

**INSTITUT NATIONAL DES INDUSTRIES MANUFACTURIERES
BOUMERDES**

THESE

Présentée
en vue de l'obtention du grade

DE MAGISTER EN GENIE INDUSTRIEL
Option : Sciences du Bois et de la Cellulose

Par
KARABAGLI ABDERRAHMANE

CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE D'UN SECHOIR
PROTOTYPE A CONVECTION FORCEE

SOUTENUE LE 28 - 10 - 1996

M. ABADLIA
M. AICHOUNI
A. AGOUGOU
A. BENBRIK
A. ZERIZER

Professeur
Maitre de conférence
Chargé de cours
Chargé de cours
Chargé de cours

Président
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Rapporteur

REMERCIEMENTS

J'adresse toute ma reconnaissance à Monsieur M. AZADOU, Professeur à l'INIM, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Je remercie vivement Monsieur M. ARCHOUH, Maître de Conférences au Centre Universitaire de Mostaganem, Monsieur AGOUCHEM, chargé de cours à l'INIA, Monsieur A. BENARIK, Chargé de cours à l'INM pour avoir analysé ce travail et accepté de siéger ce jury.

Je remercie Monsieur A. ZERIZER, chargé de cours à l'INM pour m'avoir permis d'effectuer ce travail.

Je remercie Monsieur A. ZOULALIAN, Professeur au Laboratoire de Génie des Procédés, Université de Nancy, dont j'ai eu le privilège d'être accueilli dans son équipe.

Tous mes remerciements vont également à Monsieur D. ALIOUCHE, chargé de cours à l'INIM et Madame N. BELAID, pour m'avoir facilité toutes les démarches administratives.

Je remercie toute ma famille pour leur confiance et leur patience.

RESUME

Le séchage convectif d'avivés de bois de différentes essences, est étudié dans un séchoir constitué de panneaux composites à base de bois, de 1 m³ de volume où les avivés sont disposés sous forme de pile comportant 15 avivés en hauteur et 3 non jointifs en profondeur.

Dans le premier chapitre, une étude sur le séchage a été faite, en passant par les différents procédés et en attachant une attention particulière sur les séchoirs à convection forcée.

Le deuxième chapitre a porté sur l'étude du séchoir prototype pour enfin arriver à l'étude de l'homogénéité de séchage qui a fait l'objet du troisième chapitre, où les températures internes et le taux de séchage ont été les paramètres étudiés.

Dans le quatrième chapitre, la tenue du séchoir a été étudiée à travers des échantillons représentatifs de la paroi placés dans la pile de bois et dans un appareil pour cycles de vieillissement accéléré.

Pour clore, dans le cinquième et dernier chapitre une approche mathématique a été présentée, ainsi que des perspectives tant sur la modernisation que sur la qualité des produits séchés tributaire de cette homogénéité de séchage.

SOMMAIRE

LISTES DES FIGURES	4
LISTES DES TABLEAUX	6
NOMENCLATURE	8
INTRODUCTION	10
PREMIER CHAPITRE : SECHAGE	
I - MATERIAU BOIS	15
I.1 Rappels d'anatomie	15
I.1.1 Structure macroscopique	15
I.1.2 Structure microscopique	18
I.2 Interactions entre l'eau et le bois	20
I.2.1 Taux d'humidité	20
I.2.2 Eau dans le bois	20
I.2.3 Equilibre hygroscopique	21
II - PROCEDES DE SECHAGE	22
II.1 Séchage naturel	22
II. 2 Séchage artificiel	22
II.2.1 Séchage traditionnel	22
II.2.2 Séchage sous vide	23
II.2.3 Séchage par pompe à chaleur	25
ii.2.4 Autres méthodes de séchage	26

III - ETUDE GENERALE DES SECHOIRS A CONVECTION FORCEE	26
---	----

IV - CONCLUSION	36
-----------------------	----

DEUXIEME CHAPITRE : ETUDE DU SECHOIR PROTOTYPE

I - DISPOSITIF EXPERIMENTAL	39
-----------------------------------	----

I.1 Ossature	40
--------------------	----

I.2 Circuit d'air	42
-------------------------	----

I.3 Instrumentation	42
---------------------------	----

II - DEROULEMENT D'UN CYCLE DE SECHAGE	44
--	----

II.1 Préparation des bois	44
---------------------------------	----

II.2 Calcul théorique du temps de séchage	45
---	----

II.3 Coefficient de remplissage	47
---------------------------------------	----

II.4 Disposition des planches dans la pile de bois	48
--	----

II.5 Conditions opératoires	50
-----------------------------------	----

II.6 Détermination de l'humidité des échantillons et de l'humidité de la pile de bois	50
--	----

III - CONCLUSION	51
------------------------	----

TROISIEME CHAPITRE : ETUDE DE L'HOMOGENEITE DE SECHAGE

I - ETUDE DES TEMPERATURES INTERNES ET DU TAUX DE SECHAGE	54
---	----

II - RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE	54
---	----

II.1 Etude du sapin	54
---------------------------	----

II.2 Etude de chêne	72
---------------------------	----

III - CONCLUSION	74
------------------------	----

QUATRIEME CHAPITRE : ETUDE DE LA TENUE DU SECHOIR

PROTOTYPE

I - COMPORTEMENT DES PAROIS DU SECHOIR AUX DIFFERENTS CYCLES DE SECHAGE	76
I.1 Variations dimensionnelles	77
I.2 Essai d'adhérence	77
I.3 Essai de vieillissement accéléré	77
I.4 Aspect visuel	81
II - RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE	81
II.1 Cas du sapin	81
II.2 Cas du chêne	85
III - CONCLUSION	87
CINQUIEME CHAPITRE : REPRESENTATION MATHEMATIQUE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE	
I - ETUDES THEORIQUES SUR LE SECHAGE	89
II - ETUDE DE LA CINETIQUE DE SECHAGE	94
III - REPRESENTATION MATHEMATIQUE	96
IV - CONCLUSION	98
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	100
BIBLIOGRAPHIES	102
ANNEXES	107

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure1 : Structure macroscopique d'un bois résineux	17
a - partie vivante de l'arbre	
b - repérage géométrique d'une pièce de bois	
c - sens des débits ; dosse (1) et quartier (2) .	
d - plan ligneux d'un résineux	
e - Plan ligneux d'un feuillu	
Figure 2 : Courbes d'équilibre hygroscopique	21
Figure 3 : Séchoir traditionnel	23
Figure 4 : Séchoir sous vide	24
Figure 5 : Séchoir par pompe à chaleur	25
Figure 6 : Cellule type N°1	30
Figure 7 : Cellule type N°2	31
Figure 8 : Celluie type N°3	32
Figure 9 : Cellule type N°4	33
Figure 10 : Celluie type N°5	34
Figure 11 : Celluie type N°6	35
Figure 12 : Schéma du séchoir prototype avec accessoires	40
Figure 13 : Schéma d'une paroi de cellule	41
Figure 14 : Disposition des échantillons dans la pile de bois	49
Figure 15 : Courbes des températures internes, essai N°1, essence sapin.....	56
Figure 16 : Courbes des températures internes, essai N°3, essence sapin	58

Figure 17 : Courbes des températures internes, essai N°4 essence sapin.....	60
Figure 18 : Courbes des températures internes, essai N°5 essence sapin.....	61
Figure 19 : Courbes des températures internes, essai N°6 essence sapin.....	62
Figure 20 : Courbes des températures internes, essai N°7 essence sapin.....	64
Figure 21 : Courbes des températures internes, essai N°8 essence sapin.....	65
Figure 22 : Courbes des températures internes, essai N°9 essence sapin.....	67
Figure 23 : Courbes des températures internes, essai N°10 essence sapin.....	68
Figure 24 : Homogénéité de séchage en fonction du débit de recyclage.....	69
Figure 25 : Coefficient de variation en fonction du débit de recyclage.....	70
Figure 26 : Courbes des températures internes de l'essai N°1 essence chêne.....	74
Figure 27 : Climatron.....	78
Figure 28 : Ambiances pour cycles de vieillissement accéléré.....	80
Figure 29 : Courbes de séchage.....	95
Figure 30 : Courbes des humidités réduites.....	96
Figure 31 : Représentation du modèle et des points expérimentaux.....	97
Figure 32 : Représentation des humidités calculées en fonction des humidités expérimentales.....	95

LISTE DES TABLEAUX

	Pages
Tableau 1 : Avantages et inconvénients des différents procédés de séchage	36
Tableau 2 : Epaisseur, largeur et écartement des baguettes à respecter pour un bon empilage	44
Tableau 3 : Valeurs des coefficients a_1 , a_2 , a_4	46
Tableau 4 : Détermination du temps de séchage, cas du sapin	55
Tableau 5 : Taux de séchage, essai N°1	56
Tableau 6 : Taux de séchage, essai N°3	58
Tableau 7 : Taux de séchage, essai N°4	59
Tableau 8 : Taux de séchage, essai N°5	61
Tableau 9 : Taux de séchage, essai N°6	62
Tableau 10 : Taux de séchage, essai N°7	63
Tableau 11 : Taux de séchage, essai N°8	65
Tableau 12 : Taux de séchage, essai N°9	66
Tableau 13 : Taux de séchage, essai N°10	68
Tableau 14 : Nombre de Reynolds	71
Tableau 15 : Détermination du temps de séchage, cas du chêne	72
Tableau 16 : Taux de séchage, essai N°1	73
Tableau 17 : Variations dimensionnelles des petits échantillons représentatifs de la paroi pour les 10 cycles de séchage obtenues lors des essais d'homogénéité	82
Tableau 18 : Variations dimensionnelles des 2 grands échantillon représentatifs de la paroi	83
Tableau 19 : Variations dimensionnelles des petits échantillons représentatifs de la paroi	83

Tableau 20 : Variations dimensionnelles des grands échantillons représentatifs de la paroi placés dans le climatron	84
Tableau 21 : Variations dimensionnelles du grand échantillon représentatif de la paroi	85
Tableau 22 : Variations dimensionnelles des petits échantillons représentatifs de la paroi	86

NOMENCLATURE

PPS1.....10 - Petit élément de la paroi Sapin

GPS1 - grand élément de la paroi Sapin

PPCh1.....10 - Petit élément de la paroi Chêne

GPCh1 - Grand élément de la paroi Chêne

GERPa - Grand élément représentatif de la paroi

PERPa - Petit élément représentatif de la paroi

A1 - A2 - B1 - B2 - C1 - C2 - Echantillons témoins pour la détermination de l'humidité

a_1 - Coefficient dépendant de l'humidité de l'air

a_2 - Coefficient dépendant de la vitesse de l'air

a_3 - Coefficient dépendant de la densité du bois

a_4 - Coefficient dépendant de l'épaisseur du bois

a_5 - Coefficient dépendant de la qualité de séchage

x_i - Humidité initiale de chaque échantillon témoin

x_f - Humidité finale de chaque échantillon témoin

M_0 - Masse anhydre de la pile de bois

M_i - Masse initiale de la pile de bois

L_i - Longueur initiale

l_i - Largeur initiale

e_i - Epaisseur initiale

L_f - Longueur finale

l_f - Largeur finale

e_f - Epaisseur finale

RS -résistance de séchage

k , l , et m - constantes

T_s - température de l'air

t_s - température du bois

H - humidité de l'air

v - humidité du bois

H_{red} - Humidité réduite du bois

H_{eq} - Humidité d'équilibre

H_i - Humidité initiale

H - Humidité du bois

INTRODUCTION

La question n'est plus de discuter de l'utilité ou de l'inutilité du séchage. A notre époque le séchage du bois pour l'industriel est une opération indispensable faisant partie intégrante du processus de fabrication.

Les reproches principales adressées au séchage sont d'abord qu'il est une perte de temps, ensuite que cette opération est coûteuse, enfin que l'on a là une cause de perte de matière première avec les défauts de séchage.

La perte de temps est un faux problème, car un bois séché d'une part est plus facile à usiner et d'autre part le temps passé à effectuer le séchage peut se traduire en coût de séchage et l'on doit comparer le coût de fabrication d'un produit dans un processus comprenant une opération de séchage avec le coût de fabrication du même produit dans un processus sans séchage.

Le calcul du coût devient alors beaucoup plus difficile à réaliser car les paramètres à utiliser sont souvent peu évidents à isoler. En effet le processus sans séchage est plus rapide, et emploie moins de personnel et en apparence donne le même résultat. Le processus avec séchage est un peu plus long et consomme de l'énergie, des investissements et emploie davantage de personnel. Cependant toutes les opérations d'usinage se font plus facilement, donc plus vite et avec une usure moindre des outils. Les pièces usinées ne se déforment pas en atelier avant assemblage ce qui évite une perte de travail et de matière dans les pièces refusées avant assemblage. Enfin on évite l'apparition de défauts dus au séchage du bois chez le client, ce qui signifie un produit de bonne qualité et de bonne réputation. C'est ce dernier élément qui sera le plus difficile à chiffrer, c'est à la fois le prix de la qualité d'un produit et la valeur elle-même de ce produit.

On peut prendre trois exemples correspondant aux trois principales industries employant du bois massif dont les méthodes de séchage sont traitées ultérieurement.

Le séchage chez le scieur a pour avantage de limiter les risques de pourriture au maximum, et de valoriser les importants déchets de sciage. L'inconvénient est que d'une part le scieur ne connaît pas l'utilisation de son bois et que d'autre part le bois va subir des transports ultérieurs durant lesquels il y a risque de reprise d'humidité ou encore nécessité d'utiliser un conditionnement coûteux pour protéger le bois sec. En général, les scieurs n'effectuent pas de séchage artificiel, ils stockent le bois à l'air, ce qui constitue un séchage naturel mais le bois est vendu quelque soit son humidité. Les déchets sont vendus en papeterie, en matières premières pour panneaux de particules ou simplement détruits.

Le séchage chez le négociant est sans doute la plus mauvaise solution car celui-ci n'a aucune source d'énergie, ce qui exclue la pratique de séchage artificiel pour des raisons économiques. Cet intermédiaire va se limiter à faire du séchage naturel pour les bois qu'il reçoit à un fort degré d'humidité et à stocker dans un local. Il ne pratiquera le séchage artificiel que dans le cas exceptionnel des essences précieuses pour lesquels il faut éviter les risques d'attaque de champignons.

L'industriel est donc obligé de prévoir un séchage des bois reçus, dans la mesure où l'on a vu qu'il était impossible de travailler avec des bois non séchés. Il faut noter qu'à ce niveau et pour des raisons économiques, on a aussi le souci de réduire les stocks. On doit donc envisager dès la livraison des bois un tri en fonction de leur humidité :

- les bois reçus séchés à un degré correct sont entreposés dans un local à une humidité contrôlée et sont prêts à être utilisés.
- les bois reçus séchés à un degré d'humidité non admissible passent au séchoir pour une rapide correction de leur humidité.
- les bois non séchés sont tout de suite empilés pour un séchage à l'air, ce qui permet des économies d'énergie lors de leur passage au séchoir.

On voit que même dans le cas où l'entreprise est approvisionnée avec des bois théoriquement séchés, un séchoir est indispensable pour les éventuelles "corrections" de l'humidité.

En menuiserie, des bois non séchés ou mal séchés, vont se déformer avant ou après la pose; la conséquence sera toujours la même, il sera nécessaire de faire des retouches voire refaire des pièces dont les déformations sont trop importantes.

En ébénisterie, le problème est plus simple, la valeur et la qualité d'un meuble sont déterminées par la précision des assemblages et par la facilité d'ouverture et de fermeture des éléments mobiles, portes et tiroirs. La perte de matière du fait de l'existence des défauts apparus durant le séchage est un problème intéressant à résoudre. La solution de ce problème est l'étude du séchage en tant que phénomène physique et celle des séchoirs en tant que machines industrielles.

Il reste à déterminer la place où l'on doit situer le séchoir ou plutôt dans le circuit commercial du bois, il existe en fait trois places possibles pour cette opération, chez le scieur, chez le négociant, chez l'industriel effectuant la transformation finale, menuiserie ou ébénisterie et l'implantation des séchoirs dans ce circuit est liée surtout au coût des investissements.

Cette thèse a porté sur la contribution à l'étude expérimentale d'un séchoir prototype à convection forcée. En effet le séchage des bois en scierie est lié au coût des investissements. Dans ce contexte nous avons contribué à l'étude de ce séchoir prototype constitué de panneaux à base de bois, dont le coût estimé est sensiblement inférieur au séchoir industriel.

Le premier chapitre a porté sur l'étude du séchage. Nous avons fait des rappels d'anatomie du matériau bois et en attachant une attention particulière sur les séchoirs industriels à convection forcée à travers les différentes bibliographies pour bien situer notre séchoir prototype, qui fera l'objet du second chapitre.

Le troisième chapitre a porté sur l'étude de l'homogénéité de séchage à travers les températures indiquées par des thermocouples placés à l'intérieur du séchoir et les taux de séchage. En effet pour une bonne conduite de séchage et arriver à des taux d'humidité uniformes, nous avons essayé d'analyser l'homogénéité de séchage.

Dans le quatrième chapitre nous avons étudié le comportement du séchoir aux différents cycles de séchage pour montrer que ce dernier supporte bien toutes les conditions de séchage. Enfin dans le cinquième et dernier chapitre nous avons essayé de modéliser la cinétique de séchage pour une essence donnée à savoir le chêne. Cette modélisation est très importante pour les conducteurs de séchoir. En effet pour effectuer un cycle de séchage correctement ces derniers auront besoin de connaître à tout instant l'humidité du bois et c'est dans ce contexte que nous avons essayé de représenter cette cinétique des séchage par un modèle mathématique. Pour terminer nous avons donné quelques perspectives pouvant faire l'objet d'axes de recherche.

PREMIER
CHAPITRE

PREMIER CHAPITRE

SECHAGE

Il ne s'agit pas ici de faire une étude approfondie du séchage en tant que phénomène physique, mais de présenter les éléments d'anatomie [1] et les mécanismes physiques essentiels qui conditionnent la migration [2] d'eau et l'apparition des défauts dans ce matériau au cours du séchage, ainsi que les différents procédés de séchage avec une analyse sur les séchoirs à convection forcée pour bien situer l'étude de notre séchoir prototype.

I - MATERIAU BOIS

I-1. RAPPELS D'ANATOMIE

La définition de grandeurs caractéristiques indispensables à l'étude des transferts dans le bois, nécessite la connaissance des propriétés structurales du matériau. Ce paragraphe y est consacré.

I-1.1 Structure macroscopique

Il existe deux grandes familles d'arbres : les feuillus et les résineux ; d'une façon générale le bois est un ensemble de tissus végétaux constituant la majeure partie de l'arbre : tronc, branches, racines. Dans le cas de la production de bois, seul le tronc de l'arbre a un véritable intérêt.

Selon une coupe [3] transversale, (figure 1. a) on voit de l'extérieur vers l'intérieur :

- l'écorce, couche protectrice à épaisseur variable.
- le liber ou écorce interne, couche spongieuse de l'arbre fabriquant du bois vers l'intérieur et du liber vers les branches.
- l'aubier ; partie fonctionnelle de l'arbre dans laquelle la sève circule des racines vers les branches.
- le duramen ou cœur, partie morte où s'accumulent les déchets, il assure la rigidité de l'arbre et peut se distinguer de l'aubier par sa couleur plus foncée.

Les couches d'accroissement ou " cernes ", sont produites pendant la période de végétation annuelle. Elles sont composées d'une région interne claire formée par le bois initial (bois de printemps) et d'une région formée par le bois final (bois d'été). Ce type de croissance, a symétrie axiale, ainsi que l'aspect cylindrique du tronc laissant prévoir un comportement orthotrope du bois en première approche.

Le repérage géométrique au niveau d'une pièce s'effectue (figure 1. b) comme suit :

- direction axiale ou longitudinale "L", direction d'extension du tronc
- direction radiale "R", direction de croissance
- direction tangentielle "T", direction tangentielle aux cernes d'accroissement

Nous distinguons deux catégories de découpes ou débits ; sur dosse et sur quartier (figure 1. c).

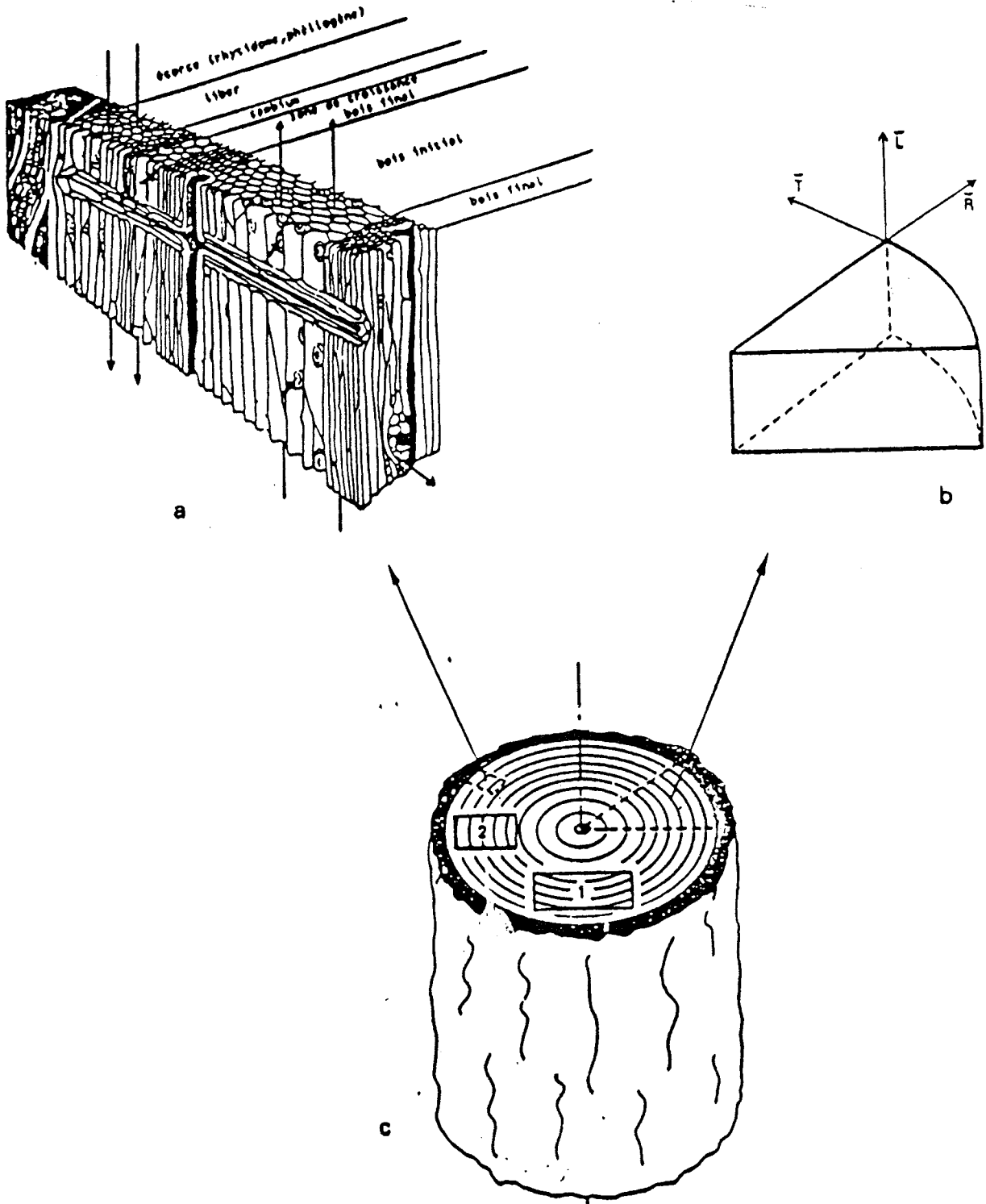


Figure 1 : Structure macroscopique d'un bois résineux [1]

- a - partie vivante de l'arbre
- b - repérage géométrique
- c - sens des débits : dosse (1) et quartier (2)

I-1.2 Structure microscopique

Le plan ligneux caractérise l'agencement des éléments constitutifs du bois (figure 1-d,e). Dans la direction axiale, le bois est essentiellement formé de cellules filiformes de section transversale quadrangulaire à terminaisons biseautées. Ces cellules appelées trachéides sont alignées dans les directions radiale et tangentielle. Le bois initial se distingue du bois final par des trachéides à large section et paroi fine. Parallèlement à la direction des fibres peuvent se trouver des canaux résinifères, éléments conducteurs de la résine. Dans la direction radiale on peut noter la présence de rayons ligneux. A cette énumération, il faut ajouter des éléments secondaires peu nombreux tels que des trachéides transversales et des cellules sécrétrices dont l'organisation est moins structurée. Les cellules du bois quel'elles soit, jouent un rôle essentiel dans la vie de l'arbre. Elles sont le siège de la circulation ascendante de la sève brute (eau, éléments minéraux). Pour assurer cette fonction, elles communiquent entre elles par des petites ouvertures identiques à des clapets, appelées ponctuations. Ce sont les éléments régulateurs des écoulements dans le bois; leur " aspiration" sous l'action d'un gradient de pression trop important empêche la circulation des fluides.

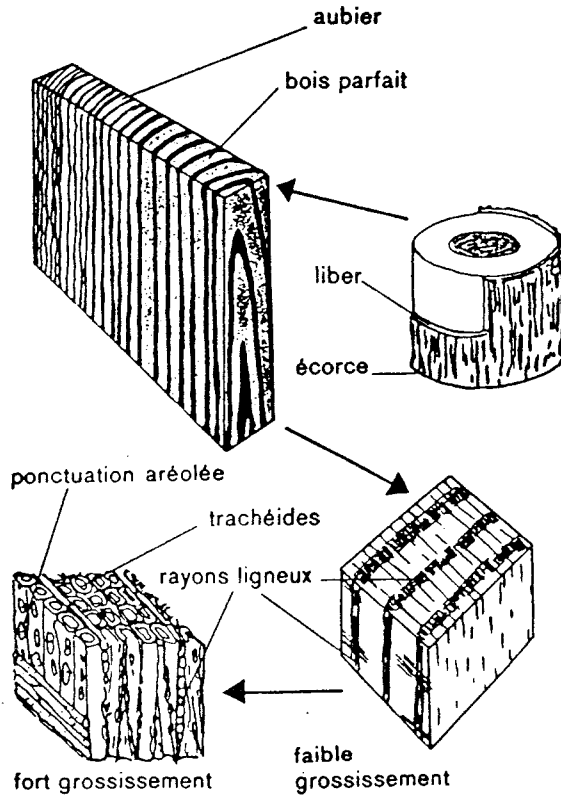


Figure 1-d : Plan ligneux d'un résineux [1]

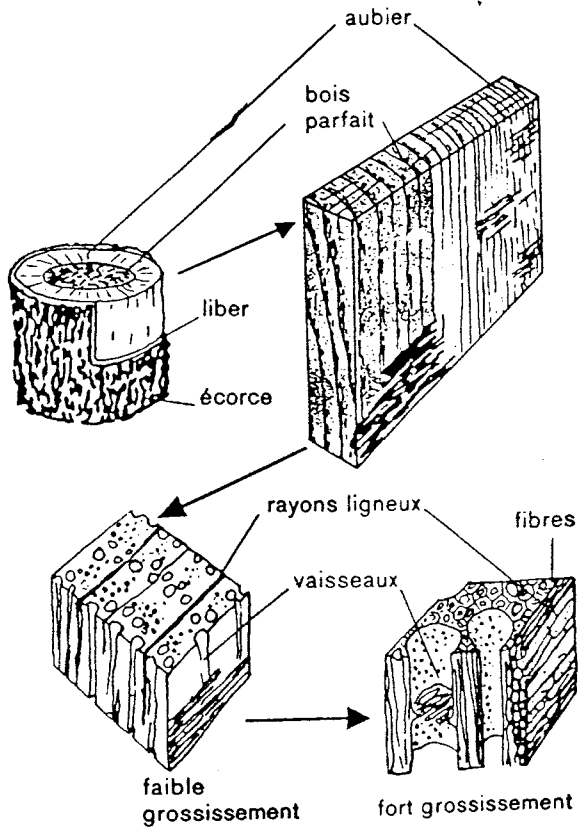


Figure 1- e : Plan ligneux d'un feuillu [1]

I-2 INTERACTIONS ENTRE L'EAU ET LE BOIS

I-2.1 Taux d'humidité des bois

Définissons ci-après une notion importante utilisée tout au long de ce mémoire : le taux d'humidité des bois. Il se définit par le rapport qui existe entre la masse d'eau qu'il contient et sa masse anhydre (appelée aussi masse sèche). Comme un taux se mesure en %, nous dirons que le degré d'humidité d'un bois est la quantité d'eau qu'il contient exprimée en % de sa masse anhydre.

$$\text{Taux d'humidité du bois} = \frac{\text{masse humide} - \text{masse anhydre}}{\text{masse anhydre}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

I-2.2 Eau dans le bois

L'eau contenue dans le bois se trouve sous trois formes essentielles :

- eau de constitution, c'est un constituant de la structure moléculaire. Elle ne peut être éliminée que par destruction du bois par combustion.
- eau adsorbée, appelée encore eau "liée". elle dépend étroitement des propriétés de la structure poreuse et se fixe sur les parois cellulaires par liaisons chimiques ou attraction de Coulomb.
- eau capillaire ou "libre". elle circule librement dans le bois en remplissant les vides qui existent entre les cellules comme son nom l'indique.

1.2.3 Equilibre hygroscopique

Quelque soit le milieu dans lequel il se trouve, c'est à dire quelque soient la température et l'humidité de l'air, le bois s'équilibre à certaines humidités.

Sous l'influence des conditions de température et d'état hygrométrique de l'air, le bois perd ou reprend de l'humidité, tout cela se traduit par des courbes qui sont l'expression macroscopique des phénomènes entre l'eau et l'humidité du matériau.

Ces courbes comportent en abscisse l'humidité relative de l'air (rapport de la pression de vapeur à la pression de saturation) et en ordonnée l'humidité du bois à l'équilibre (figure 2).

Elles sont tracées à température constante [3].

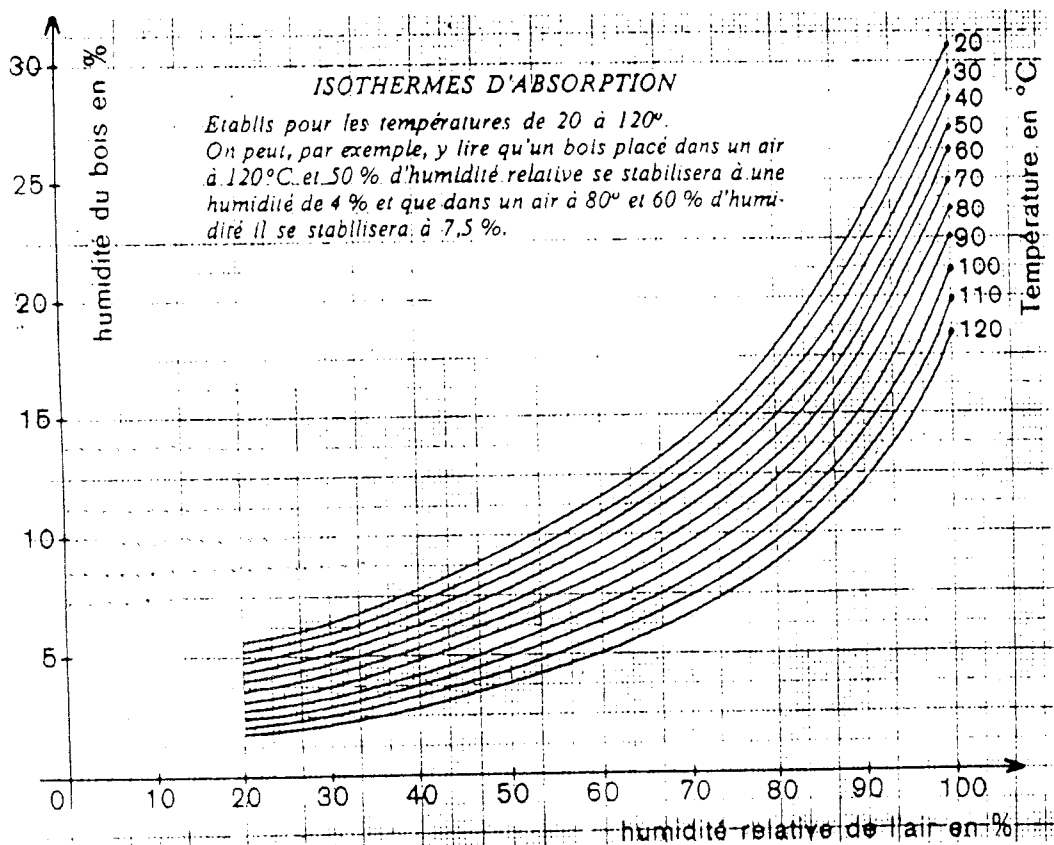


Figure 2. Courbes d'équilibre hygroscopique [3].

II. PROCEDES DE SECHAGE

II.1 Séchage naturel

Par séchage à l'air on comprend celui-ci, exécuté à l'extérieur, dans l'atmosphère ambiante. Pendant le séchage à l'air, la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau est fournie par l'air ambiant qui se refroidit en passant par la pile de bois.

Le transport de la vapeur d'eau évaporée hors de la pile est effectué par la circulation naturelle de l'air voire les vents prédominants

II.2 Séchage artificiel

II.2.1 Séchage traditionnel

Pour une opération industrielle permettant une planification de la production avec des échéances prédéterminées, il est donc nécessaire de sécher au séchoir (figure 3). Dans ce dernier la chaleur est apportée par des batteries de chauffe le plus souvent alimentées par de la vapeur.

La circulation de l'air dite forcée est impulsée par des ventilateurs. Il existe un grand nombre de modèles différents, mais tous ont le même principe. La température et la vitesse de l'air dépendent de l'essence, de l'épaisseur et parfois du débit du bois.

A part le chauffage et la circulation d'air, les séchoirs comportent aussi des dispositifs pour l'humidification de l'air, par injection de vapeur ou d'eau pulvérisée pour éviter une humidification relative trop basse qui pourrait engendrer des fentes par un séchage trop rapide à la surface du bois [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

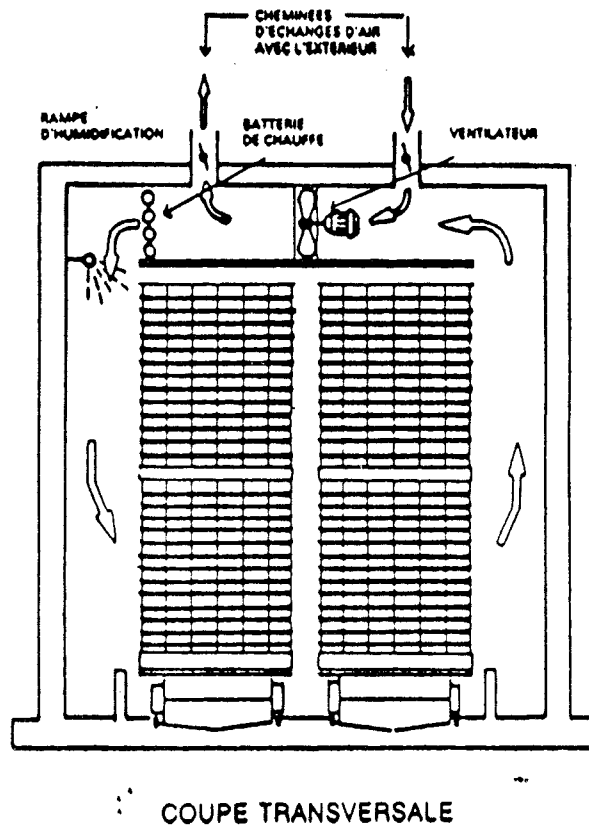


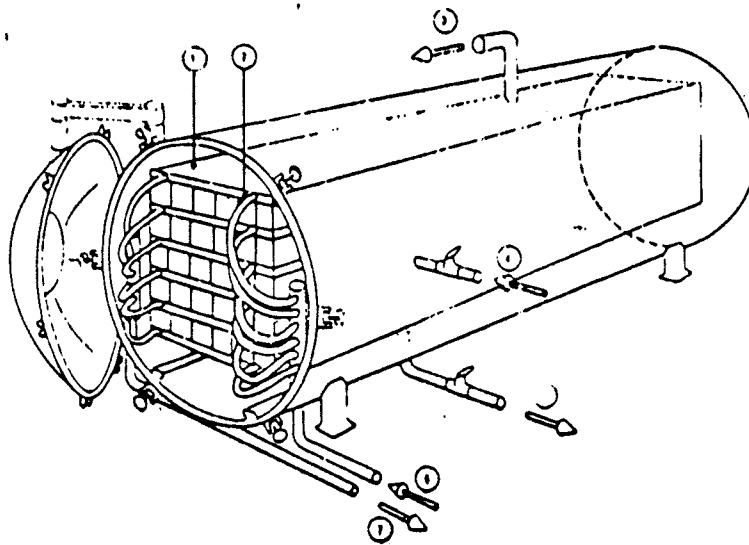
Figure 3 : Séchoir traditionnel à case [3].

II.2.2 Séchage sous vide

Nous savons que lors du séchage du bois, le phénomène de circulation à l'intérieur du matériau est l'élément dominant. Dans ce type de séchage (figure 4), pour apporter la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau tout en maintenant le vide, on fait cela, soit en incorporant dans le séchoir des plaques chauffées (eau chaude, vapeur, fluide, résistance thermique) sur lesquelles le bois est posé, soit en pratiquant un séchage interrompu, admettant de temps en temps de l'air pour apporter de la chaleur [3, 4].

La vapeur est évacuée par la pompe à vide et condensée en route. Cette méthode peut donner de bons résultats pour certaines tâches spécialisées de séchage.

Pour le séchage de bois d'oeuvre en volume important, la complication, le coût de l'installation et la nécessité d'avoir un personnel techniquement très compétent pour l'opérer, éliminent le plus souvent l'avantage gagné par un séchage plus rapide.



- | | |
|--|-------------------------------|
| 1 - Plaque chauffante | 5 - Evacuation des condensats |
| 2 - Flexibles - Circuit d'eau chaude | 6 - Arrivée d'eau chaude |
| 3 - Vers la pompe à vide | 7 - Sortie d'eau chaude |
| 4 - Remise à la pression atmosphérique | |

Figure 4 : Séchoir sous vide à plaques [3]

II.2.3 Séchage par pompe à chaleur

La pompe à chaleur est une machine qui " prend " de l'énergie dans un certain milieu pour la céder à un autre milieu qui a besoin d'être réchauffé (figure 5).

C'est une machine frigorifique dans laquelle circule un fluide frigorigène en circuit fermé.

Dans le séchage du bois, le milieu ambiant duquel est prélevée la chaleur est, suivant le cas, soit l'air extérieur au séchoir, soit l'air chaud et humide qui sort de la pile de bois.

Ensuite le fluide frigorigène passe à nouveau dans le compresseur.

On peut répartir ces types de séchoir en deux grands types : ceux qui dans lesquels l'air circule en circuit fermé et ceux dans lesquels l'air circule en circuit ouvert.

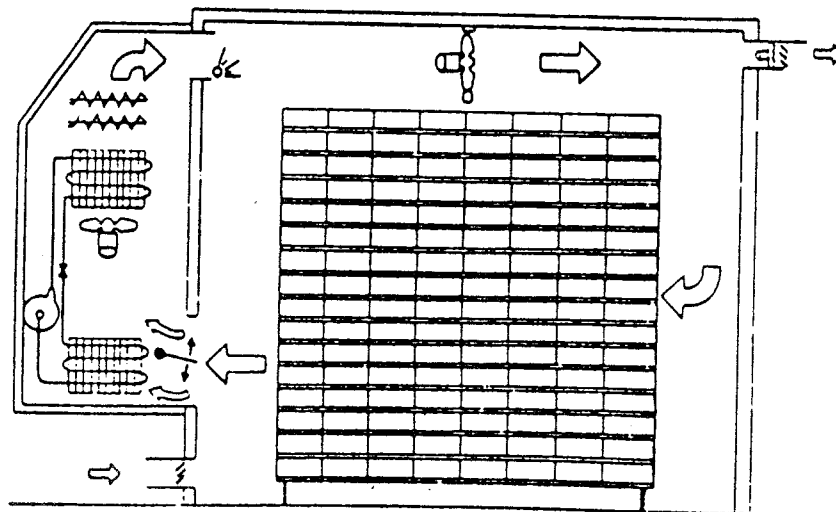


Figure 5 : Séchoir par pompe à chaleur [3].

II.2.4 Autres méthodes de séchage

Terminons en mentionnant les méthodes qui ont eu aussi une certaine application

a) Le séchoir solaire est séduisant pour le petit artisan voulant sécher des petites quantités de bois. C'est une méthode encore actuellement en développement faisant la préoccupation de beaucoup de chercheurs qui avec l'utilisation de l'énergie solaire elle pourrait bien produire des retombées technologiques intéressantes.

b) Le séchage par haute fréquence ou micro-ondes aura toujours besoin d'installation assez coûteuse et le prix de l'électricité est un facteur très important.

Lorsqu'on applique un champ électrique alternatif à un matériau humide, les molécules dans ce matériau en essayant de s'aligner sur la polarité du champ, se mettent à osciller à très grande vitesse. Cette oscillation crée de la chaleur à l'intérieur du matériau.

Théoriquement, la méthode serait idéale puisqu'il n'est pas nécessaire d'apporter de la chaleur de l'extérieur, tout au contraire la chaleur est générée dans le matériau à l'endroit où l'on a besoin pour le séchage, c'est à dire, où le taux d'humidité est plus élevé. Le problème est, qu'il est difficile de doser exactement cet apport de chaleur, surtout pour le bois très humide.

c) Le séchage à haute température qui se distingue du séchage traditionnel par le niveau de température auquel on opère. Le fluide étant de l'air humide, les températures sont généralement plus élevées que celles dans un séchoir traditionnel. Son avantage essentiel est sa rapidité de séchage remarquable.

III -1 ETUDE GENERALE DES SECHOIRS A CONVECTION FORCEE

Pour la bonne compréhension de tout ce qui suivra dans les chapitres suivants une étude sur les séchoirs industriels à convection forcée a été faite.

La condition d'un séchage correct est qu' à chaque degré hygrométrique du bois doivent correspondre une température et un état hygrométrique bien déterminés de l'air de séchage.

Le séchoir capable de réaliser une telle opération, doit comporter une installation susceptible de créer et de maintenir une atmosphère artificielle bien déterminée: à tout instant, on doit pouvoir maîtriser les caractéristiques de l'air.

A cet effet, tout séchoir comporte une enceinte fermée ou "cellule " ou " case " de séchage, le plus généralement construite en maçonnerie, pourvue de dispositifs permettant de conditionner l'air intérieur, c'est à dire :

- un système de chauffage de l'air

- un système d'humidification

- un système de ventilation

Enfin, tout séchoir doit posséder des dispositifs de contrôle des caractéristiques de l'air permettant, à tout moment, de se rendre compte si les conditions nécessaires à un séchage correct sont bien respectées.

Nous allons successivement voir les diverses parties constitutives d'un séchoir :

- Cellule de séchage

La cellule de séchage doit être construite d'une manière telle qu'elle puisse donner les meilleurs rendements possibles.

Les conditions qui règnent dans le séchoir quel'qu'en soit son type sont très dures. En effet, les températures peuvent atteindre 100°C et voire plus, l'humidité de l'air est toujours élevée et le bois au cours du séchage libère des acides (acide formique, acide acétique, tanins) qui attaquent fortement les parois de l'enceinte et les éléments qui y sont fixés.

Une cellule correctement fabriquée doit répondre aux critères suivants :

- être bien isolée

- être étanche

- être construite avec des matériaux résistants
- avoir une porte pratique qui se ferme parfaitement.

- Système de chauffage

Le chauffage est réalisé le plus souvent par un batterie chauffée soit

- à l'eau chaude
- à la vapeur basse ou haute pression
- à l'électricité .

- Système d'humidification

Le bois comme tout matériau hétérogène fragile ne peut sécher aussi vite qu'on le voudrait car il faut éviter des risques de détérioration. Par suite, on doit maintenir autour du bois une atmosphère humide contrôlée.

Le système d'humidification doit être prévu pour saturer l'air pendant certaines périodes de séchage (période préparatoire et de réhumidification) Il peut être réalisé soit par une vaporisation d'eau, soit comme c'est le cas le plus courant, par une injection de vapeur. En outre, il doit être installé obligatoirement après le système de réchauffage, de manière à pouvoir obtenir, dans tous les cas un état hygrométrique bien déterminé.

Outre ce système d'humidification, il existe des cheminées d'entrée et de sortie d'air humide, permettant le réglage à un taux déterminé de l'état hygrométrique de l'air au cours du séchage,

- Système de ventilation

Il est évident que la circulation de l'air est beaucoup plus facile à régler dans les séchoirs à ventilation mécanique, du fait que les ventilateurs peuvent marcher à vitesse déterminée

Dans les figures qui suivent nous présentons quelques types de séchoirs traditionnels selon les températures internes de séchage,

Cellule type N°1 (figure 6) prévue pour un séchage dont la température ne dépassera pas 40 °C. Elle est construite en matériaux traditionnels, les murs sont constitués de parpaings,

de panneaux de particules et d'un isolant (type polystyrène) dont l'étanchéité est assurée par la peinture bitumeuse (au moins deux couches); le toit est réalisé par du panneau de particules et du polystyrène. la porte est constituée d'un panneau sandwich de tôle galvanisée peintes ou non, et d'un isolant polystyrène; enfin le sol comporte, noyé dans le béton, un film plastique évitant les remontées d'humidité du sol.

Cellules type N:2 (figure 7) en maçonnerie pour un séchage traditionnel, dont les températures de séchage ne doivent pas dépasser 70°C, sont constituées d'un double mur avec paroi d'air de 5 cm, la dalle de plafond qui peut ou non être protégée par un toit extérieur, est posée sur les murs sur une feuille de plomb permettant à la dalle de jouer lors des dilatations. L'étanchéité est assurée par un joint bitume.

Enfin des cellules préfabriquées selon les températures régnantes à l'intérieur de la cellule, sont constituées de panneaux qui sont soit fixés à une charpente tout en aluminium placée à l'intérieur de la chambre (figure 8) ou autoportants et boulonnés les uns aux autres par des boulons inoxydables (figure 9) ou encore de feuilles d'aluminium (tôle galvanisée peinte) et d'un isolant densifié fixés à une charpente lamellé-coilé par l'intermédiaire d'un tire plafond (figure 10 et 11). Une toiture légère en tôle d'aluminium à profil trapézoïdal protège les plafonds. Le sol est réalisé en béton.

Ces différents séchoirs sont conditionnés par les dimensions, l'isolation l'étanchéité, le choix des matériaux. En effet les dimensions de la cellule ont évidemment une incidence sur le coût de la construction, ainsi on doit chercher à éviter les grandes portées qui impliquent des plafonds ou des charpentes plus résistants. La cellule de séchage doit être bien isolée. De la même occasion, il ne faut que l'humidité passe à travers les parois. Et enfin le choix des matériaux faisant fonction de la qualité de l'isolation et d'étanchéité, mais aussi influe sur la facilité de mise en oeuvre. Comme il a été remarquer que les bois dégagent des acides corrosifs d'où la nécessité d'employer des matériaux pouvant leurs résister un exemple bien concret est le type de cellule préfabriquée en tôle inoxydable citée

précédemment qui au bout d'un certain temps court risque d'être attaquée par ces acides corrosifs dégagés par exemple par le chêne.

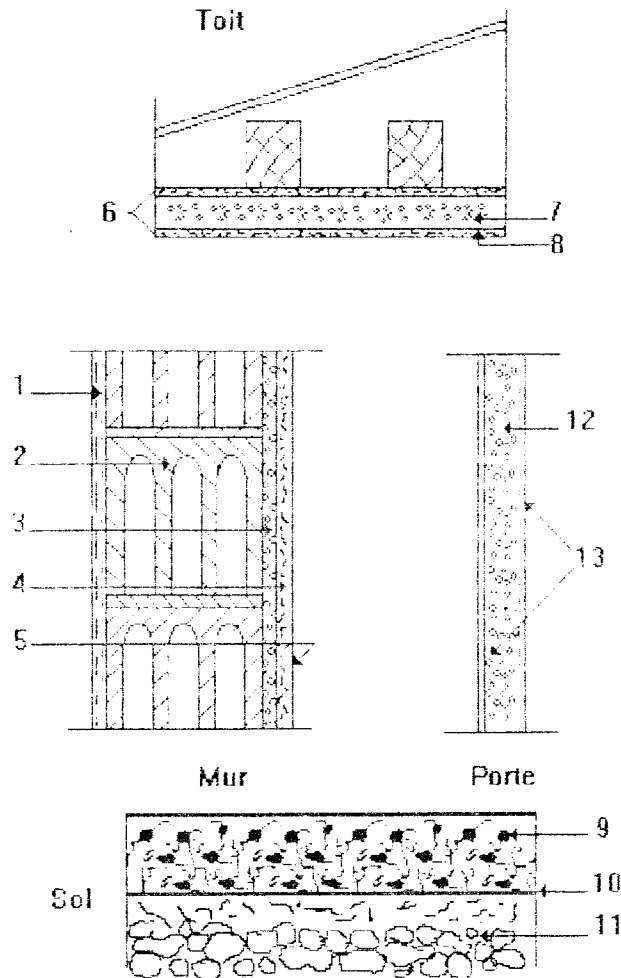


Figure 6 . Cellule type N°1 [3]

Désignation

- 1- Enduit extérieur en ciment
- 2- Parpaings avec 50% de vide
- 3- Isolant plastique
- 4- Panneau hydrofuge
- 5- Peinture bitumeuse
- 6- Panneau hydrofuge
- 7- Isolant plastique
- 8- peinture bitumeuse
- 9- Béton de granulats lourds
- 10- Film plastique
- 11- Pierres
- 12- Isolant plastique
- 13- tôles galvanisées

Dalle de plafond formant aussi toit

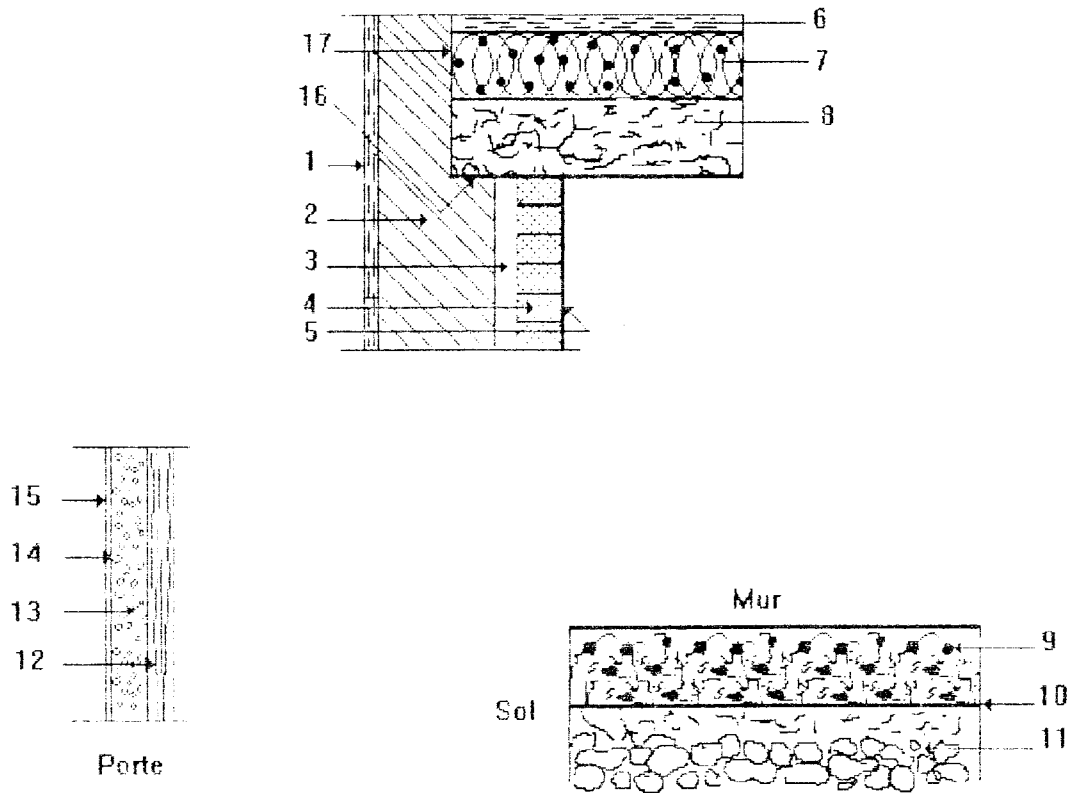


Figure 7 : Cellule type N°2 [3]

Désignation

- 1- Enduit extérieur
- 2- Parpaings
- 3- Couche d'air
- 4- Brique cuite
- 5- Peinture bitumeuse
- 6- Enduit de ciment
- 7- Scories
- 8- Dalle de beton
- 9- Beton de granulats lourds
- 10- Film plastique
- 11- Pierres
- 12- Lamé de bois assemblee par rainures et languettes
- 13- Isolant plastique
- 14- Panneau
- 15- Peinture bitumeuse

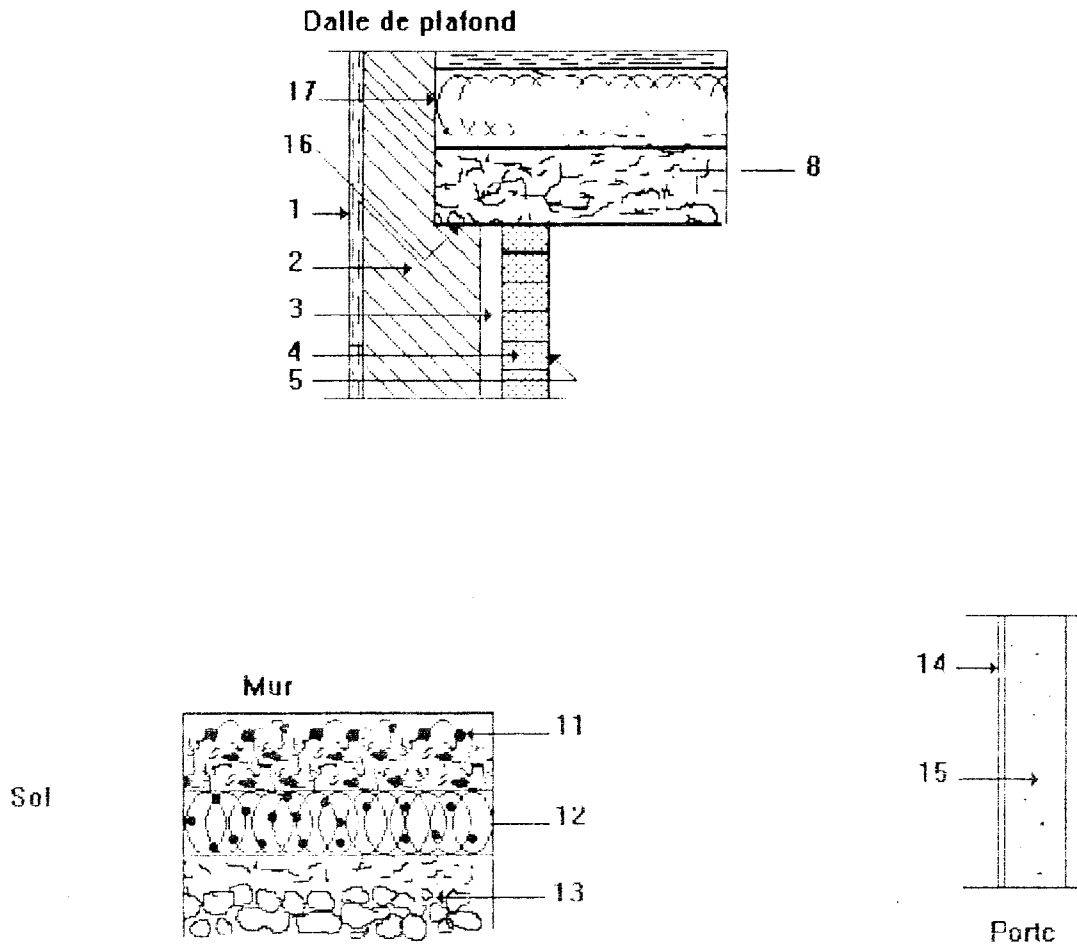


Figure 8 : Cellule type N°3 [3]

Désignation

- 1- Enduit extérieur en ciment
- 2- Briques creuses
- 3- Lame d'air
- 4- Briques pleines
- 5- Enduit de ciment
- 6- Peinture bitumense
- 7- Aération paroi d'air
- 8- Enduit ciment
- 9- Laine minerale
- 10- Dalle de beton
- 11- Dalle de béton
- 12- Couche de scories
- 13- Pierres
- 14- tôle d'aluminium
- 15- Laine de roche

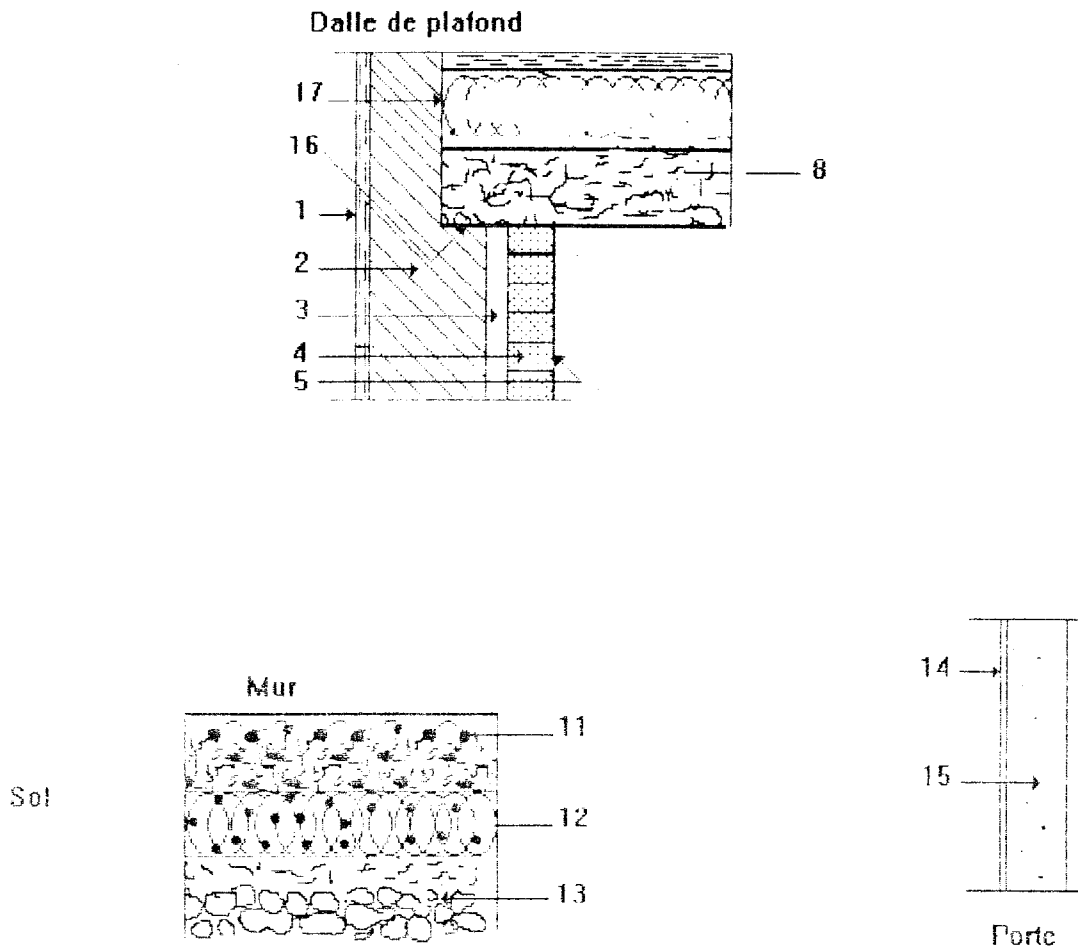


Figure 8 . Cellule type N°3 [3]

Designation

- 1- Enduit exterieur en ciment
- 2- Briques creuses
- 3- Lame d'air
- 4- Briques pleines
- 5- Enduit de ciment
- 6- Peinture bitumeuse
- 7- Aeration paroi d'air
- 8- Enduit ciment
- 9- Laine minerale
- 10- Dalle de beton
- 11- Dalle de beton
- 12- Couche de scories
- 13- Pierres
- 14- tôle d'aluminium
- 15- Laine de roche

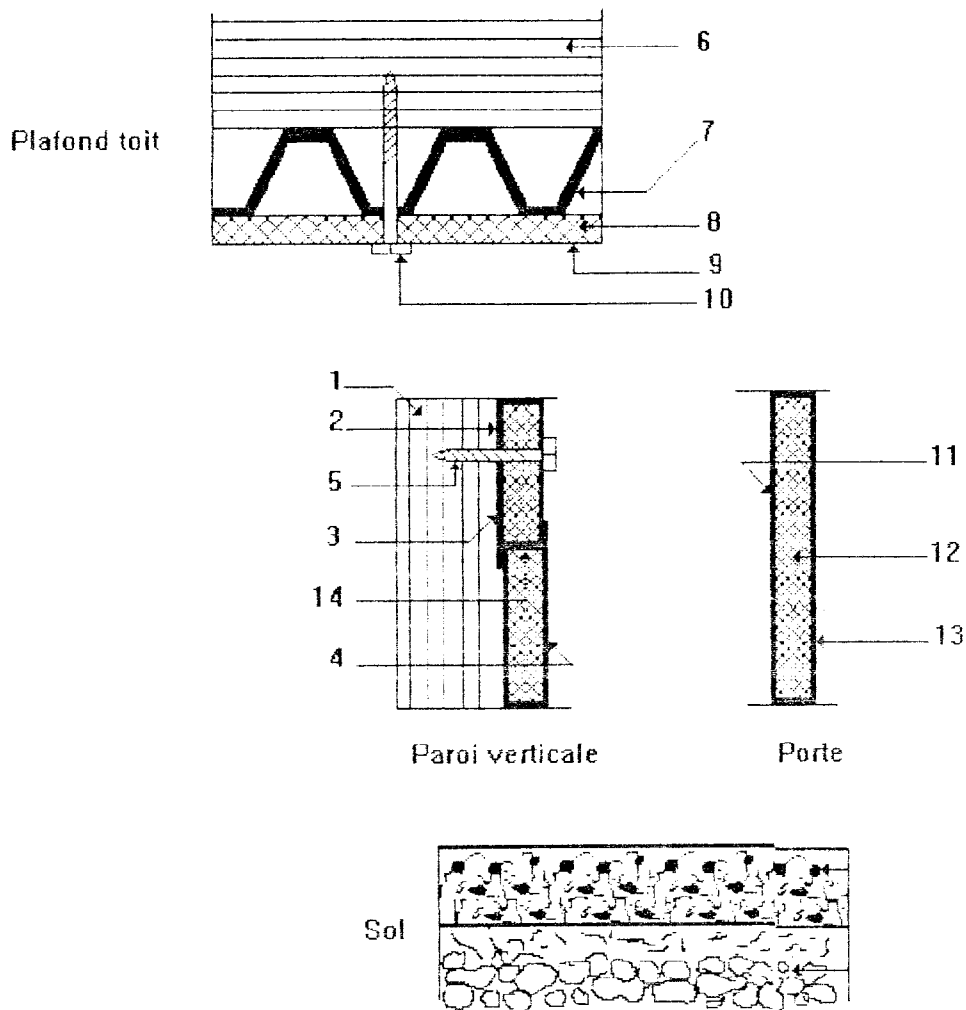


Figure 9 : Cellule type N°4 [3]

Désignation

- 1- Poteau en bois recevant les panneaux
- 2- Tôle d'aluminium
- 3- Isolant mousse densifié
- 4- Tôle d'aluminium
- 5- tire-fond
- 6- Poutre en bois
- 7- Tôle galvanisée
- 8- Isolant mousse
- 9- Tôle d'aluminium
- 10- Tire-fond
- 11- Tôle d'aluminium
- 12- Isolant
- 13- Tôle d'aluminium

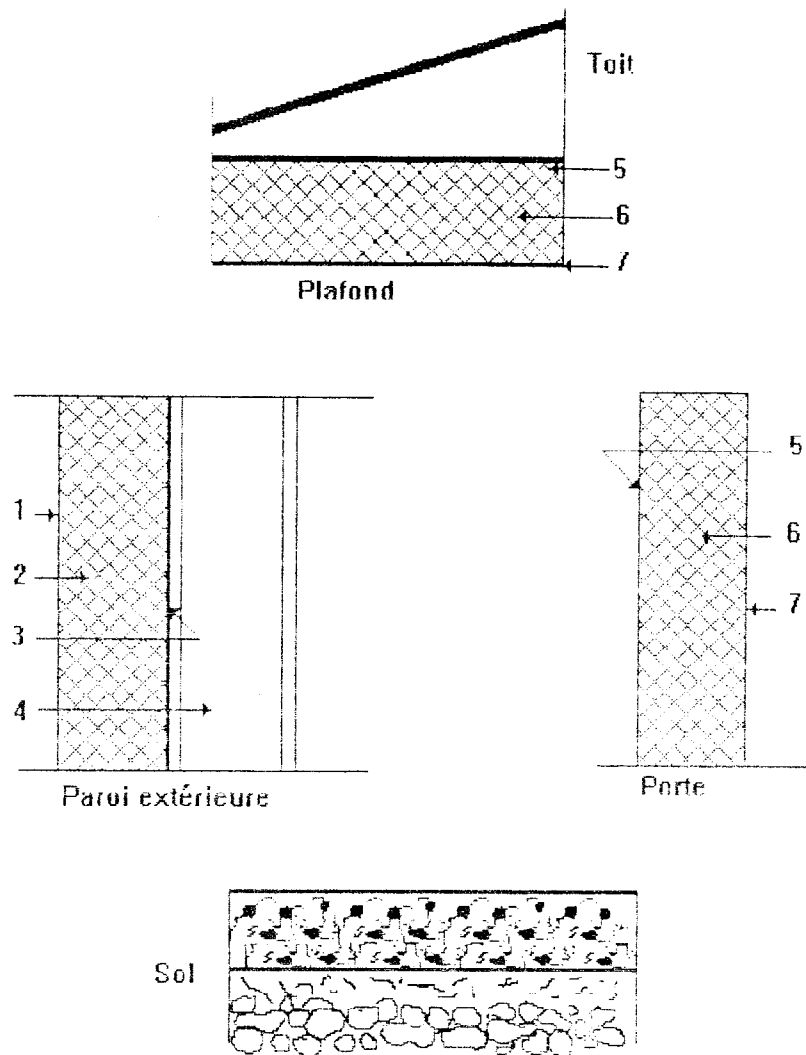


Figure 10 : Cellule type N°5 [3]

Designation

- 1- Tôle d'acier galvanisée et peinte
- 2- Isolant en mousse
- 3- Tôle d'acier galvanisée et peinte
- 4- Poteau de charpente métallique
- 5- Tôle d'acier galvanisée et peinte
- 6- Isolant en mousse
- 7- Tôle d'acier galvanisée et peinte

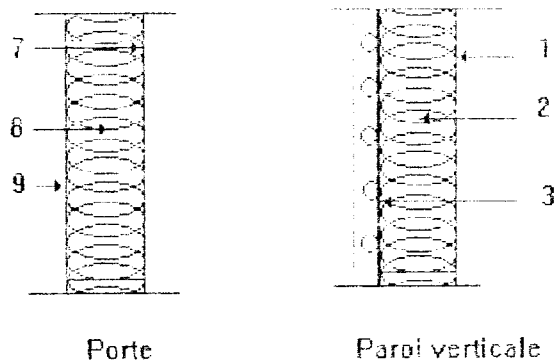
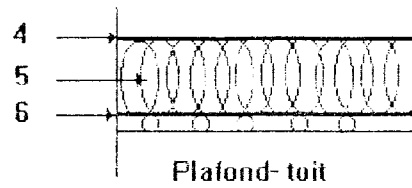


Figure 11 : type de cellule N 6 [3]

Désignation

- 1- tôle d'aluminium
- 2- laine de roche
- 3- tôle d'aluminium
- 4- tôle d'aluminium
- 5- laine de roche
- 6- tôle d'aluminium
- 7- tôle d'aluminium
- 8- laine de roche
- 9- tôle d'aluminium

IV- CONCLUSION

Sur la base de cette étude et à travers les avantages et inconvénients résumés dans le tableau 1, nous voyons bien que les séchoirs traditionnels occupent encore une place importante malgré le temps de séchage long.

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des différents procédés de séchage

Désignation	Avantages	Inconvénients
1. Séchoir traditionnel	<ul style="list-style-type: none"> . Très bonne qualité de séchage . Conduite facile . demande quasiment les dispositifs universels. 	<ul style="list-style-type: none"> . Temps de séchage élevé
2. Séchoir à bois	<ul style="list-style-type: none"> . Rapidité de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> . Coût très élevé . Beaucoup de matériel . Demande une très grande attention pour les essences faibles sujet de coloration par et le chêne. . Conduite très difficile
3. Séchoir par déshumidification	<ul style="list-style-type: none"> . Rapidité de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> . Coût très élevé . Beaucoup de matériel . Conduite devenant une affaire très particulière
4. Séchoir par micro-onde	<ul style="list-style-type: none"> . Chauffer régénère le l'intérieur du matériau 	<ul style="list-style-type: none"> . Coût très élevé . Beaucoup de matériel . Dosage de la chaleur en un endroit donc le reste humide.
5. Séchoir haute température	<ul style="list-style-type: none"> . Rapidité de séchage 	<ul style="list-style-type: none"> . Coût très élevé. . Conduite très difficile.

Pour avoir des informations scientifiques et technologiques de ce séchoir prototype situé dans la catégorie des séchoir traditionnels, qui par sa simplicité et son coût peu élevé, constitue une première dans les séchoirs traditionnels, nous allons en premier lieu étudié ce dispositif expérimental, qui fera l'objet du second chapitre.

DEUXIEME

CHAPITRE

DEUXIEME CHAPITRE

ETUDE DU SECHOIR PROTOTYPE

Le séchage des bois en scierie est lié au coût des investissements, qui lui même est tributaire de différents facteurs que nous avons vu dans le chapitre précédent. Dans ce contexte un séchoir prototype constitué de panneaux composites à base de bois qui fait d'ailleurs sa particularité par rapport aux séchoirs traditionnels a été mis au point dont notre objectif a été la récolte d'informations scientifiques et techniques. Dans ce chapitre nous avons essayé de donner les différents systèmes constituant ce séchoir prototype à convection forcée et aussi les bases de conduite d'un cycle de séchage.

I- DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le séchoir prototype dimensionné pour cette étude doit reproduire les conditions de séchage convectif à basse température et a été conçu pour que les caractéristiques de séchage soient significatives d'un cycle normal.

Ce prototype est équipé de différents instruments de mesures, débitmètres, sondes de température, humidimètres, pesée continue, qui permettent de suivre respectivement les débits d'air (entrée, recyclé, sortie), les températures et l'humidité relative de l'air et enfin le poids de la pile de bois (figure 12).

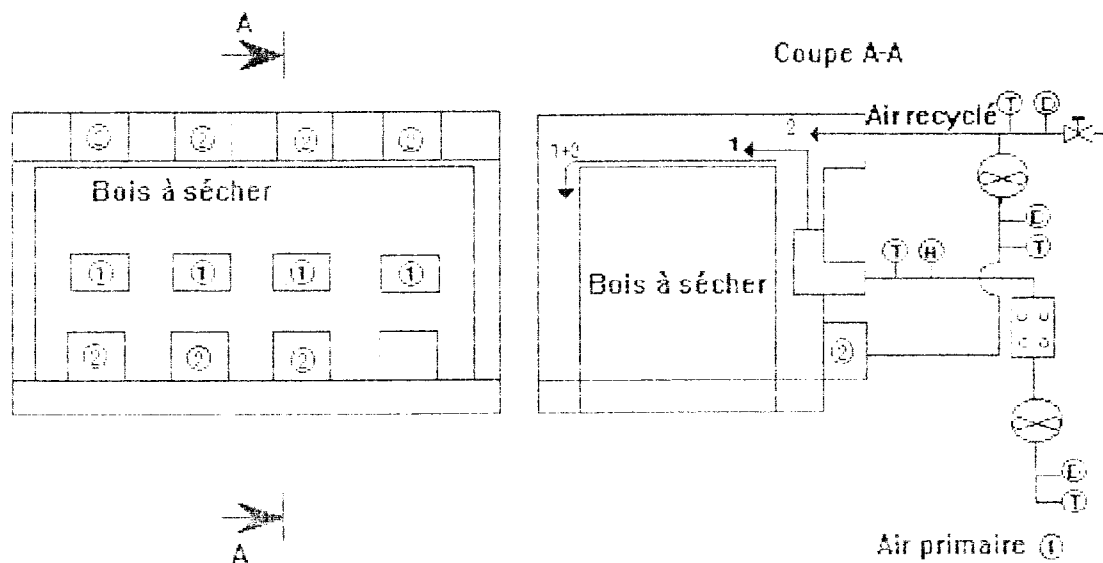


Figure 12 : Séchoir prototype avec accessoires

Designation

T - Thermocouple

H - Humidimètre

D - Débitmètre

1 - Air primaire

2 - Air recycle

1.1 L'ossature

Les parois constituant la cellule sont du type panneau sandwich (figure 13), dont l'âme en mousse polyuréthane est prise entre deux panneaux de contreplaqué okoumé, traités en surface par de la résine de fibre de verre, collés et cloués.

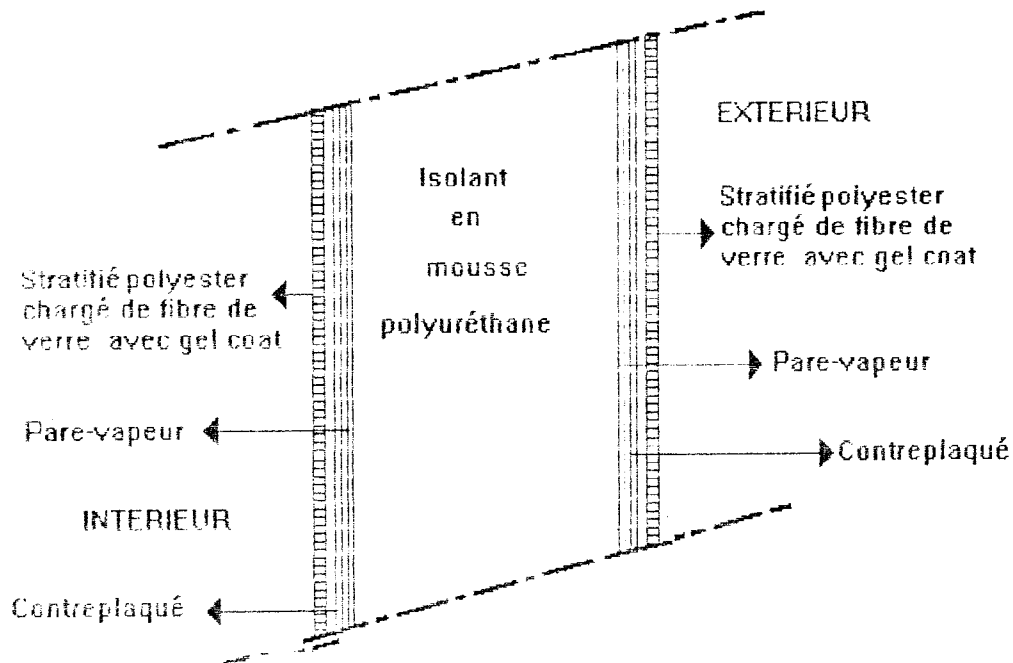


Figure 13 . Schéma d'une paroi de cellule

La paroi est constituée de l'intérieur vers l'extérieur des éléments suivants :

- un gel-coat polyester ($400\text{g}/\text{m}^2$)
- un stratifié : résine (400 g/ m^2) + fibre de verre (400 g/ m^2)
- un contreplaqué
- un pare-vapeur
- un isolant rigide
- un pare-vapeur
- un contreplaqué
- un stratifié
- un gel coat

Les caractéristiques techniques du matériau composite stratifié formant les parois sont portés en annexe 1.

I . 2 Le circuit d'air

Le circuit d'air est réalisé à l'aide de tube en acier inoxydable d'épaisseur 1,5 mm. L'assemblage est réalisé par soudures et brides de tôle. Des piquages sont mis en place pour l'ensemble des capteurs. Les gaines sont calorifugées sur leur parcours (figure 12).

Le circuit d'air primaire permet à l'aide d'un ventilateur d'alimenter en air extérieur la cellule avec un débit volumique constant fixé à 30 m³/h. L'air est préchauffé avant d'entrer dans le séchoir à l'aide d'un préchauffeur électrique. La température maximale a été fixée à 130 °C. L'air chauffé est introduit dans la cellule au moyen de "**quatre orifices** " orientés vers le plafond (figure 12). L'air du séchoir est recycle par l'intermédiaire d'un ventilateur à débit variable. La mise en route de circuit secondaire se fait après celle du circuit primaire afin d'assurer le brassage de l'air et d'homogénéiser la température à l'intérieur de la cellule. Pendant cette phase, la montée en température va être limitée par la quantité d'air que peut contenir le séchoir. on place pour cette raison une vanne de rejet. L'air est injecté dans le séchoir entre le faux-plafond et le plafond par l'intermédiaire de "**quatre orifices** ", le mélange se fait à cet endroit.

I . 3 Instrumentation

Nous avons placé tout un ensemble d'appareils de mesure sur les circuits d'air et à l'intérieur du séchoir. Chacun des capteurs délivre un signal électrique numérique avec une sortie analogique permettant l'acquisition des données pour une éventuelle installation de micro-ordinateur.

Les grandeurs mesurées sont :

- l'humidité de l'air
- la température de l'air
- les débits volumiques d'air

Les capteurs sont positionnés comme suit :

- une sonde de température et un débitmètre avant chaque ventilateur
- une sonde de température et une sonde d'humidité à l'entrée du séchoir sur le circuit d'air primaire
- une sonde de température et une sonde d'humidité sur le circuit d'air secondaire
- une sonde de température et un débitmètre en amont de la vanne de rejet.
- des sondes de température pour connaître la température de l'air à différents niveaux à l'intérieur du séchoir.

Pour des raisons de sécurité et de bon fonctionnement du séchoir, un certain nombre de précautions ont été prises :

La montée en température de la batterie de chauffe est effectuée uniquement si le ventilateur d'air primaire et le ventilateur de recyclage sont en service.

La sonde de température disposée à l'intérieur du séchoir qui mesure une température de seuil de 80 C stoppe tout si cette dernière est dépassée

De plus la charge de bois est placée sur un plancher, reposant lui-même sur trois dynamomètres de flexion. le tout est relié à un indicateur numérique. On peut suivre ainsi au cours du temps la masse de la pile de bois.

Les différentes grandeurs mesurées au cours du déroulement d'un séchage, température, humidité de l'air, masse de la pile de bois, sont traduites par des tensions électriques. Celles-ci sont enregistrées sur une centrale.

II - DEROULEMENT D'UN CYCLE DE SECHAGE

II . 1 Préparation des bois

Avant de mettre en route le séchoir, quelques précautions sont à prendre et un certain nombre d'opérations sont à effectuer. Un lot de bois à sécher doit, pour permettre un séchage correct et économique, être constitué de bois d'humidité et d'épaisseur voisines de plus, le succès du séchage dépend en grande partie de la qualité de l'empilage.

La méthode d'empilage la plus usuelle est celle qui consiste à disposer les planches en lits horizontaux. Chaque lit est séparé par des baguettes. L'espace laissé entre les planches dans un même lit horizontal est de 30 à 40 mm,[3, 4].

Le baguetage est une opération importante qui demande à être faite avec grand soin. L'épaisseur, la largeur et l'écartement des baguettes sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 2 . Epaisseur, largeur et écartement des baguettes à respecter pour un bon empilage [3].

Epaisseur des planches (mm)	Epaisseur des baguettes (mm)	Largeur des baguettes (mm)	Ecartement des baguettes (mm)
Jusqu'à 29	15 à 20	20 à 25	400 à 600
de 29 à 54	20 à 30	25 à 30	600 à 800
au-dessus de 54	40	40	800 à 1200

II . 2 Calcul théorique du temps de séchage

Pour le calcul théorique du temps de séchage, on utilise une méthode établie d'après des documents américains et allemands et résumés par **BRAUSHIRN** cités par **VILLIERE** [3].

Elle tient compte des facteurs tels que, l'essence (densité), l'épaisseur des bois, l'humidité initiale, le type de séchoir employé (séchoir prototype) et enfin la qualité de séchage.

La base de calcul repose sur la recherche d'une grandeur " s " qui représente l'humidité en (%) enlevée par le séchage en 1 heure.

Connaissant cette grandeur " s " pour un lot de bois donné et une installation déterminée la durée de séchage " t " s'exprime par la formule suivante :

$$t = \frac{\Delta H}{s} \quad (2)$$

où ΔH est la différence en % des humidités initiales et finales et s est la grandeur représentant l'humidité en % enlevée par le séchage en une heure

Ce facteur " s " est le produit de 5 coefficients a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 , qui dépendent respectivement de l'humidité du bois, de la vitesse de l'air, de la densité du bois, de l'épaisseur du bois et enfin de la qualité de séchage.

Tableau 3 : Valeurs des coefficients a_1 , a_3 , a_4 [3]

Humidité du bois (%)	a_1	Densité	a_3	Epaisseur du bois (mm)	a_4
70 à 41	2,0	350	1,25	15	2,10
40 à 31	1,7	375	1,10	20	1,40
30 à 21	1,1	400	1,00	25	1,40
20 à 15	0,9	425	0,90	30	0,80
inférieure à 15	0,8	450	0,85	35	0,65
		475	0,77	40	0,55
		500	0,72	50	0,40
		550	0,63	60	0,30
		600	0,58	70	0,25
		650	0,48	80	0,20
		700	0,44	90	0,15
		750	0,39	100	0,12
		800	0,36	120	0,10

a_2 - coefficient dépendant de la vitesse de l'air

- Très bons séchoirs à ventilation mécanique bien calorifugés à forte vitesse

d'air..... $a_2 = 1$

-Séchoirs normaux à ventilation mécanique à vitesse moyenne $a_2 = 0,8$

-Séchoir à ventilation naturelle $a_2 = 1$

a_5 - coefficient dépendant de la qualité de séchage

-Séchage normal courant $a_5 = 1$

-Séchage très prudent pour les bois de qualité $a_5 = 0,9$

-Séchage grossier sans spécifications de qualité $a_5 = 1,1$

II . 3 Coefficient de remplissage

Le volume de bois qui entre dans la cellule par rapport au volume de cette dernière détermine le coefficient de remplissage.

Le volume réel de bois est calculé de la manière suivante

$$V = L.l.h.k.\left[\frac{e}{e+b}\right] \quad (3)$$

où :

L est la longueur de la pile de bois

l est la largeur de la pile de bois

h est la hauteur de la pile

e est l'épaisseur des planches

b est l'épaisseur des baguettes

k est un coefficient tenant compte du fait que les planches ne sont pas jointives.

Le coefficient de remplissage C_r est égal à :

$$C_r = \frac{V}{V_s} \quad (4)$$

Dans le cas du séchoir prototype $L=1,50$ m, $l=0,530$ m, $h=0,657$ m, $e=0,027$ m
 $b=0,015$ m, $k=0,9$ d'où le volume réel de bois V est égal à $0,302$ m³

Le volume intérieur du séchoir $V_S = 1,05$ m³,

Le coefficient de remplissage est égal à $0,29$.

Selon les sources du cahier du Centre Technique du Bois et de l' Ameublement (CTBA) citées par **VILLIERE** [3], le coefficient de remplissage varie entre $0,15$ et $0,35$ selon le type de séchoir, par conséquent celui-ci est bien représentatif des séchoirs industriels.

II . 4 Disposition des planches dans la pile de bois

La disposition des planches et des échantillons témoins pour la détermination de l'humidité et le comportement des parois réalisée en fonction de l'accessibilité du séchoir est représentée sur la figure 14.

Pour caractériser l'homogénéité de séchage dans la pile de bois, qui fera l'objet du troisième chapitre, on placera d'une part des échantillons témoins de l'essence à sécher qui seront disposés de la manière suivante :

- lit n° 2 ou lit inférieur : 2 échantillons A1 et A2 répartis dans la profondeur déterminant respectivement le niveau 1 et le niveau 1'
- lit n° 8 ou lit médian : 2 échantillons B1 et B2, répartis de la même façon que pour le lit N°2, déterminant respectivement le niveau 2 et le niveau 2'.
- lit n°14 ou lit supérieur : 2 échantillons C1 et C2 répartis comme les précédents et déterminant respectivement les niveaux 3 et 3'.

Enfin d'autre part des thermocouples qui nous indiqueront les températures aux différents niveaux, à savoir niveaux supérieur, médian, inférieur.

Pour étudier le comportement des parois aux différents cycles de séchage faisant l'objet du quatrième chapitre, on placera à l'intérieur de la pile des éléments représentatifs de la paroi du sechoir.

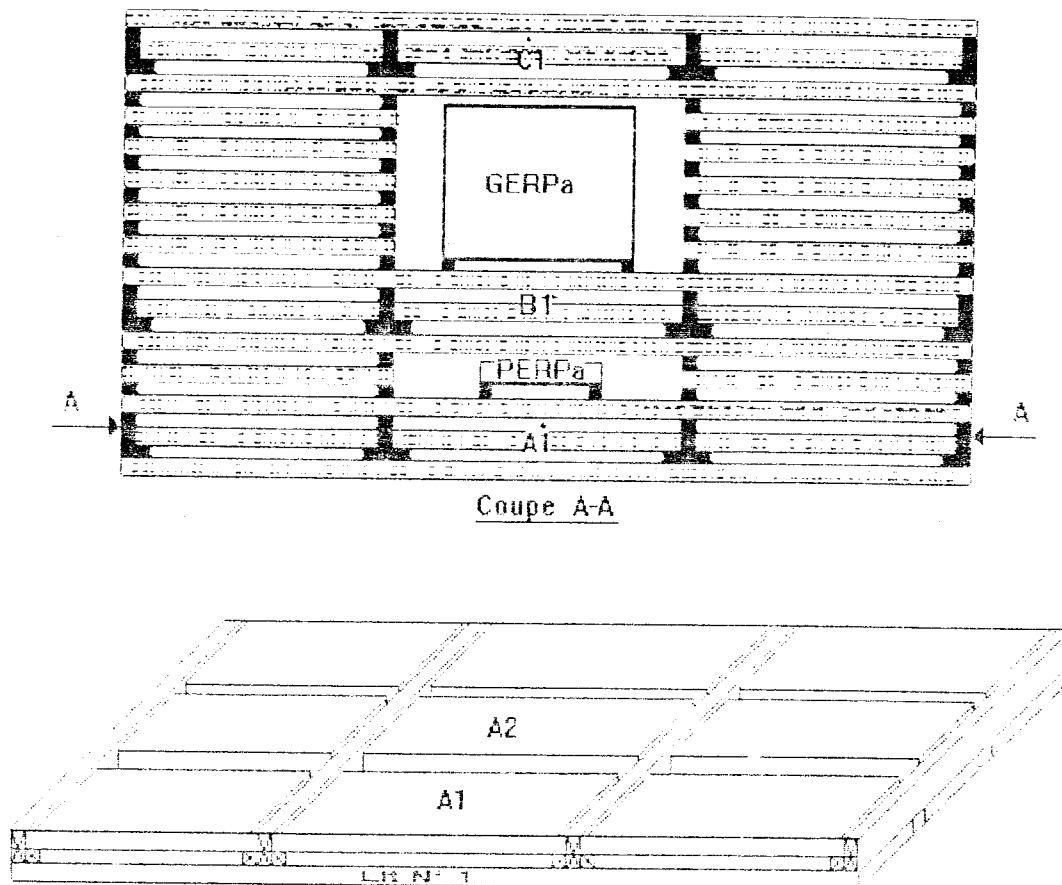


Figure 14 . Disposition des échantillons dans la pile de bois

Désignation

GERPa - Grand élément représentatif de la paroi

PERPa - Petit élément représentatif de la paroi

A1 - A2 - B1 - B2 - C1 - C2 - Echantillons témoins pour la détermination de l'humidité

. - Thermocouples

II . 5 Conditions opératoires

Après le calcul théorique du temps de séchage, on fixe un temps moyen de séchage (heures) qui sera déterminé ultérieurement pour chaque essence donnée. La température de consigne de l'air à l'intérieur du séchoir sera fixée comme suit :

- résineux : température de consigne 75 °C.
- feuillus : température de consigne 60 °C.

Ces températures moyennes sont prises à partir des tables de séchage [3, 4].

La température s'élève progressivement jusqu'à la valeur choisie. Une fois atteinte, le dispositif de régulation entre en jeu et maintient cette température constante jusqu'à la fin de fin de séchage. Le débit d'air frais, ainsi que le débit de recyclage seront maintenus constants durant tout le cycle de séchage.

II . 6 Détermination de l'humidité des échantillons et de l'humidité moyenne de la pile de bois

Pour la détermination de l'humidité des échantillons, nous employons la méthode classique qui consiste en une pesée de chaque témoin en début et en fin de cycle de séchage.

L'humidité initiale x_i de chaque témoin est égale à :

$$x_i = \frac{m_i - m_c}{m_o} \cdot 100 \quad (5)$$

où : m_i est la masse initiale (g)

m_0 est la masse anhydre (g) obtenue par dessiccation dans une étuve réglée à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (m_0),

Il en est de même pour l'humidité finale x_f qui est égale à :

$$x_f = \frac{m_f - m_0}{m_0} 100 \quad (6)$$

où m_f est la masse finale des échantillons.

Connaissant la masse initiale M_j totale de la pile de bois humide à l'instant $t = 0$ et l'humidité moyenne du lot de bois X_j comme étant la moyenne des humidités initiales des 6 échantillons placés dans le séchoir nous pouvons déterminer la masse anhydre M_0 par la relation :

$$M_0 = \frac{m_j}{1 + 0,01 \cdot X_j} \quad (7)$$

III- CONCLUSION

Après avoir étudié notre séchoir prototype dans tout son ensemble et donné toutes les conditions opératoires pour le bon déroulement d'un cycle de séchage, abordons maintenant l'homogénéité de séchage qui fera l'objet du troisième chapitre.

TROISIEME

CHAPITRE

TROISIEME CHAPITRE

ETUDE DE L'HOMOGENEITE DE SECHAGE

A la lumière de quelques rappels élémentaires d'anatomie énoncés dans le premier chapitre, on conçoit la très grande diversité que peuvent présenter des échantillons de bois massif d'espèces et provenance différentes. Une étude expérimentale ayant trait au matériau bois ne peut évidemment traiter qu'un nombre limité d'échantillons et il faut se garder de toute extrapolation des résultats obtenus d'une essence à une autre. Toutefois, comme nous le verrons ci-après, les essais sur une même essence peuvent être considérés comme représentatifs de l'essence. A ce jour, notre travail expérimental comme il a été présenté, a porté sur deux essences, un résineux (sapin) et un feuillu (chêne). Notons qu'avant d'aborder ces études expérimentales, nous avons procédé pendant plusieurs semaines à une mise au point du séchoir permettant de remédier à certains défauts d'étanchéité et de vérifier les indications des différents capteurs. Pendant ces opérations préliminaires, nous avons constaté des températures différentes à différents niveaux (inférieur, médian, supérieur), dont les résultats sont portés en annexe 2. Dans ce contexte que nous avons travaillé à étudier l'homogénéité de séchage. Nous attirons l'attention du lecteur que l'étude a porté initialement sur le sapin et ensuite sur le chêne.

I - ETUDE DES TEMPERATURES INTERNES ET DU TAUX DE SECHAGE

La pile de bois est constituée d'avivés humides, de dimensions 1,5 x 0,15 x 0,027 n'ayant subi aucun cycle de séchage artificiel. A partir de ces planches on découpe les planches témoins de dimensions 0,473 x 0,15 x 0,027 m (figure 14).

Nous avons placé à chaque niveau des thermocouples nous indiquant les températures respectives supérieure, médiane et inférieure au cours du séchage.

De la même façon nous avons déterminé les humidités initiales et finales des échantillons témoins placés dans la pile de bois à chaque niveau.

Pour l'étude de l'homogénéité de séchage nous avons effectué plusieurs cycles de séchage avec des conditions opératoires que nous citerons au fur et mesure pour chaque essai. Le débit d'air primaire est égal à 30 m³/h. L'homogénéité sera étudiée à travers les températures internes et le taux de séchage (rapport de la différence de l'humidité initiale et l'humidité finale sur l'humidité initiale du bois).

II . RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

II .1 Etude du sapin

Pour la détermination du temps de séchage, nous appliquons la méthode de **BRAUSHIRN**, citée précédemment dans le deuxième chapitre, qui nous donne :

$$a_1=0,8 \quad a_3=0,72 \quad a_4=0,8 \quad a_5=1,1$$

L'humidité moyenne initiale de la pile de bois $X_i = 40 \%$,

L'humidité moyenne finale de la pile de bois $X_f = 6 \%$.

$$s_k = 0,8 \times a_2 \times 0,72 \times 0,8 \times 1,1$$

où a_2 est déterminé selon le tableau 4.

Tableau 4 : détermination du temps de séchage

Humidité (%)	a_2	s_k	t_k
40 à 31	1,7	0,86	$t_1 = 10/0,86$
30 à 21	1,1	0,56	$t_2 = 10/0,56$
20 à 15	0,9	0,46	$t_3 = 6/0,46$
15 à 6	0,6	0,30	$t_4 = 8/0,30$

$$t_{\text{total}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 69,2 \text{ heures}$$

Pour tous les essais effectués la durée de séchage sera fixée à 72 heures

Plusieurs cycles de séchage ont été effectués selon des conditions opératoires bien déterminées que nous citerons au fur et à mesure.

Essai N°1 et N°2

Comme les essais N°1 et N°2 ont les mêmes conditions opératoires à savoir, un temps de séchage de 72 heures, débit d'air frais de 30 m³/h, débit d'air recyclé de 50 m³/h, l'analyse portera sur l'essai N°1, dont les résultats obtenus pour le taux de séchage sont donnés dans le tableau 5,

Tableau 5 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	45	38	43	46	50	52
Humidité finale (%)	5	8	14	14	18	21
Taux de séchage (%)	89	80	74	70	64	61

Nous remarquons une différence entre les taux de séchage aux différents niveaux et même sur un même niveau. Cela se traduit donc par une hétérogénéité du séchage dans le sens de la hauteur, mais aussi dans la profondeur de la pile.

Cette hétérogénéité est également observée sur les courbes de la figure 15 donnant les températures internes (température inférieure, température médiane et température supérieure) données par les sondes de température placées à l'intérieur du séchoir à la même hauteur que les échantillons témoins.

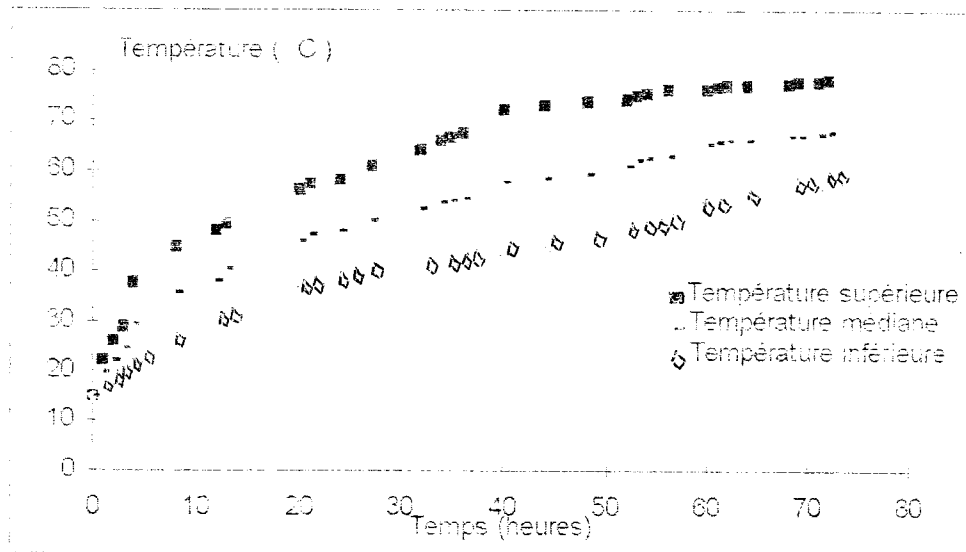


Figure 15 : Courbes des températures intérieures

Ainsi, il existe un écart important entre les températures inférieure et supérieure (en moyenne de 20 °C). Cette différence est due au fait que l'air d'alimentation dont la température maximale est de 130°C débouche directement sur la pile de bois ce qui accroît la température supérieure. Compte tenu de ces observations et afin d'éviter des risques d'oxydation, nous avons placé une plaque de tôle galvanisée à l'intérieur du séchoir, séparant ainsi la pile de bois et le séchoir. Afin de palier à d'éventuelles fuites d'air, des joints des différentes liaisons des parois ont été refaits et après chaque essai on vérifie l'état des joints. Enfin un bac de récupération de l'eau éventuellement condensée a été placé sous la pile.

Essai N°3

Compte tenu des modifications apportées, nous avons dû augmenter le débit d'air recyclé en maintenant un débit d'air primaire constant, d'où les conditions opératoires suivantes :

Température de séchage $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temps de séchage $\tau = 72$ heures

Débit d'air entrée $Q_e = 30\text{ m}^3/\text{h}$

Débit d'air recyclé $Q_{rec} = 100\text{ m}^3/\text{h}$

Les courbes de températures internes et les valeurs du taux de séchage des six (6) échantillons sont donnés respectivement le tableau 6 et la figure 16.

Tableau 6 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	52	47	40	39	47	41
Humidité finale (%)	7	10	11	12	16	16
Taux de séchage (%)	87	79	73	70	65	61

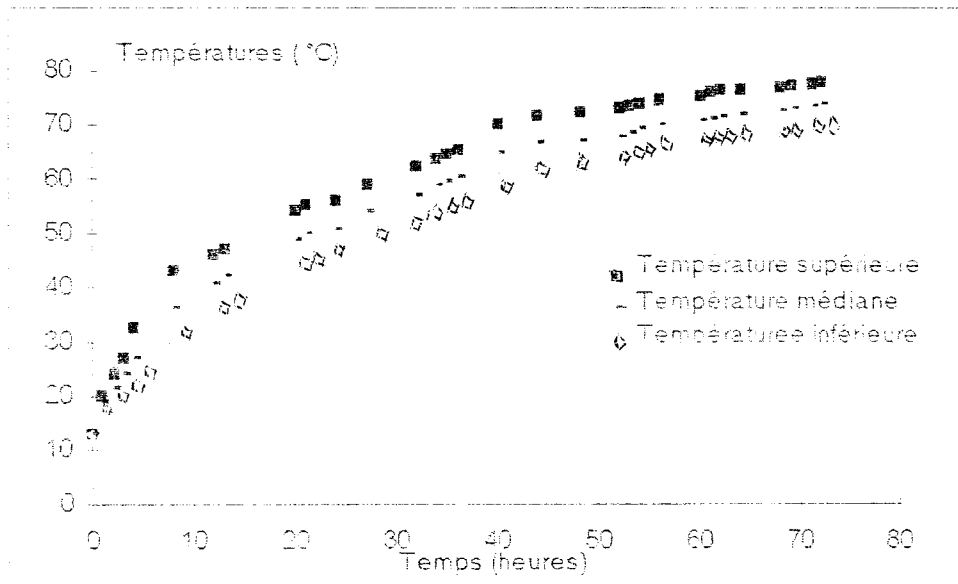


Figure 16 : Courbes des températures intérieures

L'observation des résultats montre encore des différences entre les températures supérieure, médiane et inférieure et il en est de même pour les taux de séchage.

Afin d'accentuer l'homogénéité nous avons procédé à de nouveaux essais en augmentant le débit de recyclage pour tous les cycles de séchage à raison de 50 m³/h, tout en gardant la plaque de tôle galvanisée.

Essai N°4

Conditions opératoires

Température de séchage $T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$

Temps de séchage $t = 72 \text{ heures}$

Débit d'air entrée $Q_e = 30 \text{ m}^3/\text{h}$

Débit d'air recyclé $Q_{rec.} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$

Nous constatons que cette différence existe et que le séchoir n'est pas tout à fait homogène comme l'indiquent le tableau 7 des taux de séchage ainsi que les courbes des températures intérieures de la figure 17.

Tableau 7 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	38	42	46	37	40	43
Humidité finale (%)	5	8	12	11	14	16
Taux de séchage (%)	87	81	74	70	65	63

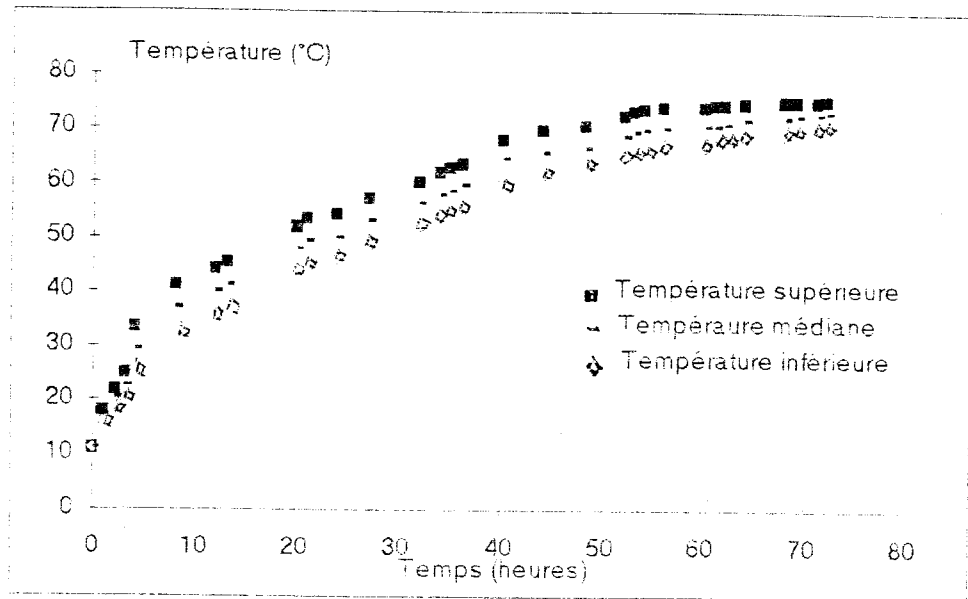


Figure 17 : Courbes des températures intérieures

Essai N°5

Conditions opératoires.

Température de séchage	$T = 75 \text{ } ^\circ\text{C}$
Temps de séchage	$t = 72 \text{ heures}$
Débit d'air entrée	$Q_e = 30 \text{ m}^3 / \text{h}$
Débit d'air recyclé	$Q_{rec} = 200 \text{ m}^3 / \text{h}$

Une sensible amélioration est remarquée malgré des différences entre les taux de séchage du tableau 8 et les températures intérieures de la figure 18.

Tableau 8 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	50	45	39	40	48	47
Humidité finale (%)	8	9	10	12	16	17
Taux de séchage (%)	87	80	74	71	67	64

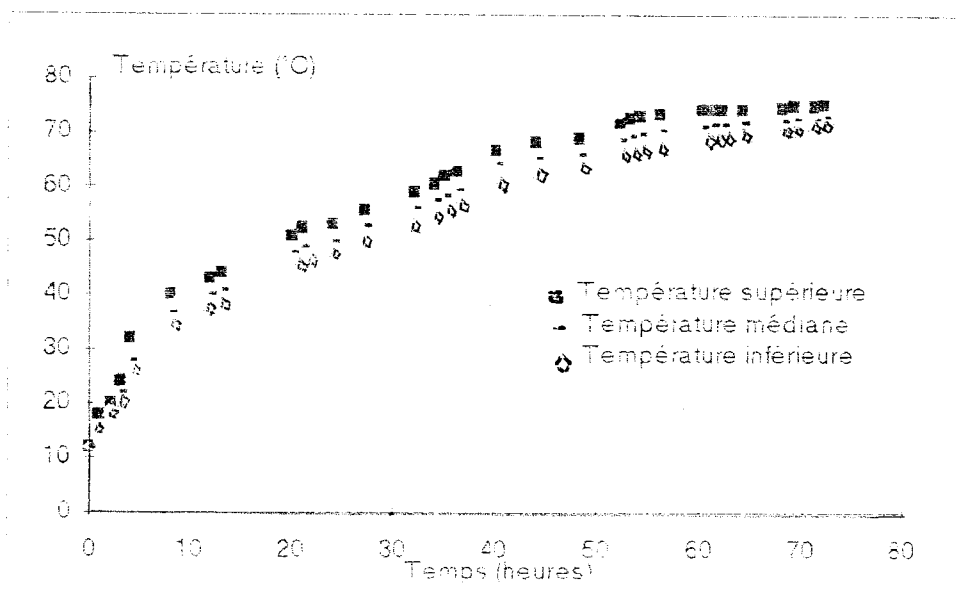


Figure 18 : Courbes des températures intérieures

Essai N°6

Conditions opératoires:

Température de séchage $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temps de séchage $t = 72$ heures

Débit d'air entrée $Q_e = 30 \text{ m}^3 / \text{h}$

Débit d'air recycié $Q_{rec.} = 250 \text{ m}^3 / \text{h}$

A travers les taux de séchage du tableau 9 des six (6) échantillons et sur les courbes de températures internes (figure 19), nous remarquons que l'homogénéité de séchage n'est pas encore satisfaisante.

Tableau 9 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	42	43	52	45	39	50
Humidité finale (%)	6	9	13	13	12	18
Taux de séchage	85	81	77	72	67	64

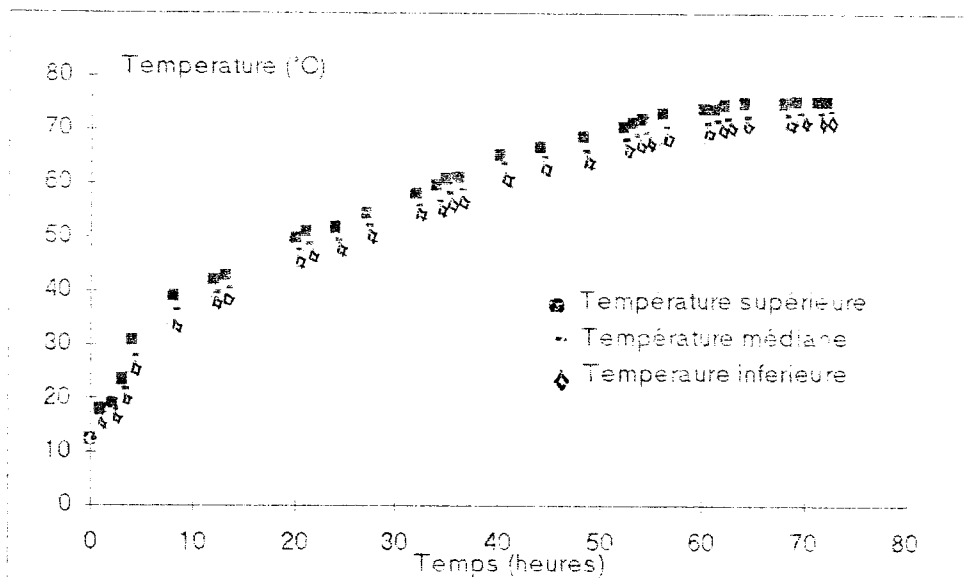


Figure 19: Courbes des températures internes

Essai N°7

Conditions opératoires:

Température de séchage	$T = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temps de séchage	$t = 72 \text{ heures}$
Débit d'air entrée	$Q_e = 30 \text{ m}^3/\text{h}$
Débit d'air recyclé	$Q_{rec.} = 300 \text{ m}^3/\text{h}$

Les valeurs du taux de séchage des six (6) échantillons et les courbes des températures internes sont donnés respectivement dans le tableau 10 et la figure 20.

Tableau 10 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	47	41	50	38	40	40
Humidité finale (%)	7	8	11	11	13	16
Taux de séchage (%)	84	81	78	74	66	65

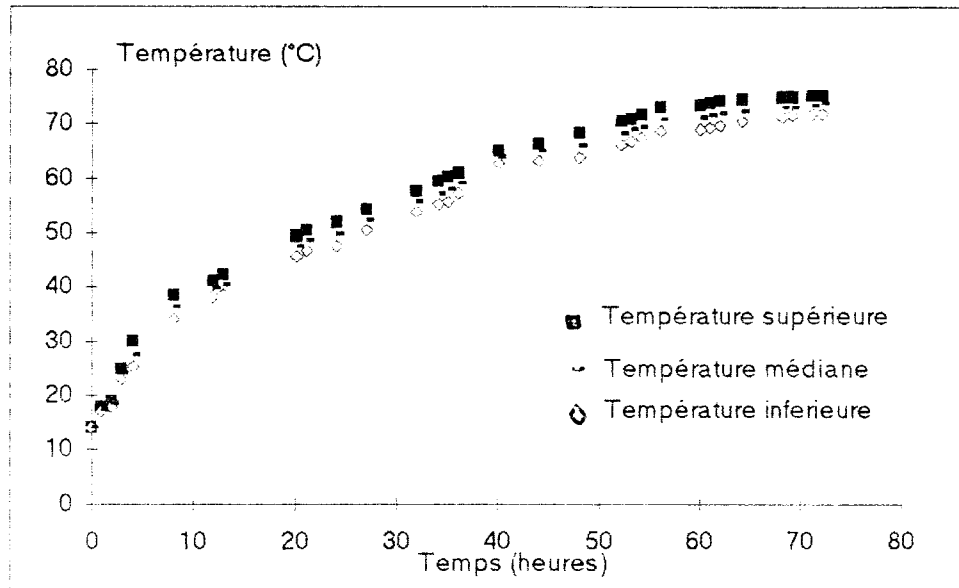


Figure 20 : Courbes des températures intérieures

De même que pour l'essai 7, les résultats recherchés ne sont pas encore satisfaisants d'où l'intérêt de poursuivre l'expérimentation en augmentant les débits d'air recyclé.

Essai N°8

Conditions opératoires:

Température de séchage	$T = 75 \text{ } ^\circ\text{C}$
Temps de séchage	$t = 72 \text{ heures}$
Débit d'air entrée	$Q_e = 30 \text{ m}^3 / \text{h}$
Débit d'air recyclé	$Q_{rec.} = 350 \text{ m}^3 / \text{h}$

Tableau 11 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	47	39	52	58	40	44
Humidité finale (%)	8	7	11	14	12	14
Taux de séchage (%)	83	83	81	78	73	72

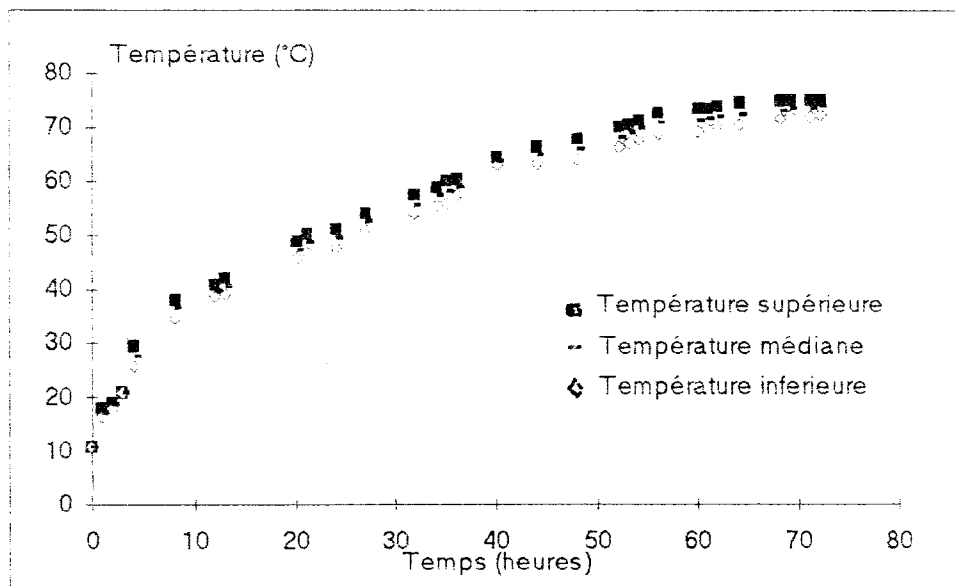


Figure 21 : Courbes des températures intérieures

Essai N°9

Conditions opératoires:

Température de séchage $T = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Temps de séchage $t = 72 \text{ heures}$ Débit d'air entrée $Q_e = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ Débit d'air recyclé $Q_{rec.} = 375 \text{ m}^3/\text{h}$

Le séchoir a tendance de plus en plus à s'homogénéiser, mais les résultats ne sont pas encore satisfaisants comme le montrent les tableaux 11 (essai N°8) et 12 des taux de séchage et les figures 20 (essai N°8) et 21 des courbes de températures internes.

Tableau 12 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	40	46	53	48	30	50
Humidité finale (%)	7	8	10	9	8	14
Taux de séchage (%)	83	83	81	78	73	72

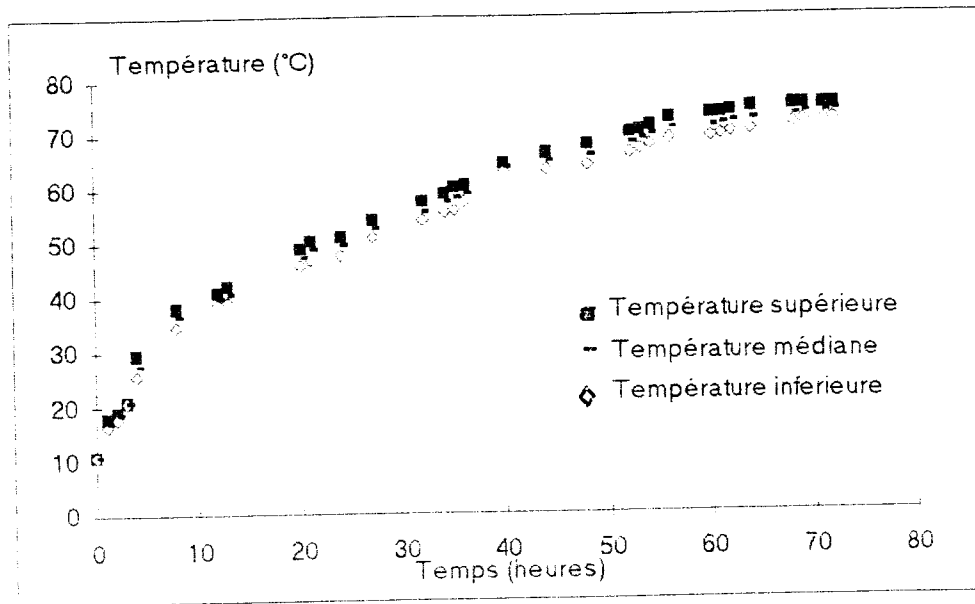


Figure 22 : Courbes des températures intérieures

Une amélioration est encore constatée du point de vue températures intérieures et taux de séchage, augmentons le débit de recyclage maximal, soit $400 \text{ m}^3/\text{h}$.

Essai N°10

Pour atteindre une homogénéité, nous augmentons le débit d'air recyclé en le ramenant à sa valeur maximale de $400 \text{ m}^3/\text{h}$.

Conditions opératoires:

Température de séchage $T = 75 \text{ }^\circ\text{C}$

Temps de séchage $t = 72 \text{ heures}$

Débit d'air entrée $Q_e = 30 \text{ m}^3/\text{h}$

Débit d'air recyclé $Q_{\text{rec.}} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$

Tableau 13 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	40	53	50	38	56	47
Humidité finale (%)	7	9	9	8	14	12
Taux de séchage (%)	83	83	82	79	76	75

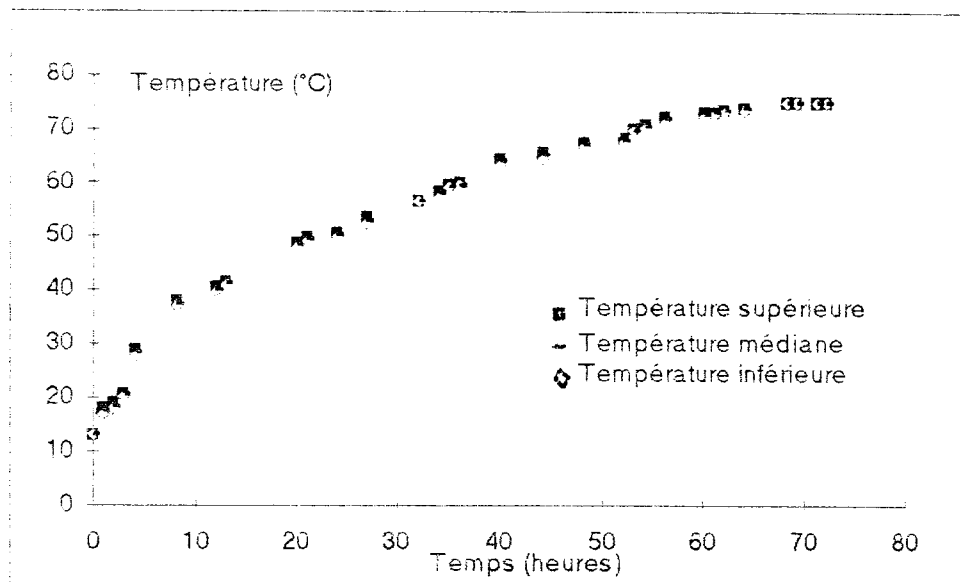


Figure 23 : Courbes des températures intérieures

Dans cet essai où le débit d'air maximal de recyclage, qui est de très loin supérieur au débit d'air primaire, nous donne une homogénéité de séchage, comme le confirment le tableau 13 du taux de séchage et la figure 23 des courbes des températures donnés respectivement ci-dessus.

Pour illustrer l'homogénéité de température et l'analyse de l'ensemble des essais présentés, nous avons représenté la différence de température intérieure supérieure et inférieure notée dt en fonction du débit d'air recyclé. Nous notons une décroissance de la différence de température (figure 24) qui tend à s'annuler quand le débit de recyclage est maximal, soit $400 \text{ m}^3 / \text{h}$.

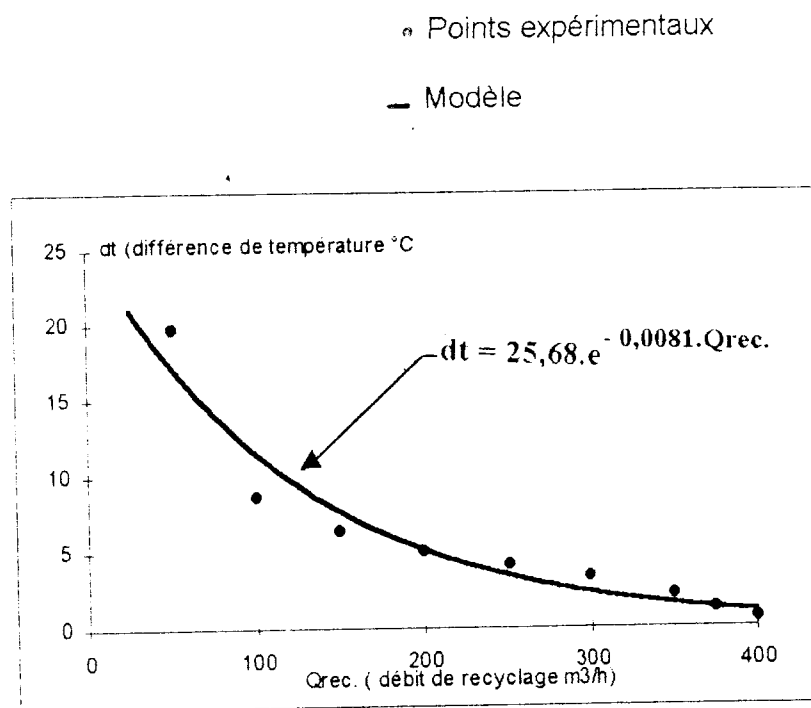


Figure 24 : homogénéité de séchage en fonction du débit de recyclage

De la même manière et concernant le taux de séchage où nous avons représenté le coefficient de variation en fonction du débit de recyclage, nous remarquons une décroissance du coefficient de variation mettant en évidence le facteur homogénéité de séchage du point de vue taux de séchage (figure 25).

u - vitesse moyenne (m s^{-1})

D_h - diamètre hydraulique (m)

ν - viscosité cinématique ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

R est donc un nombre sans dimension. Il caractérise l'écoulement. L'expérience [11,12] montre qu'on admet toutefois si :

$R < 2000$ on est donc en régime laminaire c'est à dire dans une conduite la vitesse du fluide ne dépasse pas une vitesse critique. Dans ce régime ce fluide s'écoule par lames, et que les extrémités des vecteurs vitesses dans une même section en différents points forment exactement une parabole.

$R > 2000$, le régime est permanent. Dans ce dernier la vitesse dépasse le vitesse critique, des tourbillons et des remous apparaissent. Le vecteur vitesse varie constamment en grandeur et en direction sans régularité et souvent très rapidement.

Déterminons pour chaque essai effectué dans quel régime nous travaillons.

Pour ce faire, le diamètre hydraulique D_h est égal à 0,434 m et la viscosité cinématique ν est égale $1,77 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ et enfin le débit total entrant dans la zone de mélange est égal à la somme du débit d'air primaire et du débit d'air recyclé. Le nombre de Reynolds pour chaque essai effectué est porté sur le tableau 14.

Tableau 14 : Nombre de Reynolds

N° essai	1 et 2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nb Reynolds	3576	5811	8046	10281	12517	14572	16987	18104	19222

Pour tous les essais effectués, le nombre de Reynolds est supérieur à 2000, donc quelque soit le débit de recyclage choisi nous travaillons dans les mêmes conditions d'écoulement à savoir que le régime est toujours turbulent plus le débit de recyclage, c'est à dire le nombre de Reynolds R est grand plus l'homogénéité est meilleure, ce qui confirme bien les résultats obtenus.

II . 2 Etude du chêne

Nous avons adopté la même disposition et les mêmes échantillons, que dans le cas du sapin (figure 14). Le temps moyen de séchage est déterminé de la même façon que précédemment, donc nous avons :

$$a_1=0,8 \quad a_3=0,48 \quad a_4=0,8 \quad a_5=1,1$$

L'humidité moyenne initiale de la pile de bois $X_i = 55 \%$

L'humidité moyenne finale de la pile de bois $X_f = 10 \%$

$$s_k = 0,8 \times a_2 \times 0,48 \times 0,8 \times 1,1$$

La valeur de a_2 est donnée par le tableau 15.

Tableau 15 : Détermination du temps de séchage

Humidité (%)	a_2	s_k	t_k
55 à 41	2.0	0.67	$t_1 = 15/0.57$
40 à 31	1.7	0.57	$t_2 = 10/0.57$
30 à 21	1.1	0.37	$t_3 = 10/0.37$
20 à 15	0.9	0.30	$t_4 = 6/0.30$
15 à 10	0.6	0.20	$t_5 = 8/0.20$

$$t_{\text{total}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = 111.8 \text{ heures}$$

Le calcul théorique du temps donnant la valeur de 111,8 heures, nous prenons donc une durée moyenne de séchage égal à 120 heures. Pour l'ensemble des 10 essais effectués, la température de consigne a été fixée à 60 °C, valeur prise arbitraire en fonction des tables de séchage existantes [3]. Les débits d'air primaire et recyclé ont été choisis aux valeurs optimales obtenues dans le cas du sapin.

Les conditions opératoires choisies sont les suivantes :

Température de séchage $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temps de séchage : $t = 120\text{ heures}$

Débit d'air entrée $Q_e = 30\text{ m}^3 / \text{h}$

Débit d'air recyclé $Q_{rec} = 400\text{ m}^3 / \text{h}$

Comme les 10 cycles de séchage ayant été effectués dans les mêmes conditions opératoires, l'analyse portera sur l'essai N°1 et les résultats des autres essais effectués seront portés en annexe 3. Le taux de séchage et les courbes de températures internes de l'essai N°1 seront donnés respectivement sur le tableau 16 et la figure 26.

Tableau 16 : Taux de séchage

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	49	54	52	42	37	50
Humidité finale (%)	9	10	10	9	8	12
Taux de séchage (%)	82	82	81	79	78	76

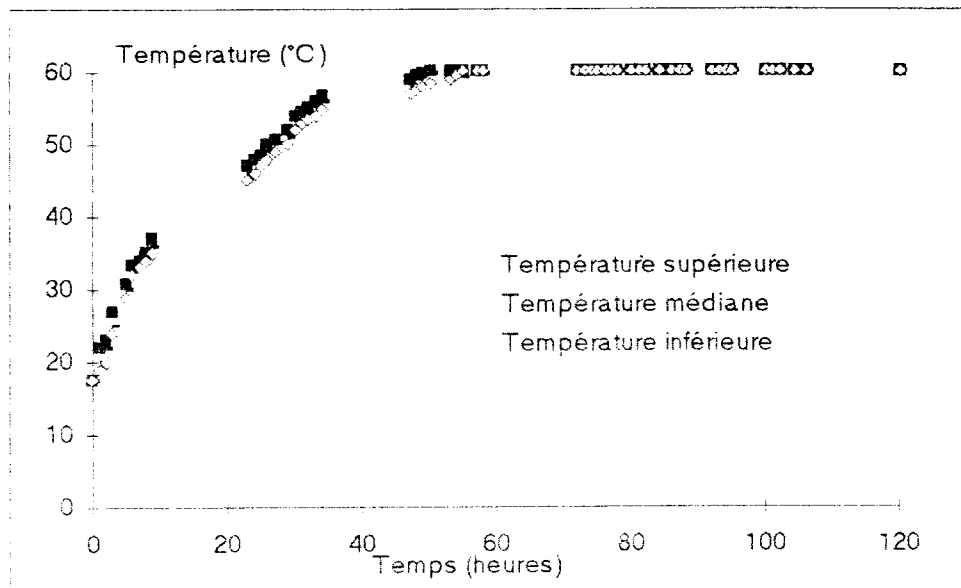


Figure 26 : Courbes des températures intérieures.

Pour les 10 essais effectués avec les mêmes conditions opératoires citées précédemment, nous observons encore un taux de séchage régulier. De plus les différences de température (supérieure, médiane et inférieure) entre les niveaux dans tous les cas sont inférieures à 2°C.

III- CONCLUSION

Pour un débit de recyclage égal à 400 m³/h, nous avons bien atteint une homogénéité de séchage, les températures à différents niveaux (inférieur, médian et supérieur) à l'intérieur de la pile de bois sont homogènes. Pour tester le comportement de ce séchoir prototype aux différents cycles de séchage, nous avons placé des échantillons représentatifs de la paroi à l'intérieur de la pile de bois et nous avons étudié la tenue de ce séchoir à travers divers paramètres, qui fera l'objet du quatrième chapitre.

QUATRIEME

CHAPITRE

QUATRIEME CHAPITRE

ETUDE DE LA TENUE DU SECHOIR PROTOTYPE

Ce chapitre a un objectif purement technologique dans la mesure où il s'agissait de vérifier si le séchoir conçu évolue bien au cours des cycles de séchage successifs effectués sur des essences différentes.

I- COMPORTEMENT DES PAROIS DU SECHOIR AUX DIFFERENTS CYCLES DE SECHAGE

Pour tester la tenue du séchoir aux cycles de séchage, 2 échantillons représentatifs de la paroi sont placés dans la pile de bois (figure 14). Le petit élément de dimensions 0,20 x 0,20 x 0,015 m, noté comme par exemple pour le sapin noté PPS1 (Petit élément Paroi Sapin N°1) sera changé à chaque cycle séchage. Le grand élément, de dimensions environ 0,30 x 0,30 x 0,15 m noté par exemple pour le sapin GPS1 (Grand élément Paroi Sapin N°1) sera maintenu à l'intérieur de la pile de bois pendant les dix cycles de séchage de cette essence. Il y a lieu de prendre en considération le positionnement de ces éléments dans la pile de bois.

Face A - face orientée vers le haut

Face B - face orientée vers le bas

Face C - chant situé à droite de l'opérateur

Face D - chant opposé à la face C

Face E - chant en face de l'opérateur

Face F - chant opposé à la face E

I- 1 Variations dimensionnelles

En début de séchage nous prenons les mesures initiales, à savoir la longueur initiale L_i (mm), la largeur initiale l_i (mm) et enfin l'épaisseur initiale (mm) e_i , qui est la moyenne des épaisseurs mesurées aux différents points 1, 2, 3, 4.

En fin de cycle de séchage nous refaisons les mêmes mesures L_f , l_f , e_f . Les mesures de la longueur, la largeur et l'épaisseur seront faites avec une colonne de mesure digitale au 1/100 de mm près.

L'évaluation de ces grandeurs sera une des méthodes caractérisant la déformation des échantillons du point de vue variations dimensionnelles.

I- 2 Essai d'adhérence

Une autre méthode de caractérisation sera constitué par l'essai d'adhérence du revêtement- bois selon la norme NF T30. 038 " Essai de quadrillage " [13]. Avec un outil tranchant on effectue un quadrillage de cents carreaux de 2 x 2 mm de côté. Un scotch répondant à des spécifications précises est collé sur ce quadrillage puis arraché brusquement. On note le nombre de carreaux arrachés.

I- 3 Essai de vieillissement accéléré

I- 3.1 Dispositif expérimental " Climatron "

Pour tester encore plus sévèrement le comportement des parois du séchoir, trois

grands éléments représentatifs de la paroi sont soumis à un vieillissement accéléré.

Le "climatron" est un appareil permettant des essais de vieillissement. Il combine les actions de la température et de l'humidité (figure 27).

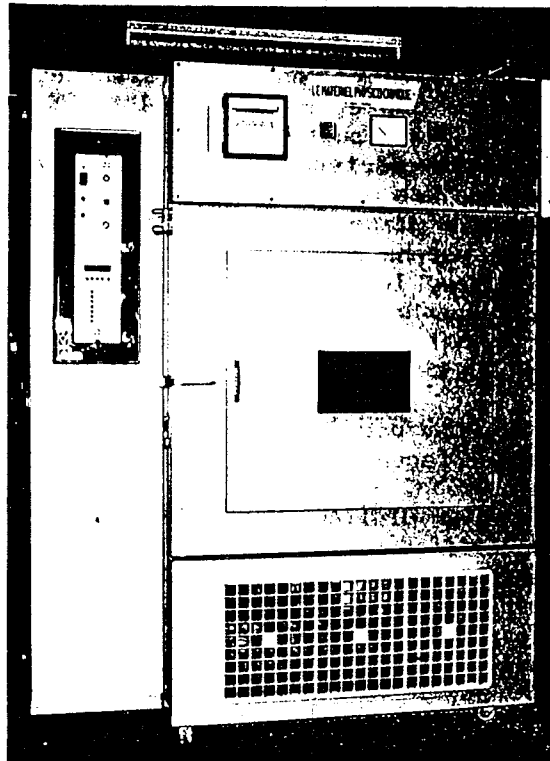


Figure 27 : Climatron

Cet appareil est monté dans une armoire en forte tôle d'acier électrozinguée soudée électriquement et protégé par une couche d'impression avant l'application de 2 couches de peinture laquée. La base de l'appareil reçoit les groupes frigorifiques et les organes annexes. Des panneaux amovibles permettent un accès facile à tout l'appareillage pour la maintenance et le dépannage.

La chambre isotherme proprement dite est en acier inoxydable. L'isolation thermique de forte épaisseur, en mousse polyuréthane coulée in-situ, assure à la chambre ses qualités de très faibles déperditions et de très bonne stabilité de température jusqu'à 150 °C.

L'homogénéité correcte de l'air et le bon échange de température dans l'enceinte sont assurés par un ventilateur centrifuge entraîné, à vitesse constante, par un moteur électrique de puissance appropriée. Celui-ci aspire l'air à la partie supérieure de la chambre pour le répartir à la base de celle-ci après l'avoir fait passer sur l'échangeur de froid et de chaleur. La vitesse moyenne de l'air est de l'ordre de 2 m/s.

Une porte transparente s'ouvre vers l'avant et dégage complètement le volume utile. La partie supérieure de l'appareil abrite les organes de contrôle et de régulation qui sont d'une accessibilité parfaite.

Le chauffage est assuré par des résistances électriques blindées en acier inoxydable ayant une durée de vie illimitée.

Le refroidissement se fait par groupe frigorifique superpuissant permettant

l'élargissement jusqu'à - 30 °C de la gamme de température pour réaliser des cycles climatiques plus représentatifs des conditions réelles d'essais.

Un régulateur programmeur MPC permet les marche-arrêt différé et la programmation de cycles climatiques. En "marche simple", il suffit d'appuyer sur le bouton " marche simple " et d'afficher la température et l'humidité de consigne désirée.

En marche "programmée" il suffit d'appuyer sur la touche " marche programmée ".

L'enceinte exécutera le programme en cours. Les températures et les humidités de consigne et de contrôle ainsi que la durée et le numéro de segment sont affichés alternativement. Pour travailler en marche " programmée ", il faut d'abord introduire le programme qui correspond au cycle d'essai, ceci est particulièrement simple sur chaque appui sur la touche " programmation " pose en clair une question à laquelle il faut répondre:

- température du point
- humidité du point
- nombre de boucles
- nombre de segments

I- 3.2 Mode opératoire

L'essai est effectué selon la norme française NF T30 . 049 "Essai de vieillissement accéléré" [14], Les échantillons sont placés dans le climatron. Le cycle choisi est composé de 4 ambiances hygroscopiques résumées sur la figure 28 à savoir :

- une ambiance à 20 °C avec une humidité supérieure à 90 % pendant 30 mn
- une ambiance sèche et froide à - 20 °C pendant 60 mn
- une ambiance humide et chaude à 95 % et 55 °C pendant 30 mn
- une ambiance sèche et chaude à 20 % et 60 °C pendant 80 mn.

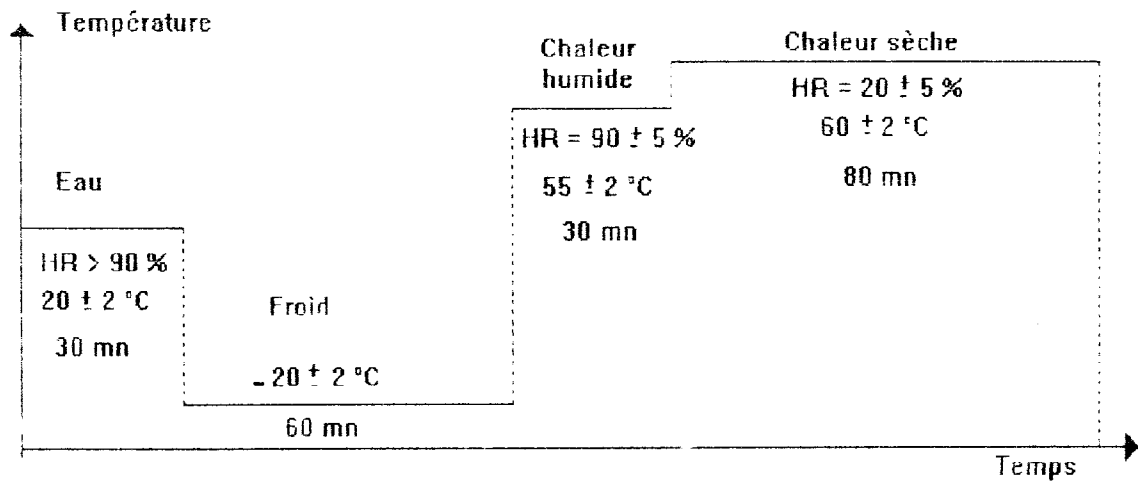


Figure 28 : Ambiances pour cycles de vieillissement accéléré

Nous affichons en premier lieu la température et l'état hygrométrique de la première ambiance, ainsi que le temps nécessaire, et nous procédons de la même façon pour la deuxième ambiance jusqu'à la dernière ambiance et enfin nous indiquons le nombre de boucle soit 21 boucles.

I- .4 Aspect visuel

Une autre méthode de caractérisation sera purement visuel. On notera les points suivants :

- dégradation du revêtement
- fentes légères ou superficielles
- ramollissement
- discoloration.

Toutes ces observations citées ci-dessus seront notées sur les parois elles mêmes du séchoir prototype, sur les petits et grands éléments représentatifs de la paroi placés à l'intérieur du séchoir et dans le "climatron".

II- RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

Les essais de comportement ont porté sur les mêmes essences. à savoir le sapin et le chêne. L'essai de vieillissement accéléré a été effectué sur trois échantillons représentatifs de la paroi du séchoir de dimensions 0,30x0,30x0,15 m dont les ambiances ont été données sur la figure 28.

Nous rapportons ci-après les résultats obtenus sur ces deux espèces.

II- 1 Cas du sapin

Nous n'avons observé aucune variation sur les mesures dimensionnelles faites sur les 2 grands échantillons représentatifs de la paroi du séchoir placées à l'intérieur de la

pile, pour les 10 essais effectués lors de l'obtention de l'homogénéité de séchage, ainsi que les dix autres essais effectués avec les conditions opératoires finales (débit d'air primaire de 30 m³ / h et un débit de recyclage de 400 m³ / h). Il en est de même pour les petits échantillons représentatifs de la paroi. En effet nous n'avons noté aucune variation dimensionnelle. Les résultats obtenus sont portés sur les tableaux 17, 18 et 19.

Tableau 17 : Variations dimensionnelles (dL, dl, de) des petits échantillons représentatifs de la paroi pour les 10 cycles obtenus lors des essais d'homogénéité.

N° d'échant	Longueur (mm)		dL	Largeur (mm)		dl	Epaisseur (mm)		de
	initiale	finale		initiale	finale		initiale	finale	
1	202,71	202,71	0,00	201,82	201,83	0,01	15,53	15,53	0,01
2	202,74	202,75	0,01	202,10	202,11	0,01	14,98	14,98	0,01
3	202,64	202,65	0,01	201,75	201,75	0,00	14,87	14,87	0,01
4	202,65	202,65	0,00	201,74	201,74	0,00	15,35	15,35	0,01
5	202,18	202,19	0,01	201,75	201,76	0,01	14,87	14,88	0,01
6	202,47	202,47	0,00	201,93	201,93	0,00	14,75	14,75	0,01
7	202,48	202,48	0,00	201,76	201,77	0,01	14,98	14,98	0,01
8	202,10	202,10	0,00	201,85	201,85	0,00	15,11	15,11	0,01
9	202,60	202,61	0,01	201,36	202,36	0,00	14,93	14,94	0,01
10	202,68	202,67	0,01	201,53	202,54	0,01	14,87	14,88	0,01

Tableau 18 : Variations dimensionnelles (dL, dl, de) des 2 grands échantillons
représentatifs de la paroi.

N° d'échant.	Longueur (mm)		dL	Largeur (mm)		dl	Epaisseur (mm)		de
	initiale	finale		initiale	finale		initiale	finale	
1	300,00	300,00	0,00	300,00	300,01	0,01	150,00	150,00	0,00
2	300,07	300,06	0,01	300,00	300,00	0,00	150,06	150,07	0,01

Tableau 19 : Variations dimensionnelles (dL, dl, de) des petits échantillons représentatifs
de la paroi.

N° d'échant.	Longueur (mm)		dL	Largeur (mm)		dl	Epaisseur (mm)		de
	initiale	finale		initiale	finale		initiale	finale	
1	202,00	202,00	0,00	201,98	201,99	0,01	15,00	15,01	0,01
2	202,01	202,00	0,01	202,10	202,09	0,01	14,85	14,84	0,01
3	202,60	202,60	0,00	201,70	201,71	0,01	14,80	14,81	0,01
4	202,50	202,51	0,01	201,42	201,41	0,01	15,05	15,05	0,00
5	202,10	202,10	0,00	201,70	201,71	0,01	14,80	14,81	0,01
6	202,42	202,41	0,01	201,99	201,99	0,00	15,00	15,00	0,00
7	202,00	202,00	0,00	201,00	201,00	0,00	14,80	14,81	0,01
8	202,04	202,05	0,01	201,50	201,50	0,00	15,07	15,06	0,01
9	202,60	202,59	0,01	201,22	202,21	0,01	14,98	14,99	0,01
10	202,70	202,71	0,01	201,30	202,31	0,01	14,95	14,96	0,01

Il est en de même pour les grands échantillons représentatifs de la paroi placés à l'intérieur du climatron (tableau 20).

Tableau 20 : Variations dimensionnelles (dL, dl, de) des grands échantillons représentatifs placés dans le climatron.

N° d'échant.	Longueur (mm)		dL	Largeur (mm)		dl	Epaisseur (mm)		de
	initiale	finale		initiale	finale		initiale	finale	
1	300,00	300,00	0,00	300,05	300,06	0,01	150,00	150,01	0,01
2	300,12	300,13	0,01	300,00	300,00	0,00	150,08	150,09	0,01
3	300,00	300,01	0,01	300,00	300,01	0,01	150,08	150,09	0,01

L'essai d'adhérence a été effectué sur tous les échantillons GPS1 et PPS1, ..., PPS10 des essais effectués lors de l'obtention de l'homogénéité de séchage et des 10 essais effectués avec les conditions opératoires finales obtenus citées ci-dessus; ainsi que les échantillons ayant subi des cycles de vieillissement accéléré selon les prescriptions de la norme française NFT30 .038 " Essai de quadrillage ", nous avons constaté aucun arrachement de petits carreaux.

L'aspect général des parois du séchoir est correct, le revêtement est intact, nous n'avons noté aucune fente légère ou superficielle, ni écaillage, craquelage, cloquage.

Sur les éléments représentatifs des parois petits et grands éléments placés à l'intérieur de la pile de bois pour tous les essais cités, ainsi que les échantillons ayant subi des essais de vieillissement accéléré, on n'a pas observé de dégradation, nous avons noté aucune fente légère ou superficielle, ni écaillage, craquelage, cloquage.

I- 2 Cas du chêne

Nous avons adopté la même disposition et les mêmes échantillons , que dans le cas du sapin (figure 14) Les conditions opératoires retenues pour l'ensemble des 10 essais effectués sont les suivantes :

la température de consigne a été fixée à 60 °C, les débits d'air primaire et recyclé ont été choisis aux valeurs optimales obtenues dans le cas du sapin , à savoir :

Débit d'air entree $Q_e = 30 \text{ m}^3/\text{h}$

Débit d'air recyclé $Q_{rec} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$

Pour le comportement des éléments de paroi aux différents cycles de séchage la procédure est identique à celle utilisée dans le sapin. Les échantillons représentatifs de la paroi n'ayant pas subi de séchage artificiel, et différents de ceux utilisés pour le sapin sont placés à l'intérieur de la pile. L'échantillon GPCh (Grand élément de la Paroi cycle Chêne) de dimensions 0,30 x 0,30 x 0,15 m subit les dix cycles de séchage.

Sur le grand échantillon GPCh et sur les échantillons PPOh1, ... PPOh10 (Petit élément de la Paroi cycle Chêne), nous n'avons pas observé de variations dimensionnelles (tableaux 21 et 22),

Tableau 21 : Variations dimensionnelles (dl, dl, de) du grand échantillon représentatif de la paroi

N° d'échant	Longueur (mm)		dl	Largeur (mm)		dl	Epaisseur (mm)		de
	initiale	finale		initiale	finale		initiale	finale	
1	300,10	300,11	0,00	300,00	300,00	0,00	150,00	150,00	0,00

Tableau 22 : Variations dimensionnelles (dL, dl, de) des petits échantillons représentatifs de la paroi.

N d'échant.	Longueur (mm)		ldL	Largeur (mm)		ldl	Epaisseur (mm)		lde
	initiale	finale		initiale	finale		initiale	finale	
1	202,78	202,78	0,00	201,80	201,80	0,00	15,52	15,53	0,01
2	202,10	202,10	0,00	202,10	202,11	0,01	14,96	14,95	0,01
3	202,60	202,61	0,01	201,33	201,36	0,00	14,80	14,80	0,00
4	202,27	202,28	0,01	201,42	201,43	0,01	15,30	15,31	0,00
5	202,10	202,10	0,00	201,75	201,76	0,01	14,80	14,80	0,00
6	202,47	202,48	0,01	201,21	201,21	0,00	14,72	14,73	0,01
7	202,41	202,40	0,01	201,45	201,45	0,00	14,92	14,92	0,00
8	202,10	202,10	0,00	201,85	201,95	0,00	15,12	15,12	0,00
9	202,25	202,25	0,00	201,41	202,42	0,01	14,90	14,90	0,00
10	202,63	202,67	0,01	201,40	202,40	0,00	14,87	14,88	0,01

Sur ces échantillons représentatifs de la paroi nous avons procédé au test d'adhérence. Aucun carreau n'a été arraché.

Quant à l'aspect visuel, les parois du séchoir sont intacts. l'aspect général est correct. Nous n'avons pas noté de fente légère ou superficielle, de craquelage, de cloquage, de discoloration et de ramollissement.

Il en est de même pour les échantillons représentatifs de la paroi nous n'avons pas observé de dégradation. Le revêtement est intact. Nous n'avons pas noté de fente légère ou superficielle, de craquelage, de cloquage, de discoloration et de ramollissement.

III- CONCLUSION

Sur la base des essais de séchage effectués, des observations faites sur les parois du séchoir et les échantillons de cette dernière placés à l'intérieur de la pile de bois et dans le climatron pour essai de vieillissement accéléré, et des tests effectués sur ces derniers, nous pouvons affirmer que nous avons une bonne tenue du séchoir prototype constitué de panneaux composites à base de bois.

CINQUIÈME

CHAPITRE

CINQUIEME CHAPITRE

REPRESENTATION MATHEMATIQUE DES CINETIQUES DE SECHAGE

I- ETUDES THEORIQUES SUR LE SECHAGE

De nombreuses études ont été consacrées au séchage convectif qu'il soit effectué à basse température (inférieure à 80 °C) ou à haute température (supérieure à 120 °C).

Toutefois, la plupart de ces études portent sur le transfert des molécules d'eau au sein du matériau et sur la détermination des caractéristiques physico-mécaniques de transport de matière et d'énergie sous forme liquide (ou adsorbée). Ces analyses portent surtout sur des échantillons de bois (de quelques centimètres à quelques mètres), et à notre connaissance les études de modélisation d'un séchoir dans son ensemble sont peu nombreuses [2, 3, 5, 7].

En effet comme pour tous processus physiques, la modélisation se présente suivant deux approches :

- La première consiste en une étude fine des mécanismes constitutifs. Leur mise en équation se fait à partir des lois physiques dites fondamentales et d'hypothèses, déduites d'observations à des échelles inférieures à celles de l'utilisation du modèle. Cette démarche entreprise en général par des spécialistes des phénomènes étudiés conduit à une étude fondamentale de type "boîte transparente" ou microscopique.

- La deuxième découle d'observations des phénomènes dans leur globalité face à une sollicitation adaptée. Le choix de cette sollicitation, des paramètres mesurés et des

hypothèses simplificatrices dépend alors étroitement de l'application envisagée. Cette démarche utilise des théories dans l'automatisme et conduit à une étude de type de "boite noire" ou macroscopique.

Cependant, la frontière entre ces approches est souvent mal définie. En effet, quelle que soit la loi utilisée, sa structure est en général tirée d'expérimentations. La notion d'échelle microscopique ou macroscopique n'est pas forcément objective. **JOHNSON** [15] distingue plusieurs niveaux pour l'étude des mouvements de l'eau dans le bois. Ces différentes échelles sont : la molécule, la chaîne cellulosique, la fibre, l'unité de bois caractéristique, l'échantillon, la planche et enfin la pile et le séchoir.

Parmi la première approche on distingue :

Transfert par capillarité

Avant d'aborder la modélisation proprement dite, une modélisation géométrique du matériau bois a été présentée par **ASWORTH** [16] qui identifie les différents types de pores d'un pin *Radiata* (cavités, ponctuations, ...). Il détermine une cellule géométrique de base pour cette essence et adopte un modèle équivalent de capillaire parallèle constituées de cellules interconnectées.

COMSTOCK [17] propose un modèle inspiré de l'observation : chaque trachéide est une cellule quadrangulaire parfaite à terminaisons biseautées. Toutes ces ponctuations sont concentrées sur ces fuseaux et réparties de manière homogène. A partir du modèle de **COMSTOCK**, **SPOLEK** et **PLUMB** [18] proposent une expression de la pression capillaire. En effet le liquide se déplace dans cette structure sous l'action d'un potentiel de succion résultant de la différence de pression entre l'eau et l'air de chaque ménisque.

Diffusion de liquide et de vapeur

Le transfert est représenté par la loi de **FICK** où le coefficient de diffusion est difficile à estimer puisqu'il dépend de nombreux paramètres (température, teneur en eau du bois,

direction des de la diffusion par rapport aux fibres ...). Mais il est souvent pris comme une fonction de la température en utilisant une équation d'**ARRHENIUS** [19, 20].

En général, l'utilisation de cette théorie suppose des conditions isothermes, ce qui simplifie le développement analytique de l'équation de **FICK** [21]. Elle suppose également une teneur en eau inférieure au point de saturation des fibres, au delà duquel le coefficient de diffusion tend vers l'infini. Même avec ces hypothèses, plusieurs problèmes restent posés, ne serait-ce que le sens de circulation du flux par rapport aux fibres. Il faut également différencier les diffusions à travers les parois cellulaires et dans les vides cellulaires, **ALEON** [22]. Le problème de la déformation de la matrice cellulosique au cours du séchage devrait également pris en compte par ce type d'approche **HART** [23].

On voit donc que la diffusivité utilisée fait généralement intervenir plusieurs phénomènes qu'il est expérimentalement difficile de dissocier (on parle parfois de diffusivité effective). **BRAMHALL** [24].

Combinaisons de plusieurs phénomènes

Des théories plus complexes prennent en compte plusieurs mécanismes de transfert de masse. Par exemple **KRISHER** [25] étendus par **BERGEI** et **PEI** [26], prend en compte les transferts sous forme de vapeur et par capillarité. Dans le cas du bois on retrouve ces hypothèses chez **BRAMHALL** [27].

LUIKOV [28], en partant de la Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles a développé une théorie de séchage des corps poreux où l'interaction entre les transferts de masse et de chaleur conduit à utiliser de nombreux coefficients tels que la diffusion de vapeur, la conductibilité... , qui sont souvent délicats à déterminer expérimentalement c'est pour cela qu'on fait appel à des hypothèses simplificatrices (coefficients constants ou parfois nuls).

La théorie de **WHITAKER** [29] repose sur les équations de conservation de masse chaleur et quantité de mouvement. Le système est écrit ponctuellement pour chaque phase (i), puis moyenné sur un volume centré sur le point considéré.

Dans cette approche il n'est pas toujours possible de faire coïncider avec la réalité un modèle ne prenant compte qu'un type de transfert. Par contre si l'on considère plusieurs mécanismes, cela suppose la connaissance de nombreux paramètres qui sont difficiles à déterminer expérimentalement. De plus, la résolution des systèmes d'équations au dérivées partielles n'est pas toujours simple.

Quant à la deuxième approche, qui consiste à déterminer des équations empiriques faites à partir d'expériences de laboratoire sur des échantillons de produit de petites dimensions.

Nous distinguons plusieurs méthodes, parmi lesquelles nous citerons :

Courbe caractéristique de séchage.

Cette méthode consiste à rassembler l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur un produit et pour divers conditions, sur une seule courbe de base dite " Courbe Caractéristique de Séchage " (C.C.S). Ce regroupement se fait par transformation des ordonnées et des abscisses. Initialement proposé par **VAN MEEL** en 1957 [30], cette été depuis reprise de nombreuses fois avec succès pour certains produits (cube de plâtre mais) et ce n'est qu'en 1992 dans les travaux de recherche de **MOSER** [31] que cette méthode a trouvé son application pour des échantillons de bois de faibles dimensions.

BEARD [32] part de la mesure des températures en surface et à l'intérieur de l'échantillon de bois, en supposant que la teneur en eau en un point du matériau est une fonction linéaire de la température de ce point.

Pour le calcul des profils, ils supposent un front de vaporisation à partir duquel la teneur en eau est constante .

VICK part [33] du concept de la résistance de séchage (RS). Il obtient ainsi une droite pour chaque condition de séchage où le terme moteur est donc ici le pouvoir évaporatoire de l'air séchant

$$RS = x^{k'} (l, t - m)$$

où : x - humidité du bois

k', l, m - constantes

t - température du bois

D'autres auteurs [34] en partant de l'équation générale de la vitesse de séchage, ont considéré que les variables telles que la température, la teneur en eau la vitesse de l'air sont considérées comme des fonctions continues dans l'espace et le temps.

DANZE et **BOUGNET** cités par **VILLIERE** [4] sont allés plus dans leur travaux sur des planches de peuplier ont trouvé une autre forme de la vitesse de séchage et ont introduit le terme moteur $(x_s - x_{sq})$ qui par la suite **TUTTLE** [4] donna la durée de séchage. Villière montra que la vitesse d'évaporation en fin de séchage est une fonction linéaire de $(x_s - x_{sq})$. Une telle relation permet d'annuler le flux massique lorsque le bois est l'équilibre avec son environnement (terme moteur nul).

$$\frac{dx}{dt} = f(T_s, t_s, H, v, x, x_{sq}, x_e)(x - x_{sq})$$

x - humidité du bois

t - temps de séchage

T_s - température de l'air

t_s - température du bois

v - vitesse de l'air

x_{eq} - humidité d'équilibre du bois

x_0 - humidité initiale

KOLLMAN cité aussi par **VILLIERE** [4] a montré l'influence primordiale de la température du gaz sur celle du produit et sur la cinétique de séchage. Plus la température de l'air est élevée, plus la température du bois l'est et plus les cinétiques de séchages sont rapides.

II - ETUDE DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

Pour représenter les variations de la masse de la pile de bois, plusieurs cycles de séchage de chêne ont été effectués dans les conditions opératoires finales sont les suivantes :

Température de séchage :	60 °C
Temps de séchage :	120 heures
Débit d'air frais :	30 m ³ /h
Débit d'air recyclé :	400 m ³ /h

Nous avons obtenus les résultats suivants qui sont portés sur la figure 29.

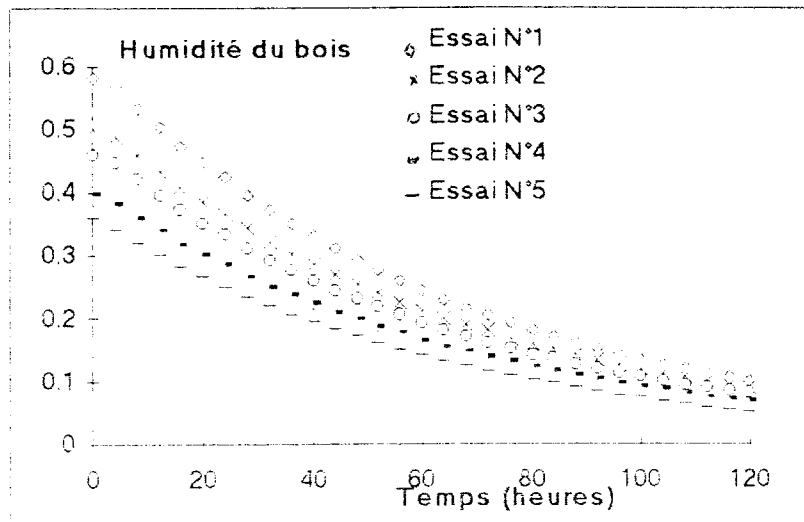


Figure 29. Valeurs expérimentales des 5 cycles de séchage

Comme les humidités initiales sont différentes, l'étude de reproductibilité des résultats a porté sur la détermination de l'humidité réduite du bois, qui est égale à :

$$H_{red} = \frac{H - H_{eq}}{H_i - H_{eq}} \quad (8)$$

où H est l'humidité absolue du bois à un instant donné

H_{eq} est l'humidité d'équilibre du bois

H_i est l'humidité initiale du bois.

En effet, les résultats sont bien reproductibles comme le montre la figure 30.

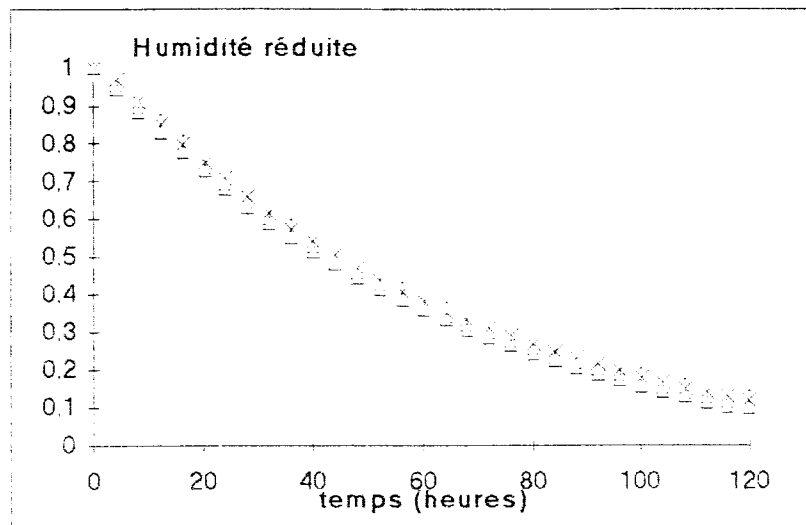


Figure 30: Courbes des humidités réduites

III - REPRESENTATION MATHÉMATIQUE DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

Comme nous l'avons dit, que le séchage consiste à opérer un transfert de masse c'est à dire de l'intérieur vers l'extérieur au moyen d'un transfert d'énergie de l'ambiance vers l'intérieur du bois qui s'effectue par convection.

En considérant qu'à l'instant $t = 0$, les humidités initiales expérimentales et celles calculées par le modèle sont égales. En premier lieu, nous déterminerons à partir des humidités réduites le modèle réduit et de là on passe à l'équation finale recherchée donnée ci-dessous :

$$H = H_{red} \cdot [H_i - H_{eq}] + H_{eq} \quad (9)$$

où : H est l'humidité absolue du bois à un instant donné

H_{eq} est l'humidité d'équilibre du bois ($H_{eq} = 3\%$)

H_i est l'humidité initiale du bois (donnée pour chaque essai).

En utilisant un programme informatique, après avoir introduit les données expérimentales sous forme réduite, nous obtenons l'équation suivante du modèle mathématique pour les cinétiques de séchage sous forme réduite :

$$H_{red} = e^{-0.017 t} \quad (10)$$

t est le temps de séchage

Donc la représentation mathématique de la cinétique de séchage sera la suivante :

$$H = e^{-0.017 t} \cdot [H_i - H_{eq}] + H_{eq} \quad (11)$$

Pour l'essai N°1 où l'humidité initiale est égale à 40 % et l'humidité d'équilibre est égale à 3%, les résultats obtenus sont portés sur la figure 31. En effet nous avons une représentation satisfaisante des valeurs expérimentales.

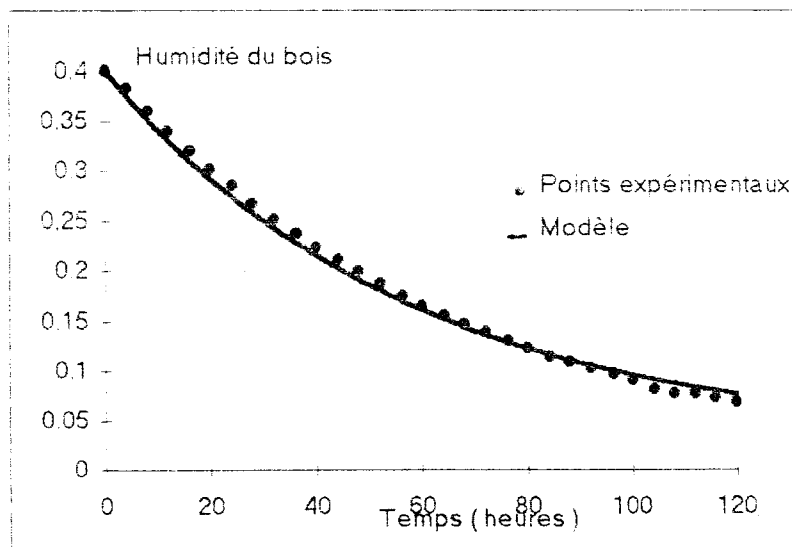


Figure 31 ; Représentation du modèle et des points expérimentaux

La représentation des humidités calculées en fonction des humidités expérimentales nous donne bien une droite (figure 32), ce qui confirme bien que l'équation proposée représente d'une manière satisfaisante les résultats expérimentaux.

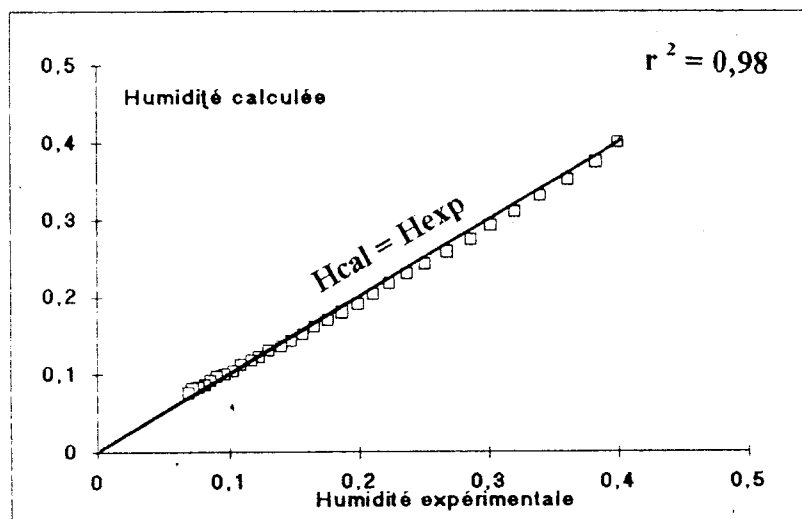


Figure 32 : Représentation des humidités calculées en fonction des humidités expérimentales.

IV- CONCLUSION

Le modèle simple que nous avons obtenu pour le chêne, a donné des résultats satisfaisants à partir duquel l'on pourra prendre en considération d'autres essences feuillues ou résineuses. De même la simulation du cycle de séchage peut faire l'objet d'un axe de recherche où l'on affinera les tables de séchage déterminées d'une manière pratique par les utilisateurs et les constructeurs de séchoirs.

CONCLUSION
&
PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le séchoir prototype composé de panneaux composites à base de bois étudié a donné des résultats très satisfaisants .

Nous avons obtenu des températures de séchage sensiblement les mêmes aux différents niveaux étudiés, confirmant ainsi un séchage homogène. Il serait intéressant à l'avenir de prendre en charge l'aéraulique de l'air dans le séchoir qui ferait l'objet d'axe de recherche industriel. En effet l'intérêt de l'aéraulique au sein du séchoir dans le contexte qualité est intéressante à plus d'un titre puisqu'elle montre le rôle qu'elle joue sur la qualité du bois et qu'une distribution uniforme des vitesses au sein de la pile serait préférable.

Quant au comportement des parois du séchoir aux différents cycles de séchage, nous avons obtenu une bonne tenue de ce séchoir. En effet les parois sont intactes et n'ont subi aucune dégradation. Aux différentes sollicitations d'humidité et de température, nous n'avons relevé aucun changement d'aspect visuel, comme le confirment les résultats obtenus sur les essais concernant les échantillons représentatifs de la paroi placés à l'intérieur de la pile et dans le " climatron" pour essai de vieillissement accéléré.

Les résultats satisfaisants obtenus après une première approche mathématique sur le chêne nous orientent vers une généralisation d'études sur d'autres essences feuillues et résineuses pouvant aboutir à une représentation dynamique du séchage par un modèle simplissime dépendant uniquement de deux coefficients globaux, coefficient de transfert de chaleur et coefficient de transfert de matière.

Enfin il serait plus intéressant de passer à un séchoir industriel du même type, de plus grand volume et permettant de sécher simultanément plusieurs piles de bois. Ce dernier permet d'étudier l'influence de l'aéraulique en présence d'une humidification initiale du bois à sécher lors de la mise en température Car certains défauts de séchage apparaissent au

processus de séchage normal ainsi qu'il est traditionnellement permis de sécher les céréales à une teneur en humidité au sein du saccho.

BIBLIOGRAPHIE

1 - KELLER R.

Structure - Composition - Formation du bois - Anatomie

Ecole d'hier sur le bois - 1983.

2 - JOLY P.

MORE CHEVALER P.

Théorie - Pratique - Economie du séchage

Edition Dual - 1980.

3 - VILLERE A.

Séchage des bois - Edition Dunod 1966.

4 - VILLERE A.

Sélection d'équipement pour le séchage

Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel

Vienne 1973.

5 - ALEON D.

Les critères de définition d'un besoin d'un séchoir

Extrait du colloque Entretien du Bois 82

29 - 30 Avril 1980.

6 - CENTRE TECHNIQUE DU BOIS ET DE L'AMEUBLEMENT (CTBA)

Dossier séchage. 1980.

7 - CENTRE TECHNIQUE DU BOIS ET DE L'AMEUBLEMENT (CTBA)

Le séchage artificiel des sciages. 1980.

8 - VILLERE A.

Le séchage dans les scieries

Centre Technique du Bois (CTB). Paris 1980.

9 - VILLERE A.

Conseils généraux pour le choix des séchoirs

Cahier du CTB Paris N°47 - Janvier 1970.

10- COURRIER du CTBA

Séchage du pin maritime à haute température - Janvier 1982.

11- TECHIQUES DE L'INGENIEUR

" Transfert de chaleur et de matiere - Définitions. Schémas aérauliques. Caractéristiques des séchoirs ". J 2712 (1965) pp- 1- 16.

12- BOUIGE R.

" Traité pratique de chauffage ". Editions Bailliére.

13- NORME FRANCAISE - AFNOR

NFT 30.038 " Essai de quadrillage "

14 - NORME FRANCAISE AFNOR

"NF T 30.038 " Essai de vieillissement accéléré "

15- JONHSON J.A

" Removal of water from wood "

Sunworld- Vol 4 N°6 - 1980.

16 - ASHWORT J.C

"The matematical simulation of the batch-drying of softwood timber "

PHD Thesis . Université of Canterbury - 1977..

17 - COMSTOCK G.L

"Directionnal permeability of softwoods "

Wood and fiber Vol 1 - 1970.

18 - SPOLEK G.A

PLUMB O.A

" Capillary pressure in softwoods "

Wood Science and Technology - 1981.

19 - KNEULE P.

"Principes fondamentaux du séchage "

Ed. Eyrolles . 1964.

20- SKARR CH.

SIAU J.F.

"Thermal diffusion of bound water in wood "

Wood Science and Technology . Vol15 - 1982.

21 - BRAMHALL G.

" Fick's law and bound- water diffusion "

Wood Science . Vol 8 N°3 - 1976.

22 - ALEON D.

"Mouvement de l'eau dans le bois lors du séchage "

Entretiens du Bois - 1982.

Association des anciens élèves de l'Ecole Supérieure du Bois

23 - HART C.A

" Principles of moisture movement in wood "

For. Prod. Jour. N°14 . 1964.

24 - BRAMHALL G.

"Sorption diffusion in wood "

Wood Science Vol.12 N°1 .1979.

25 - KRISHER D.

" Techniques de séchage "

Traduction du Centre des Industries Aérauliques et Thermiques - 1966.

26 - BERGER D.

PEI D.C.T

" Drying of hygroscopic capillary porous solids a theoretical approach "

Jour.Heat Mass Transfer - Vol 17 - 1973.

27 -BRAMHALL G.

Mathematical model lumber drying

Wood Science - Madison . USA - Vol12 N°1 - 1979.

28 - LUIKOV A.V

"Heat and transfer in granular porous bodies "

Pergamon Press Oxford - 1966.

29 - WHITAKER S.

"Heat and mass transfer in granular porous média "

Adv. in Ch. II . Vol1

Hemisphere publishing Corporation - 1981.

30 - VAN MEEL D.A

" Adiabatic convection batch drying with recirculation of air "

Chem. Eng. Sci. Vol 9 - 1957.

31 - MOSER M.

PERRE P.

MARTIN M.

" Séchage convectif à vapeur surchauffée de la planche à la pile "

5 th. International Seminar of European Drying Group

18 - 19 April 1991 - CTBA - PARIS.

32 - BEARD J.M

" Heat transfer during the drying of lumber "

Int. Drying Symposium - Kyoto - 1982.

33 - VICK C.B

" Drying rate curves for inch yellow poplar lumber in low temperature "

Forest Prod. Jour. 15 N°12 -1965.

34 - PALLET D.

AMROUX M.

THEMELLIN A.

" Solar drying research based on a complementary approach "

Second International Working Group on solar Drying (UNESCO)

Ashkhabad - URSS - 7 - 12 - 1985.

ANNEXES

ANNEXE 1

- Valeurs du coefficient de conductivité thermique de quelques matériaux de construction :

Brique ($\text{Kcal m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{°C}^{-1}$) : 0,6 - 1

Béton cellulaire ($\text{Kcal m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{°C}^{-1}$) : 0,55 - 0,65

- Caractéristiques du matériau composite formant les parois du séchoir :

Taux de fibres de verre (%) : 15 - 35

Contrainte de flexion (MPa) : 70 - 140

Contrainte limite de compression (MPa) : 140 - 210

Conductivité thermique ($10^{-2} \text{W Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) : 18,7 - 24,5

Capacité calorifique ($10^3 \text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) : 1,25 - 1,46

Densité : 1,7 - 2,1

Résistance en température continue (°C) : 150 - 200.

ANNEXE 2

RESULTATS EXPERIMENTAUX DES ESSAIS PRELIMINAIRES

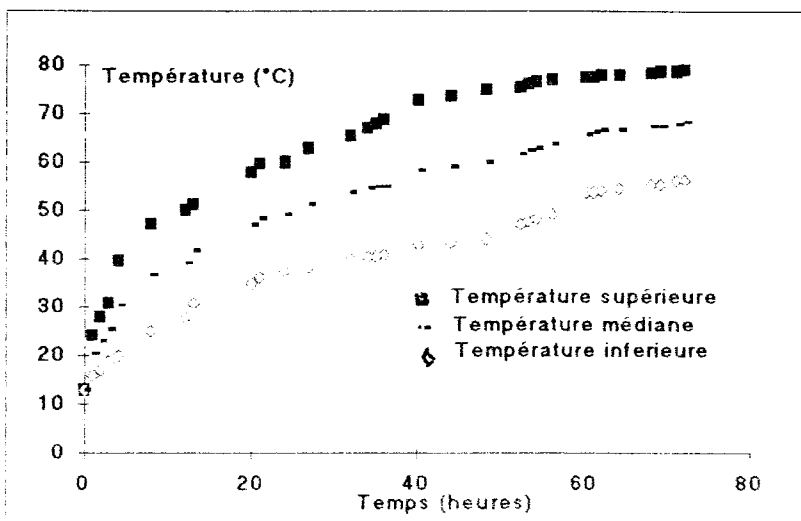


Figure 1 : Courbes des températures internes, essai 1

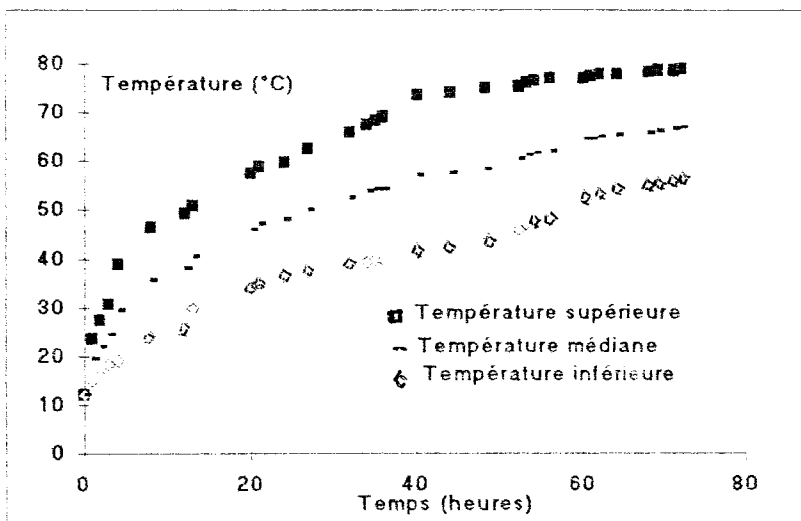


Figure 2 : Courbes des températures internes, essai 2

ANNEXE 2 (suite)

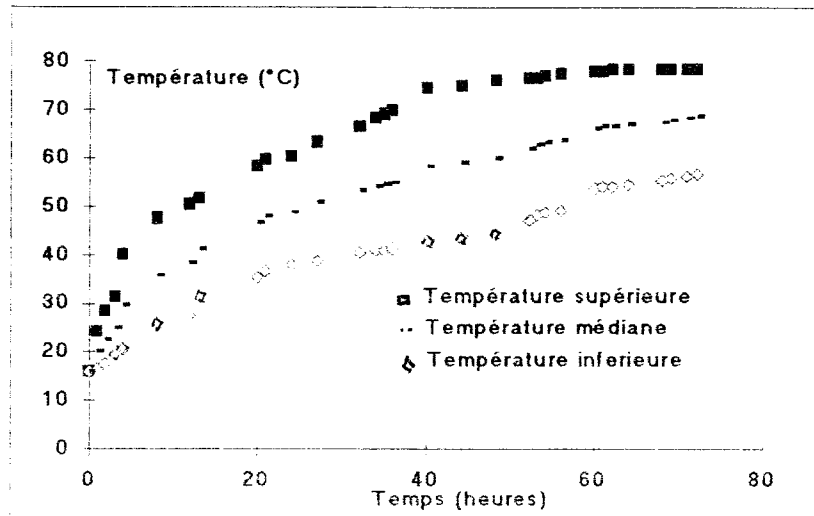


Figure 3 : Courbes des températures internes, essai 3

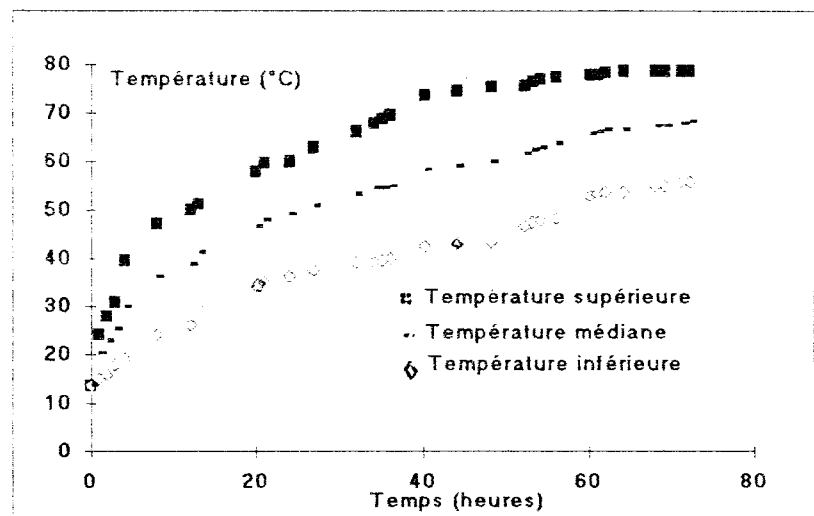


Figure 4 : Courbes des températures internes, essai 4

ANNEXE 3

Tableau 1 : Taux de séchage , essai 2, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	49	47	47	43	42	42
Humidité finale (%)	9	9	9	9	9	9
Taux de séchage (%)	82	81	81	79	79	76

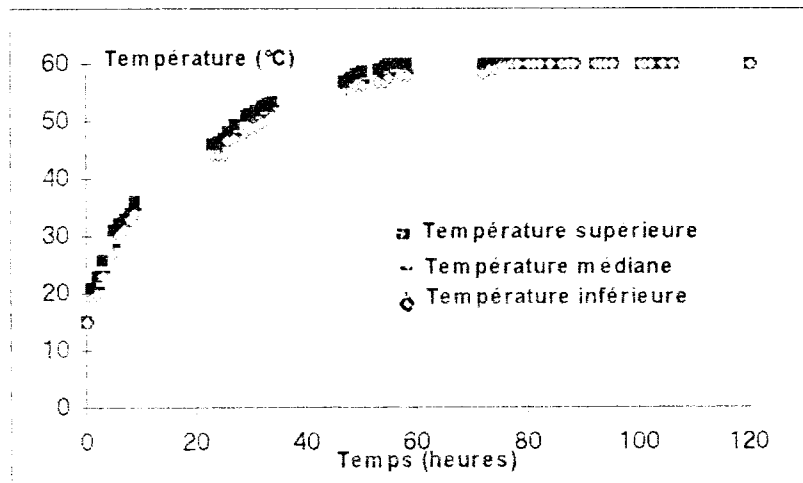


Figure 1 : Courbes des température intérieure, essai 2

ANNEXE 3 (suite)

Tableau 2 : Taux de séchage , essai 3, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	50	48	47	46	46	41
Humidité finale (%)	9	9	9	10	10	10
Taux de séchage (%)	82	81	81	78	78	76

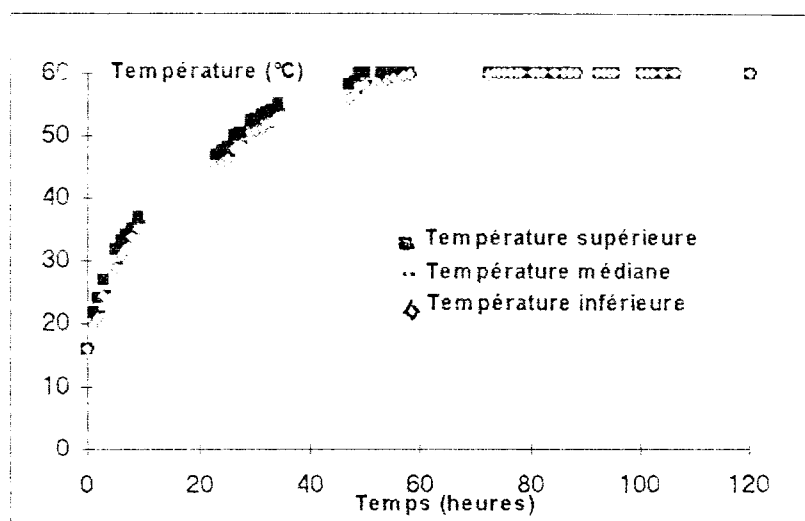


Figure 2 : Courbes des températures intérieures, essai 3

ANNEXE 3 (suite)

Tableau 3 : Taux de séchage , essai 4, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	50	47	48	47	45	42
Humidité finale (%)	9	9	9	10	10	10
Taux de séchage (%)	82	81	81	79	78	76

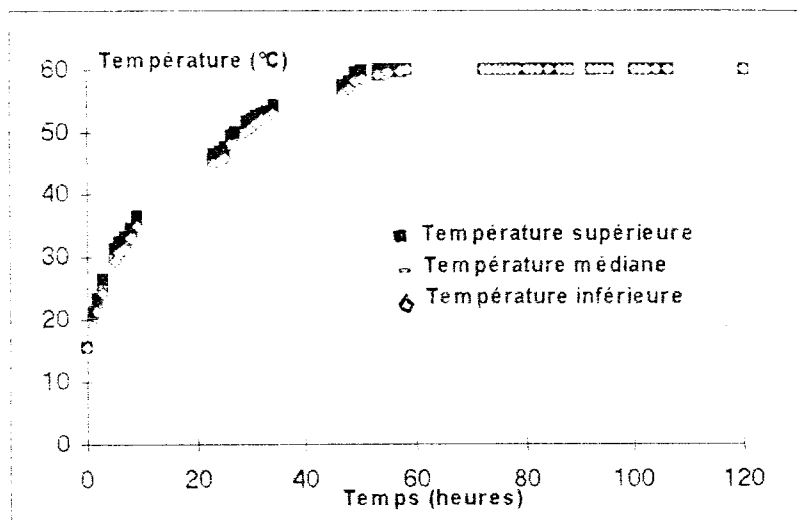


Figure 3 : Courbes des température internes, essai 4

ANNEXE 3 (suite)

Tableau 4 : Taux de séchage, essai 5, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	58	55	52	50	47	46
Humidité finale (%)	11	10	10	11	11	11
Taux de séchage (%)	81	81	81	78	77	76

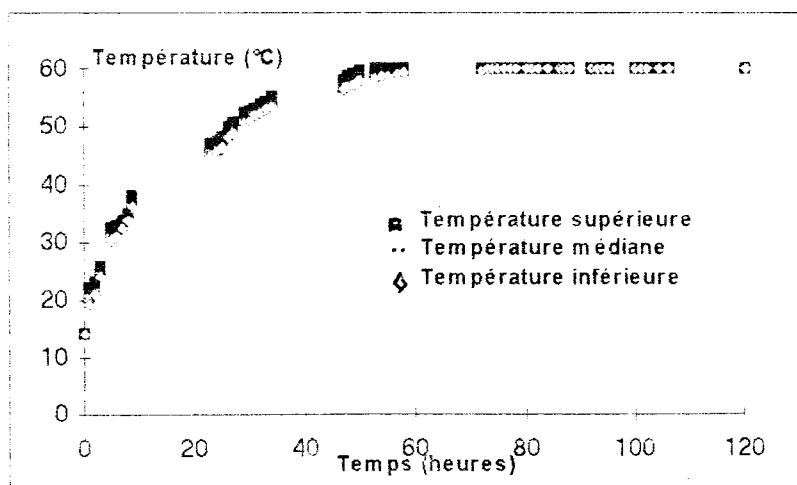


Figure 4 : Courbes des températures internes, essai 5

ANNEXE 3 (suite)

Tableau 5 : Taux de séchage, essai 6, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	60	54	53	44	43	41
Humidité finale (%)	11	10	10	10	10	10
Taux de séchage (%)	82	81	81	77	77	76

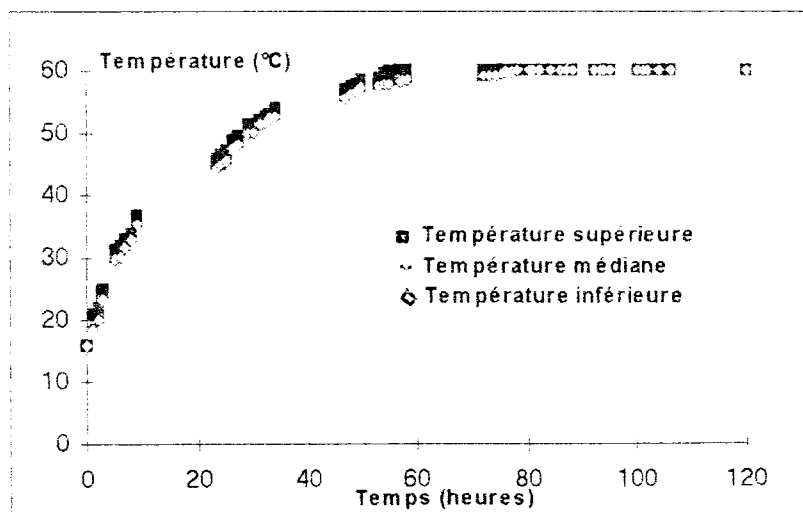


Figure 5 : Courbes des températures internes, essai 6

ANNEXE 3 (suite)

Tableau 6 : Taux de séchage, essai 7, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	59	57	57	48	48	46
Humidité finale (%)	11	11	11	10	10	11
Taux de séchage (%)	81	81	81	79	77	76

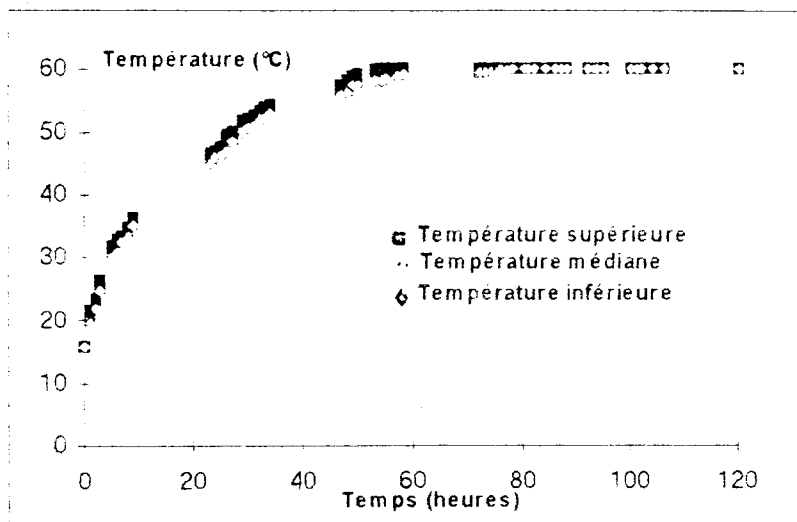


Figure 6 : Courbes des température internes, essai 7

ANNEXE 3 (suite)

Tableau 7 : Taux de séchage, essai 8, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	55	54	52	47	46	45
Humidité finale (%)	10	10	10	10	10	11
Taux de séchage (%)	82	81	80	79	78	76

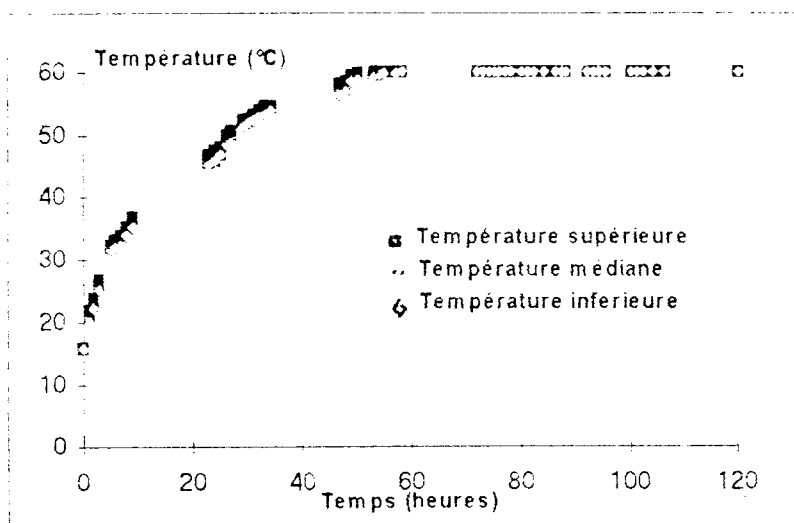


Figure 7 : Courbes des températures internes, essai 8

ANNEXE 3 (suite)

Tableau 8 : Taux de séchage, essai 9, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	51	50	48	44	43	41
Humidité finale (%)	9	9	9	9	9	10
Taux de séchage (%)	82	82	81	79	78	76

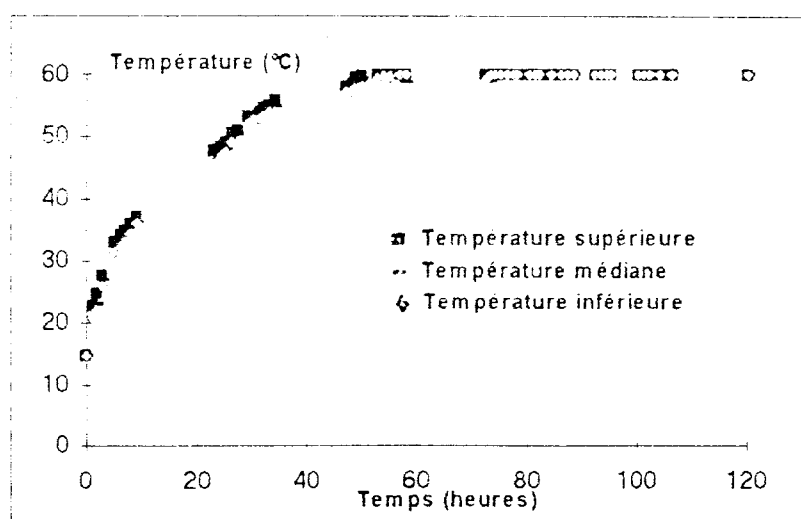


Figure 8 : Courbes des températures internes, essai 9

ANNEXE 3 (suite)

Tableau 9 : Taux de séchage, essai 10, essence chêne

Echantillons	A1	B1	C1	A2	B2	C2
Humidité initiale (%)	47	42	40	41	40	41
Humidité finale (%)	9	8	8	9	9	10
Taux de séchage (%)	81	80	80	78	78	76

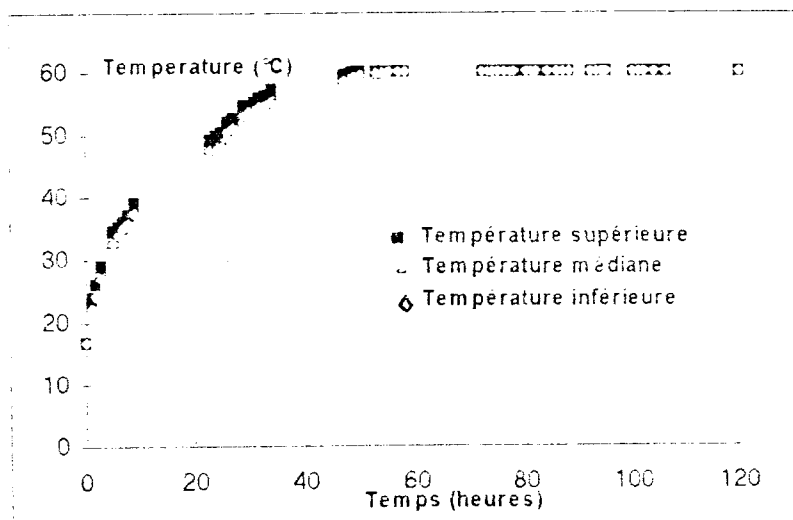


Figure 9 . Courbes des températures internes, essai 10