallique long de plus de 20 mm et de 30 mm de diamètre, avec une force appliquée de 1960 Newton. Le résultat de ce test permet de classer les essences de bois par niveau de dureté.

E **Eau libre (dite eau capillaire)** : Remplit le vide cellulaire. Peut être extraite sans provoquer de variation dimensionnelle. Lorsque le bois sèche, c'est elle qui part la première.

**Eau liée (dite eau hygroscopique)** : Imprègne les parois cellulaires. Son extraction provoque des variations dimensionnelles (en dessous de 30% d'humidité).

**Eau de constitution** : Partie intégrante de la matière. Elle ne peut jamais être évacuée durant le séchage.

G **Gradient de séchage** : Rapport entre l'humidité du bois en train de sécher et l'équilibre hygroscopique du bois. Autrement dit, c'est le rapport entre le taux d'humidité indiqué par les sondes et l'équilibre hygroscopique indiqué par le buvard présent dans le séchoir. Un gradient de séchage élevé indique une intensité de séchage importante ; les résineux supportent un gradient de séchage plus élevé que les feuillus.

**Gradient d'humidité** : Rapport entre le taux d'humidité le plus élevé et le taux d'humidité le plus faible dans l'épaisseur du bois. Pour pouvoir être utilisé dans de bonnes conditions, un bois séché doit avoir un gradient d'humidité aussi faible que possible car un gradient trop fort en sortie de séchoir est un défaut de séchage.

H **Hétérogène** : Se dit des substances dont les propriétés physiques varient en fonction de la direction.

### **Humidité :**

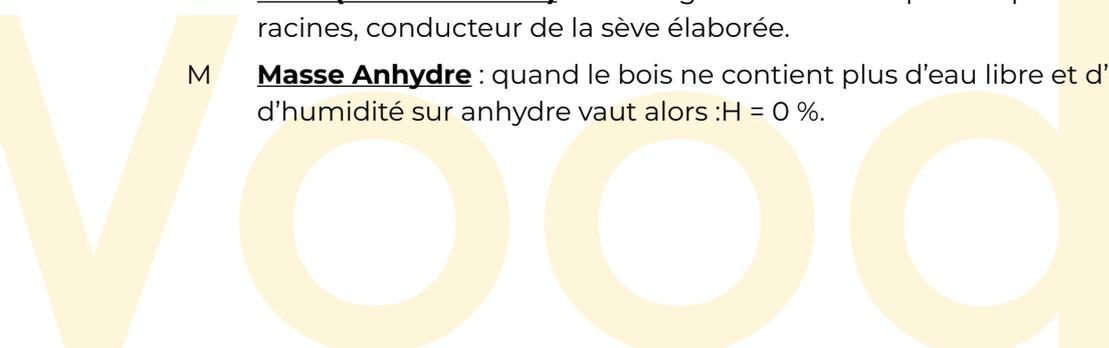
1. Teneur en eau d'un sol, de l'atmosphère.

2. Caractère de ce qui est humide, légèrement mouillé ou infiltré d'eau, d'un liquide.

3. Caractère d'un climat, d'une région où l'atmosphère est chargée d'eau.

L **Liber (  corce interne)** : Tissu végétal secondaire produit par le cambium des tiges et des racines, conducteur de la sève élaborée.

M **Masse Anhydre** : quand le bois ne contient plus d'eau libre et d'eau liée. Le taux d'humidité sur anhydre vaut alors :  $H = 0 \%$ .





P **Point de rosée ou (température de rosée)** : Température la plus basse à laquelle une masse d'air peut être soumise, à pression et humidité données, sans qu'il ne se produise une formation d'eau liquide par saturation.

**Point de saturation des fibres (PSF)** : Correspond pour la quasi-totalité des essences à une humidité voisine de 30%. Ce point est atteint lorsque toute l'eau libre a disparu de la matière et qu'il reste encore toute l'eau liée. Au-dessus du point de saturation des fibres, le séchage se fait sans variations dimensionnelles du bois, alors qu'au-dessous, dans le domaine dit « hygroscopique », le séchage s'accompagne d'un retrait du bois issu de l'évacuation de l'eau liée.

R **Régulation tout ou rien** : Dans une régulation tout ou rien, lorsque la consigne n'est pas atteinte, l'organe de climatisation concerné fonctionne à pleine puissance jusqu'à ce que la condition choisie soit atteinte. Par exemple, tant que la température de consigne n'est pas atteinte, la vanne de chauffage est ouverte à pleine ouverture. Elle se ferme lorsque la consigne est atteinte.

**Rétractabilité** : désigne les variations de dimensions du bois quel qu'en soit le sens, il inclut donc le retrait (diminution de dimensions), et le gonflement (augmentation de dimensions). La rétractabilité est une conséquence des variations d'humidité du bois en dessous du point de saturation des fibres. On distingue le retrait linéaire (axial, radiale ou tangentiel) et le retrait volumétrique. La rétractabilité tangentielle est à peu près le double de la rétractabilité radiale alors que la rétractabilité axiale ou longitudinale est considérée négligeable.

**Rétractabilité volumétrique** : C'est la somme des trois retraits définissant le retrait linéaire. On le définit en % et c'est le rapport entre la perte de volume et le volume anhydre

S **Séchage** : Traitement qui a pour but d'éliminer d'un corps, en totalité ou en partie, l'eau qui s'y trouve incorporée.

**Séchage du bois** : C'est un ensemble d'opérations qui consistent à diminuer le degré d'humidité des bois en éliminant une partie de l'eau qu'ils contiennent. Cette technique requiert deux principes : apport d'énergie et évacuation de l'humidité.

**Suber (Écorce externe)** : Couche protectrice de l'arbre formé de tissu végétal. C'est la partie que l'on peut toucher.

T **Taux d'humidité sur anhydre H (%)** : C'est le rapport de la masse d'eau contenu dans un échantillon par rapport à sa masse anhydre (masse de la matière composant le bois sans eaux liées et sans eaux libre). Attention, la masse d'eau peut être supérieure à la masse de bois (H= 200%).

$$H (\%) = \frac{M_{eau}}{M_{anhydre}} \times 100 = \frac{M_{humide} - M_{anhydre}}{M_{anhydre}} \times 100$$



## IX - Bibliographie

- ABARCO EXPERTISES. (s.d.). Au service de la construction et de l'industrie. Récupéré sur Expert-bois: <http://www.expert-bois.fr/materiau-anisotrope-ABARCO-EXPERTISES-expert-bois-construction>
- AFNOR. (2018, Avril 14). NF B52-001-1. *Règles d'utilisation du bois dans la construction - Classement visuel pour l'emploi en structure des bois sciés résineux et feuillus - Partie 1 : Bois massif*. AFNOR editions.
- ART LEVAGE. (s.d.). ART ELAGAGE 14 - ELAGAGE Calvados : Biologie de l'arbre. Consulté le 04 17, 2018, sur [http://www.art-elagage.com/biologie\\_de\\_l\\_arbre.php](http://www.art-elagage.com/biologie_de_l_arbre.php)
- Cathild@. (s.d.). Cathild.
- CENTRE DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES FORESTIÈRES DE CATALOGNE, O. N.-R. (2012). *Guide de sylviculture du pin à crochets dans les Pyrénées - La gestion des peuplements et la valorisation du bois de pins à crochets*. (P. P. UNCI'PLUS, Éd.)
- CRITTBois. (2018). CRITTBois Occitanie. Récupéré sur [www.critt-bois.com](http://www.critt-bois.com)
- DAVESNE, P. C. (1991). *Le séchage des feuillus une nécessité économique*. CTBA.
- Édouard BOUREAU, X. D.-G. (2018). « BOIS ». *Encyclopædia Universalis [en ligne]*. Consulté le Avril 03, 2018, sur <http://www.universalis.fr/encyclopedie/bois/>
- G. Gandon, OLERGIE. (s.d.).
- G. Négrié, FCBA. (s.d.).
- GénieCVL. (s.d.). *Documentation technique dans le domaine de la construction*. Récupéré sur GENIECVL: <http://geniecvl.com>
- J.-P. Bazette, C. H. (2013). *Mémotech - Bois et matériaux associés*. (CASTEILLA, Éd.) Paris: Delagrave.
- Le sourire d'Isis. (s.d.). *Le sourire d'Isis*. Récupéré sur <http://www.sophrologie-44-aromatherapie.fr>
- Moutee, M. (2006). Généralités et revue de littérature.
- Tardieu, A. D. (s.d.). Hy. Ls. Duhamel Sgr. du Monceau / Peint par Drouais fils. Gravé par Ambroise Tardieu. Consulté le Avril 17, 2018, sur <http://resource.nlm.nih.gov/101414032>

*Un grand merci aux différents interlocuteurs et entrepreneurs qui ont bien voulu accepter de nous rencontrer et de répondre à nos questions.*





## X - Table des illustrations

Figure 1 : Processus simplifié du séchage (CRITTBois, 2018) .....	15
Figure 2 : Face transversale de l'arbre (CRITTBois Occitanie).....	17
Figure 3 : Face transversale d'un arbre (ART LEVAGE) .....	71
Figure 4 : Les eaux du bois (GénieCVL).....	20
Figure 5 : Répartition des différentes formes d'eau du matériau bois (CRITTBois, 2018).....	21
Figure 6 : Identification de l'indicateur de référence : le taux d'humidité sur anhydre (CRITTBois, 2018) .....	21
Figure 7 : Détail de la méthode par mesure électrique (CRITTBois, 2018).....	22
Figure 8 : Illustration d'un gradient d'humidité d'une pièce de bois (CRITTBois, 2018).....	24
Figure 9 : Mesure de l'humidité avec un humidimètre à pointes (CRITTBois, 2018).....	24
Figure 10 : Bois ayant un taux d'humidité sur anhydre de 10% .....	28
Figure 11 : Bois ayant un taux d'humidité sur anhydre de 60% (Bois vert).....	28
Figure 12 : Taux d'équilibre hygrométrique du bois (%) (Mémotech - Bois et matériaux associés, 2013) .....	29
Figure 13 : Figure issue du DTU 41.2 « Revêtement extérieur » - Humidité.....	30
Figure 14 : Gauche : Appellation selon la NF B51-002. Droite : Préconisation sur les taux d'humidité à viser selon le type d'emploi. (CRITTBois, 2018) .....	31
Figure 15 : Circulation des zones chaudes vers les zones froides (CRITTBois, 2018).....	34
Figure 16 : Circulation des zones humides vers les zones sèches. (CRITTBois, 2018) .....	34
Figure 17 : Mécanisme du séchage (CRITTBois, 2018) .....	34
Figure 18 : Différents types de déformations (Moutee, 2006).....	36
Figure 19 : Bleuissement (CRITTBois, 2018).....	37
Figure 20 : Fentes en bout sur du Hêtre en sortie de séchoir (CRITTBois, 2018) .....	38
Figure 21 : Collapse (effondrement cellulaire) (ABARCO EXPERTISES).....	38
Figure 22 : Disposition des piles de bois pour le séchage naturel (G. Gandon, OLERGIE).....	43
Figure 23 : Avantages et inconvénients du séchage à l'air libre (schéma reproduit selon (Le séchage des feuillus une nécessité économique, 1991, p. 50) .....	44
Figure 24 : Le séchoir à Air Chaud Climatisé (G. Négrié, FCBA) .....	46
Figure 25 : Séchage par déshumidification (G. Négrié, FCBA) .....	47
Figure 26 : Séchage sous vide à plaques et à vapeur surchauffée (G. Négrié, FCBA) .....	48
Figure 27 : Crédits photos (CRITTBois, 2018).....	51
Figure 28 : Buvard à changer lors de chaque cycle (CRITTBois, 2018).....	52
Figure 29 : Positionnement des sondes : Exemple possible de localisation des sondes (CRITTBois, 2018).....	53
Figure 30 : Sondes positionnées perpendiculaire au sens du file, sous l'avant dernière rangée d'une palette. (CRITTBois, 2018) .....	53
Figure 31 : Mise en place des paquets : les bonnes et mauvaises pratiques ( CRITTBois, 2018) d'après (G. Gandon, OLERGIE).....	54







## XI - Table des tableaux

Tableau 1 : Avantage et inconvénient des différentes méthodes de mesures .....	27
Tableau 2 : Valeurs moyennes du retrait total des essences pyrénéennes.....	32
Tableau 3 : Coefficients de rétractabilité des essences pyrénéennes.....	33
Tableau 4 : Synthèse des facteurs influençant le séchage du bois (G. Gandon, OLERGIE) .....	35
Tableau 5 : Caractéristiques des baguettes à employer pour le séchage naturel (CRITTBois, 2018).....	41
Tableau 6 : Quelques exemples de temps de séchage à l'air libre (CSTB).....	43
Tableau 7 : Tableau de comparaison des procédés selon plusieurs critères (G. Gandon, OLERGIE).....	49
Tableau 8 : Dimensions des baguettes en fonction de l'épaisseur des sciages .....	51
Tableau 9 : Tableau vierge d'une table de séchage traditionnelle.....	56
Tableau 10 : Fiche de suivi du séchage (CRITTBois, 2018) .....	57
Tableau 11 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Chêne.....	60
Tableau 12 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Chêne (AFNOR, 2018) .....	60
Tableau 13 : Détails cycle par cycle pour le chêne des Pyrénées (CRITTBois, 2018) .....	61
Tableau 14 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Hêtre .....	62
Tableau 15 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Hêtre (AFNOR, 2018).....	62
Tableau 16 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Sapin.....	63
Tableau 17 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Sapin Pectiné (AFNOR, 2018) .....	64
Tableau 18 : Détails cycle par cycle pour le Sapin Pectiné (CRITTBois, 2018) .....	65
Tableau 19 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Pin Sylvestre.....	65
Tableau 20 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Pin Sylvestre (AFNOR, 2018) .....	66
Tableau 21 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Pin Radiata.....	67
Tableau 22 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Pin à crochets (CENTRE DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES FORESTIÈRES DE CATALOGNE, 2012) .....	68
Tableau 23 : Correspondance entre les catégories visuelles et les classes de résistances mécaniques pour le Pin à Crochets (AFNOR, 2018).....	68



## XII - Partenaires du projet iFORWOOD



**Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie Bois  
Occitanie**

17 rue Aristide Briand  
12000 RODEZ  
FRANCE



**Centre de Recherche Forestière de Catalogne – Institut Catalan du Bois**

Ctra. De St Llorenç de Morunys Km2  
25280 SOLSONA  
Espagne



**FORESPIR**

64 rue Raymond IV  
31000 TOULOUSE  
FRANCE



**Generalitat  
de Catalunya**

**Généralitat de Catalunya**

Gran Via de Les Corts Catalanes, 612-614  
08007 BARCELONA  
ESPAGNE



**Fundación Hazi Fundazioa**

Barrio Muntzaratz, 17<sup>a</sup>  
48220 Abadiño (Bizkaia)  
ESPAGNE



**Office National des Forêts**

23 bis Boulevard Bonrepos  
31000 TOULOUSE  
FRANCE



**Gestión Ambiental de Navarra, SA**

C/ Padre Adoain, 219 bj  
31015 PAMPLONA/NAVARRA  
ESPAGNE



**Centre de la Propietat  
Forestal**

**Centre de la Propietat Forestal**

Finca Torreferrussa. Crta de Sabadell a Sta Perpètua, km 4,5  
08130 ST.PERPÈTUA DE MOGODA  
ESPAGNE



**Centre National de la propriété forestière**

47 rue de Chaillot  
75116 PARIS  
FRANCE



**Union Grand Sud des Communes Forestières**

6 rue du Barry  
31210 MONTREJEAU  
FRANCE



**GOBIERNO  
DE ARAGON**

**Gobierno de Aragón**

Plaza San Pedro Nolasco, 7  
50001 ZARAGOZA  
ESPAGNE



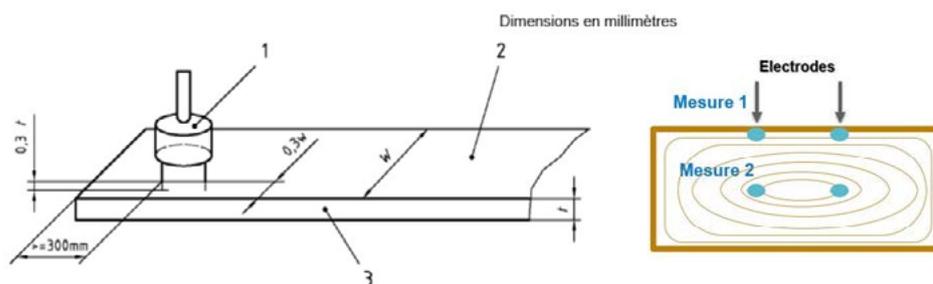


# XIII - Annexes

## Annexe 1

### Mesure du taux d'humidité du bois par méthode électrique par résistance (NF EN 13183-2)

- Avant d'effectuer la mesure, régler l'appareil de mesure de façon à prendre en considération la température du bois et l'essence de bois mesurée.
- Assurez-vous d'avoir des électrodes isolées et vérifier sur le manuel d'utilisation la méthode de mesure préconisée : mesure dans le sens du fil (cf. image ci-dessous) ou perpendiculaire au fil du bois).



- Légende
- 1 Électrode — marteau
  - 2 Face
  - 3 Rive
  - t Épaisseur
  - W Largeur

NF EN 13183-2(06/2002)

Mesure 1 = Mesure en surface et

Mesure 2= mesure à cœur (1/2 épaisseur)

La norme NF EN 13183-2 indique que dans une pièce individuelle contenue dans un lot ou une livraison de bois, il faut enfoncer des électrodes isolées à au moins 30cm des extrémités de la pièce (ou à mi-longueur, si la longueur de la pièce est inférieure à 60cm), à 1/3 de la largeur et en faisant en sorte que les électrodes pénètrent à une profondeur de 1/3 de l'épaisseur.

**Nous conseillons, d'effectuer une mesure en surface puis une mesure à cœur soit à moitié de l'épaisseur afin d'avoir 2 mesures par pièce.**

Après, 2 à 3 seconde, lire le résultat et l'exprimer au moins à 1% près. L'échantillon doit être exempt de bois résiné ou de singularités telles que l'écorce, des nœuds ou des poches de résine. Si de telles singularités existent, il faut effectuer la mesure à l'emplacement exempt de singularités le plus proche, vers le centre de la pièce.

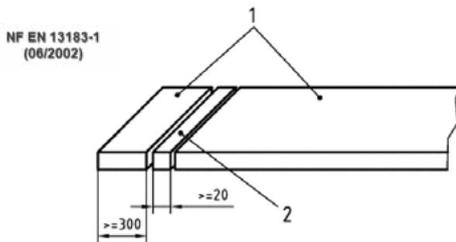
Enfin, le tableau ci-dessous vous donne la fréquence d'échantillonnage et de test selon les données de la norme et nos conseils.

Nombre de pièce essayées	Nombre de mesures par pièces essayée	Nombre en effectuant la double mesure (surface et cœur)
1 à 2	3	6
3 à 5	2	4
> 5	1	2

Il convient de notifier les résultats en indiquant les spécifications du lot de bois, la date, le type d'instrument utilisé, le nom de l'essence, la température, les profondeurs...

## Annexe 2

### Mesure du taux d'humidité du bois par pesée (NF EN 13183-1)



#### Légende

- 1 Pièce soumise à l'essai
- 2 Échantillon test

Pièce 2 = Epreuve humide à H(%) inconnu.

Peser 1

On obtient la **Masse Humide M<sub>h</sub>**

Séchage

Peser n final

Sur toute la section de la pièce soumise à l'essai, prélevez un échantillon de 20 mm au minimum dans le sens du fil, à 300 mm de distance de l'une des extrémités de la pièce d'essai, ou à mi-longueur, si la longueur de la pièce est inférieure à 600mm. L'échantillon doit être exempt de bois résiné ou de singularités telles que l'écorce, des nœuds ou des poches de résine. Si de telles singularités existent, prélevez l'échantillon dans la surface exempte de singularités la plus proche, vers le centre de la pièce d'essai.

Peser de l'éprouvette avec :

- Une balance avec un degré de précision de **0,1 g**, si la masse de l'échantillon est estimée devoir peser plus de 100 g à l'état anhydre ;
- Une balance avec un degré de précision de **0,01 g**, si la masse de l'échantillon est estimée devoir peser moins de 100 g à l'état anhydre.

Dans une étuve permettant de :

- Sécher le bois à une température maintenue à  $(103 \pm 2) ^\circ\text{C}$  ;
- D'assurer une libre circulation interne de l'air.

**Objectif :** Sécher l'éprouvette jusqu'à ce que la différence de masse entre deux pesées successives effectuées à 2 h d'intervalle soit inférieure à 0,1 %. La première phase de séchage doit durer 24h.

On obtient la **Masse Anhydre M<sub>0</sub>**

Application de la formule :

$$H (\%) = \frac{M_h - M_0}{M_0} \times 100 (\%)$$

## Annexe 3

### 1-Données générales

Date du déchargement :		Cariste :	
------------------------	--	-----------	--

### 2-Données fournisseurs

Nom fournisseur :		Essence :	
N° ou Référence du lot :		Humidité initiale :	Sec ( %) / Vert ( %)

### 3-Contrôle du taux d'humidité sur anhydre (bois sec uniquement)

			Conformité ?
N° ou référence palette 1 :		Mesure 1 (Surf.) :	OUI / NON
		Mesure 2 (cœur) :	OUI / NON
			Conformité ?
N° ou référence palette 2 :		Mesure 3 (Surf.) :	OUI / NON
		Mesure 4 (cœur) :	OUI / NON

La conformité se juge sur le respect du cahier des charges. Par exemple : si une mesure dépasse 12% = non conforme

Taux d'humidité H1c moyen :		Gradient d'humidité G1 :		Gradient G final
Taux d'humidité H2s moyen :		Gradient d'humidité G2 :		

Cases grisées ci-dessus à remplir sous format informatique. Ré-édition de la fiche contrôle obligatoire

### 4-Dimensions des planches et des paquets

	Palette n°1 :	Palette n°2 :	Conformité ?
Longueur planche :			
Longueur palette :			
Epaisseur 1 :			
Epaisseur 2 :			
Epaisseur 3 :			
Epaisseur 4 :			
Epaisseur 5 :			

La conformité se juge ainsi : Anomalie si : Lplanche la plus courte < 3,0m / Lpalette le plus long > 3,20m

L'épaisseur est mesurée sur deux palettes en effectuant au minimum 5 mesures en milieu de planche

### 5- Litelage / Cerclage / Spécifications techniques

Nombre de liteaux par rangée :		Type de liteaux :	Bois / Plastique / Métal
Nombre de chevrons par palettes :		Forme liteaux (à dessiner) :	

Alignement des baguettes :	Bon	Mauvais	Peut mieux faire car :	
Positionnement des liteaux aux extrémités à 3cm du bord ?				
Oui, bon positionnement	NON		Hauteur des palettes (chevron inclus) :	
			.....m	Bon / Mauvais

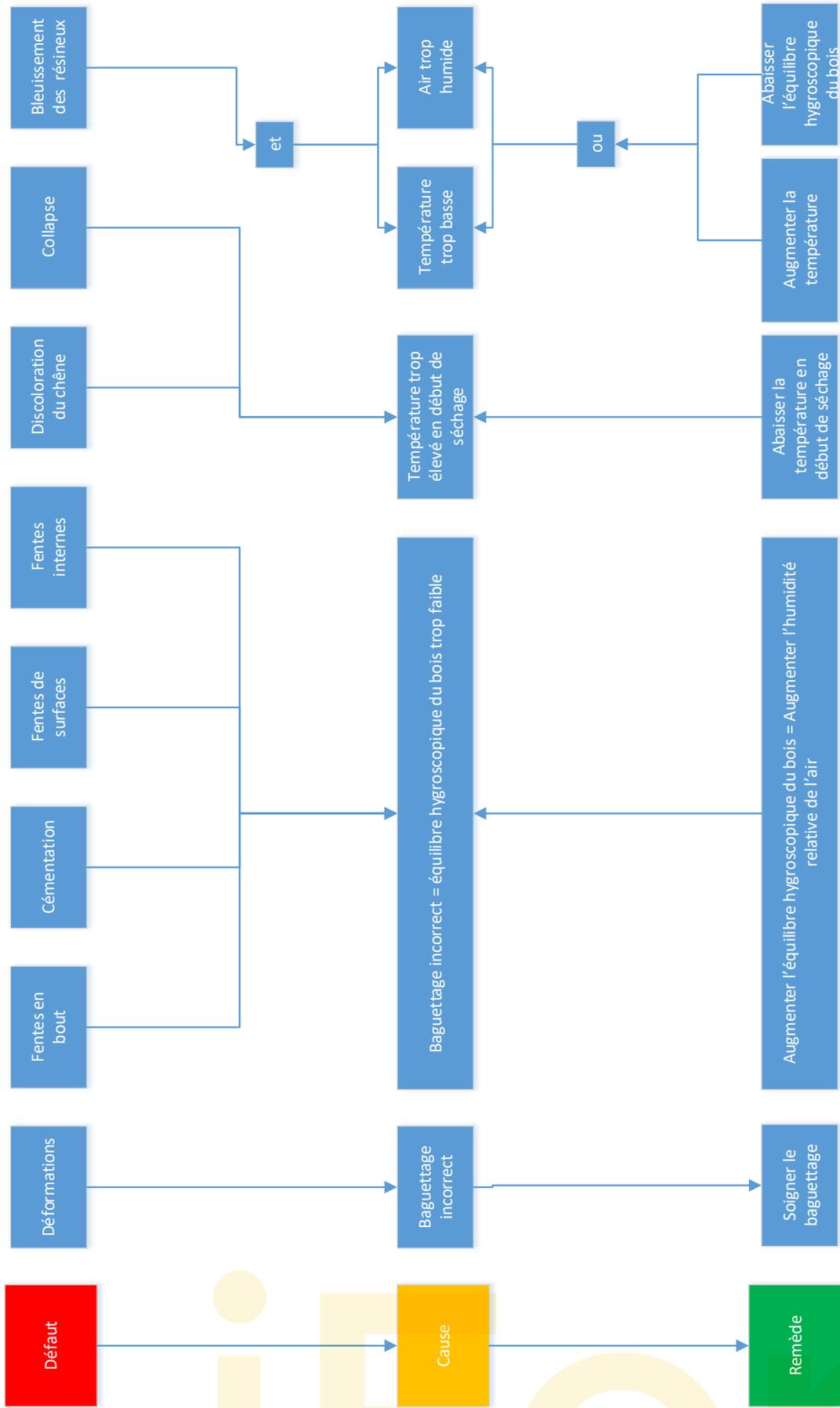
La conformité se juge ainsi : Alignement parfait = Bon alignement / Hauteur palette conforme pour H = 1,20m (chevron inclus)

Cerclage :	OUI / NON	Fer	Plastique	Nb / palette :
Nombre de palettes visuellement non-conformes :				

### 6- Remarques :

--	--	--	--	--

## Annexe 4





# Interreg POCTEFA iForWood



Le projet a été cofinancé à hauteur de 65% par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) au travers du Programme Interreg V-A Espagne-France-Andorre (POCTEFA 2014-2020). L'objectif du POCTEFA est de renforcer l'intégration économique et sociale de l'espace frontalier Espagne-France-Andorre. Son aide est concentrée sur le développement d'activités économiques, sociales et environnementales transfrontalières au travers de stratégies conjointes qui favorisent le développement durable du territoire.

