



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

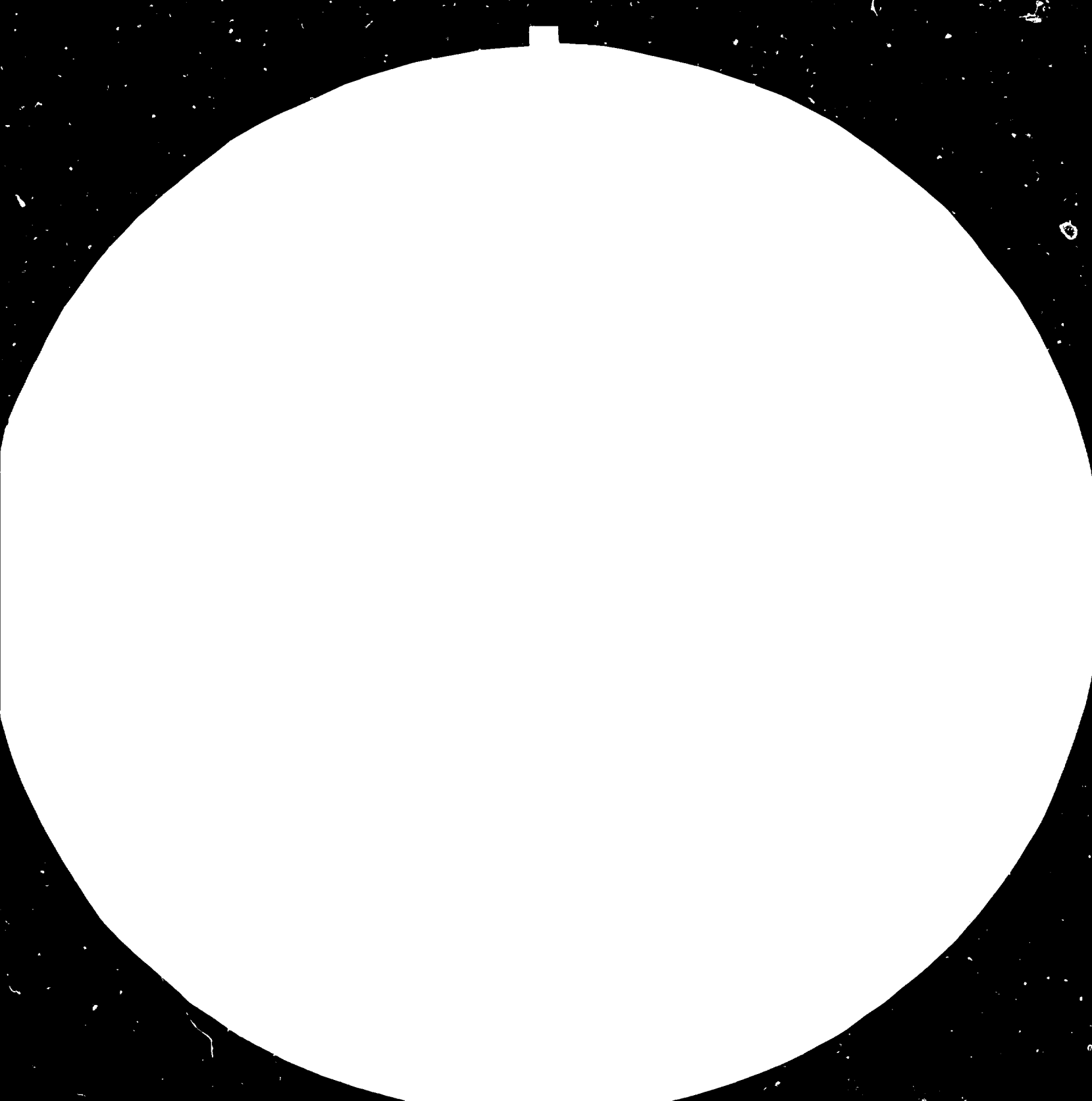
FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org





32



36



4



MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS
STANDARD REFERENCE MATERIAL 1010A
(ANSI and ISO TEST CHART No. 2)



12877 - F



Distr.
LIMITEE

ID/WG.369/11
2 mars 1984

FRANCAIS

Organisation des Nations Unies pour le développement industrie!

Stage technique sur les critères de choix
des machines à travailler le bois

Milan, Italie, 10 - 26 mai 1982

SECHAGE DES SCIAGES *

par

R. Cividini **

1726

* Les vues exprimées dans ce document sont celles de l'auteur et ne reflètent pas nécessairement les vues du Secrétariat de l'ONUDI. Le présent document n'a pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle.

** Professeur.

V.84-82727

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
1. Pourquoi et comment on sèche le bois	2
2. Moyens de séchage	12
2.1 Air et gaz de foyer	12
2.2 Vapeur	14
2.3 Vide	14
2.4 Energie électrique à haute fréquence	15
2.5 Rayons infra-rouges	15
2.6 Liquides	16
2.7 Vapeurs de solvants organiques	16
2.8 Solutions salines	17
3. Séchage naturel	17
4. Séchage artificiel	19
4.1 Séchage traditionnel	19
4.2 Séchoir et méthode de séchage à condensation	25
4.3 Séchoir et méthode de séchage sous vide	27
5. Automatisation de la conduite du séchage	29
6. Problèmes de choix du séchoir	31

1. Pourquoi et comment on sèche le bois

Détails sur l'exploitation des séchoirs et le procédé du séchage:

Les méthodes modernes de séchage du bois ont particulièrement progressé sous l'impulsion donnée par les nouvelles connaissances sur la nature physique du bois et sur les processus qui aboutissent à sa dessiccation.

Les conifères se distinguent généralement par une humidité relativement faible de leur bois de coeur (teneur en eau, 100 kg/m^3 environ, autrement dit 31 - 35 p. cent d'humidité) alors que l'aubier accuse une humidité élevée (570 kg/m^3 , 120 - 160 p. cent). Exceptions: le pin Weymouth, dont le bois de coeur se signale par une humidité de 80 p. cent environ et le "bois de coeur humide" du Sapin blanc qui arrive à 220 p. cent (800 kg/m^3) lorsqu'il est présent. Les bois des feuillus sont plus trempés et les différences d'humidité entre aubier et bois de coeur sont moins accentuées. ^{1/} En moyenne, l'humidité du bois augmente vers la cime, où prédomine l'aubier. Précisons également que l'humidité décroît avec l'âge, de sorte qu'une forêt jeune donnera un bois plus humide que celui d'une forêt ancienne et une forêt et d'essences de différents âges sera caractérisée par une humidité moyenne plus élevée que celle d'une forêt dont tous les arbres ont le même âge.

Une partie de l'eau présente dans le bois se trouve dans les cavités cellulaires et intercellulaires à l'état libre (eau libre); le restant se trouve à l'intérieur des parois cellulaires (humidité hygroscopique). L'humidité hygroscopique atteint de 30 à 38 p. cent du poids de la matière ligneuse sèche ("point de saturation" des parois cellulaires).

En milieu non saturé (c'est-à-dire d'air non saturé) l'humidité libre (celle qui dépasse le point de saturation des parois cellulaires) est sujette à évaporation.

1/ Pour citer quelques exemples, l'humidité du bois frais de Hêtre se situe entre 80 et 90 p. cent, ce qui équivaut à une teneur en eau de 450 à 500 kgs par mètre cube de bois, et l'humidité du Peuplier dépasse parfois les 200 p. cent (soit plus de 600 kgs d'eau par mètre cube).

Vis-à-vis de l'eau liée aux parois cellulaires, le bois se comporte comme une matière hygroscopique, ce qui signifie qu'il est sujet aux échanges d'humidité avec le milieu ambiant (air). Dans la gamme d'humidité qui s'échelonne entre zéro et le point de saturation des parois, le bois atteint une teneur en humidité qui est en équilibre avec une certaine humidité relative et avec la température de l'air ambiant (voir tableau no. 1): s'il est plus humide, il sèche; s'il est plus sec, il s'humidifie.

Tableau no. 1: Humidité sur laquelle se stabilise le bois (humidité d'équilibre) en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant.

Humidité relative de l'air en % de saturation	Température de l'air en degrés centigrade							
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
de à	Humidité du bois en pourcentage							
20 25	5	5	5	5	5	5	5	5
25 30	6	6	6	6	6	6	6	5
30 35	7	7	7	7	7	7	6	6
35 40	8	7	7	7	7	7	7	7
40 45	8	8	8	8	8	8	8	8
45 50	9	9	9	9	9	9	9	8
50 55	10	10	10	10	10	10	9	9
55 60	11	11	11	10	10	10	10	10
60 65	12	12	12	11	11	11	11	11
65 70	13	13	13	12	12	12	12	12
70 75	14	14	14	14	13	13	13	13
75 80	16	16	15	15	15	15	14	14
80 85	18	18	17	17	17	17	16	16
85 90	20	20	20	19	19	19	18	18
90 95	23	22	22	22	22	21	21	21
95 100	27	26	26	26	26	26	25	25

Ces deux processus ne sont pas entièrement réversibles et il a été constaté qu'à égalité de différence de pression, l'absorption permet au bois

d'atteindre une humidité plus faible que celle qu'on obtient par le séchage. Ce phénomène, qui prend le nom d'hystérésis, comporte une différence de deux à quatre p. cent entre les humidités obtenues respectivement par les deux processus cités et s'explique par une théorie suivant laquelle "les OH demeurent en partie liés les uns aux autres" ainsi que par la "diminution de la capacité d'humidification des surfaces sèches".

Parallèlement à ce phénomène, on note une vitesse moindre d'absorption de l'eau, en comparaison de la vitesse de dessiccation. Le bois accuse donc une certaine "inertie hygroscopique", qui est plus forte à la montée qu'à la descente.

Lorsque l'humidité hygroscopique diminue, le bois subit un retrait qui fait diminuer ses dimensions; lorsqu'elle augmente, le bois gonfle.

L'anisotropie des retraits - c'est à dire le rapport entre les trois retraits linéaires - se chiffre approximativement, pour la majorité des bois, par:

$$\beta_l : \beta_r : \beta_t = 1:10:20$$

ou β_l = retrait longitudinal

β_r = retrait radial

β_t = retrait tangentiel

Le retrait constitue, lui aussi, une caractéristique spécifique de l'espèce ligneuse; il varie néanmoins, même pour une seule et même espèce, entre des limites plutôt espacées.

Le tableau no. 2 indique également le rapport entre retrait tangentiel et retrait radial, rapport qui peut servir d'indice de la déformabilité du bois. Cette dernière augmente en effet en fonction de l'augmentation du rapport

$$\frac{\beta_t}{\beta_r}$$

Tableau no. 2: Humidité d'équilibre bois/air et retraits/gonflements dans la gamme de l'humidité relative de l'air (H.R.) de 60% et 90%, pour des températures de l'air aux environs de 20°C (F.P.R.L. Princes Risborough), "instabilité dimensionnelle" et "déformabilité".

Espèce ligneuse	H _e pr.H.R.		Retrait-gonflement entre H.R. 60% et 90%				Instab. dimens.	Déformabilité
	90%	60%	tangential		radial		$\frac{k_E}{k_r}$	$\frac{\Delta\beta_E}{\Delta\beta_r}$
			$\Delta\beta_E\%$	k_E^*	$\Delta\beta_r$	k_r^*		
Obeche (Wawa, Samba)	19	12	1,25	0,18	0,8	0,12	0,30	1,5
Afrormosia	15	11	1,3	0,32	0,7	0,17	0,49	1,9
Erable	23	13,5	2,8	0,29	1,4	0,15	0,44	1,9
Bouleau	21,5	12	2,5	0,26	2,2	0,23	0,49	1,1
Hêtre	20	12	3,2	0,40	1,7	0,21	0,61	1,9
Chêne (Europe)	20	12	2,5	0,31	1,5	0,19	0,51	1,6
Frêne	20	12,5	1,8	0,24	1,3	0,17	0,41	1,4
Iroko	15	11	1,0	0,25	0,5	0,12	0,37	2,0
Cerisier	19	12,5	2,0	0,31	1,2	0,18	0,19	1,7
Mélèze (Europe)	19	13	1,7	0,28	0,8	0,13	0,41	2,1
Limba (Fraké)	18	12	1,3	0,22	1,0	0,17	0,39	1,3
Khaya grandifolia	23	14	1,9	0,21	1,5	0,17	0,38	1,2
Khaya ivorensis	20	13,5	1,5	0,23	0,9	0,14	0,37	1,6
Acajou (Swietenia)	19	12,5	1,3	0,20	1,0	0,15	0,35	1,3
Makoré	19	13	1,8	0,30	1,1	0,18	0,48	1,7
Bété	20	12	2,3	0,29	1,3	0,16	0,45	1,8
Noyer africain	18	13	1,3	0,26	0,9	0,18	0,44	1,4
Noyer européen	18,5	11,5	2,0	0,29	1,6	0,23	0,52	1,3
Chêne rouge	18,5	11,5	2,4	0,34	1,3	0,19	0,53	1,8
Orme	22	13	2,4	0,27	1,5	0,17	0,44	1,6
Sapelli	20,5	13,5	1,8	0,26	1,3	0,19	0,45	1,4
Teck et Padouk	15	10	1,3	0,26	0,8	0,16	0,42	1,6
Wengé	15	11,5	0,9	0,26	0,65	0,19	0,45	1,4
Abura		11,5		0,20		0,08	0,28	2,5
Sipo	20	14		0,20		0,15	0,35	1,3
Kosipo	22	15		0,18		0,13	0,32	1,4

* Coefficients de retrait par perte d'humidité du bois de 1% entre les humidités d'équilibre citées.

Dans la pratique, le retrait débute lorsque l'humidité moyenne du bois dépasse considérablement les 30 p. cent, les couches externes commençant à perdre leur humidité de saturation tandis que l'humidité des couches internes reste encore très élevée.

La valeur d'humidité moyenne qui marquera le début du retrait dépend pratiquement de la perméabilité, de l'épaisseur, de l'humidité initiale, de l'intensité du dessèchement et des résistances mécaniques (plasticité à la traction et à la compression).

Les produits finis en bois auront tendance à se conformer à l'ambiance dans laquelle ils se trouveront placés; il faudra donc les fournir dans des conditions d'équilibre avec les conditions climatiques locales pour les stabiliser tant du point de vue de la forme que du point de vue des dimensions. C'est ici que se pose le problème des réglementations concernant l'humidité du bois des produits destinés à différents milieux, à différentes expositions, à différents microclimats (voir tableau no. 3 à la page suivante).

Les conditions d'ambiance varient normalement pendant l'année, suivant les saisons et selon le conditionnement des locaux. Si ces variations demeurent dans les limites de l'hystérésis, l'humidité du bois ne subit aucune modification, pourvu qu'elle ait été précédemment amenée à la limite inférieure. A cause de l'inertie hygroscopique, aucune modification ne se produira dans l'humidité du bois, même en cas de variations intermittentes hors des limites citées. L'inertie hygroscopique augmente avec la densité et l'épaisseur du bois, avec le fini de son vernissage, avec les caractéristiques hydrofuges des produits servant à la traiter.

Toute modification de l'humidité de saturation provoque également les variations dimensionnelles et les déformations du bois comme indiqué au tableau no. 2 ci-dessus. Le séchage permet donc d'obtenir une stabilisation relative.

La perméabilité du bois est le facteur le plus important du processus de séchage. La perméabilité radiale est sensiblement supérieure à la perméabilité tangentielle, de sorte que les planches latérales sèchent beaucoup plus rapidement que les centrales. La perméabilité radiale augmente

Tableau no. 3: Humidité finale du bois recommandée pour certains produits.

	<u>Pourcentage</u>
Sciés commerciaux	16 - 20
Bois de construction pour le bâtiment	12 - 18
Bois de construction pour baraquements	12 - 15
Panneaux (contreplaqués, lattés, particules, etc.) placages	6 - 8
Contreplaqués commerciaux	12 - 16
Ames pour panneaux lattés	6 - 7
Huisseries, bâtis de fenêtres (extérieures)	12 - 15
Huisseries intérieures	8 - 10
Meubles d'intérieur et aménagements en général	6 - 10
Parquets et lames pour revêtements intérieurs	6 - 8
Meubles et outillages pour usages extérieurs (jardins, etc.)	12 - 16
Carrosseries et machines agricoles	12 - 18
Carrosseries pour véhicules automobiles	7 - 10
Intérieurs de wagons de chemin de fer	6 - 8
Constructions d'avions	6 - 10
Embarcations	12 - 16
Outillage sportif	8 - 12
Jouets à utiliser à l'intérieur	6 - 10
Jouets à utiliser à l'extérieur	10 - 15
Gabarits, formes, embauchoirs	6 - 9
Crosses de fusils	7 - 12
Appareillage électrique	5 - 8
Instruments de musique	5 - 8
Moules	6 - 8
Cadres	6 - 10
Barils, caisses	12 - 16

en fonction de la grandeur des rayons medullaires. Une grandeur remarquable et la fréquence des rayons sont malheureusement à l'origine de la diminution de résistance du bois à la traction transversale, ce qui donne lieu à des fentes.

Si le bois n'est pas immédiatement plongé dans l'eau, son séchage débute aussitôt après l'abattage, à cause de l'évaporation de leau libre à la surface du bois (première phase). Au fur et à mesure que ce processus avance en profondeur dans le bois, par suite de la diffusion de vapeur qui se crée dans les couches profondes du fait de sa porosité, et par suite également - en partie, du moins - du mouvement capillaire à l'intérieur des bois perméables, l'humidité atteindra dans l'épaisseur, avant même le premier point critique, un gradient parabolique assez régulier. Dans le cas des bois à perméabilité moyenne, la diffusion de la vapeur et les déplacements capillaires seront plus réduits et bientôt la diffusion de l'eau à travers les parois cellulaires aura la priorité, de sorte que le gradient d'humidité dans l'épaisseur de bois sera plus accentué et la forme parabolique sera atteinte immédiatement après l'établissement de l'équilibre entre les couches externes et l'air ambiant. Dans les bois imperméables, l'humidité superficielle arrivera à s'équilibrer presque immédiatement avec l'air après le début du séchage, tandis qu'une grande partie de l'intérieur maintiendra son degré initial d'humidité. Pendant cette phase les résistances mécaniques sont moindres et les températures élevées sont dangereuses.

L'humidité de saturation atteinte dans les parois cellulaires des couches périphériques marque le début du retrait et de l'apparition des tensions de traction dans ces couches, tensions qui s'avèrent plus marquées dans les bois moyennement perméables (premier point critique) et c'est alors que la descente de l'humidité commence à ralentir (deuxième phase). L'humidité moyenne du bois au premier point critique sera aux environs des deux tiers de l'humidité initiale plus dix p. cent dans les bois perméables; elle atteindra entre deux tiers et trois quarts de l'humidité initiale dans les bois à perméabilité moyenne.

C'est au cours de cette phase que commencent à se manifester des fentes orientées de la surface du bois vers le centre (généralement le long des rayons): sur les sections transversales, ces fentes se présentent avec apparence cunéiforme.

L'humidité moyenne de 21 à 24 p. cent une fois atteinte, le séchage du bois arrive à sa troisième phase, au cours de laquelle on constatera:

- (a) l'inversion des tensions (tension au centre et compression à la périphérie);
- (b) un équilibre, dans chaque cas, entre les couches externes et le climat final, généralement très sec (2 - 5 p. cent).

Les résistances mécaniques du bois augmentent au cours de cette phase. La dessiccation se ralentit, le mouvement de l'eau s'effectuant principalement, pendant la phase en question, sous forme de diffusion à travers les parois cellulaires.

C'est la phase pendant laquelle les fentes superficielles fines ont tendance à se fermer, et les pièces s'allongent et leur centre s'agrandit.

Le séchage est d'autant plus rapide que la perméabilité est plus grande, que la densité est plus faible, que les dimensions des pièces sont plus réduites, que la température est plus élevée, que l'humidité relative de l'air est plus basse et que la circulation de l'air est plus rapide. Cette dernière perd son efficacité au cours de la troisième phase.

La période de dessèchement, pendant laquelle l'humidité descend de 45 à 25 p. cent, est aussi la période au cours de laquelle le bois est le plus susceptible de subir les attaques des champignons du bleuissement et d'autres organismes destructeurs. Ce danger augmente en fonction du temps de persistance de l'humidité pendant cet interval.

A ce sujet, signalons l'importance considérable du séchage des bois frais biodégradables et sujets au bleuissement. Cette catégorie comprend l'aubier de toutes les espèces ligneuses, les essences à bois de coeur indifférencié telles que le Hêtre et, en particulier, les bois "blancs" tropicaux (Ramin, Ilomba, Koto, Obeche, Aniégré, etc.). Ajoutons à tout cela le problème du noircissement intérieur.

Dans les essences ligneuses contenant des glucosides, des polyphénols et des acides, la catalyse opérée par la température en présence d'eau ou de

vapeur a pour résultat un certain nombre de réactions chimiques qui noircissent l'intérieur des grumes destinées soit au sciage ou au déroulage.

Les températures aux environs de 35°C créent les conditions idéales pour les organismes xylophages; quand la température augmente, le danger du noircissement interne augmente aussi. La seule précaution certaine contre le bleuissement et la bio-dégradation réside dans l'imprégnation complète et dans le traitement chimique de préservation.

La règle à suivre pour le séchage de ces bois consisterait à opérer à basse température et à faible teneur d'humidité relative de l'air.

Ici encore il faut examiner, dans chaque cas, d'un côté l'économie du séchage artificiel, de l'autre la possibilité de constater, pendant un séchage non-piloté, des manifestations de bleuissement ainsi que des températures susceptibles de favoriser le noircissement de l'intérieur du bois.

On a pu constater sur les bois tropicaux des caractéristiques nouvelles et des défauts particuliers qui ont augmenté les problèmes du séchage. Ceci s'applique notamment aux bois du sud-est asiatique, qui sont d'abord moins connus et ensuite plus imprévisibles et largement variables quant à leurs caractéristiques. Les essences tropicales sont à peu près exclusivement feuillues et à porosité diffuse, mais plusieurs d'entre elles contiennent des canaux résinifères et huileux, dans le bois comme dans les rayons parenchymateux. L'accumulation et le durcissement de ces substances dans les couches externes au cours de la dessiccation constituent un obstacle exceptionnel qui entrave l'afflux de l'eau à la surface, et ce phénomène donne souvent lieu à un effondrement, avec création de poches d'humidité à l'intérieur du bois. Dans ces bois tropicaux, les différences de perméabilité sont généralement accrues, à l'intérieur de l'espèce comme entre l'aubier et le bois de coeur - et, par conséquent, même entre les sciages provenant d'un même tronc.

Certaines essences contiennent des substances dont les vapeurs dégagent une odeur répugnante (Ramin et autres) et l'air qui sort du séchoir pendant le séchage contamine de cette odeur le milieu ambiant. Certaines fabriques avoisinant des localités habitées ont été contraintes d'installer des systèmes de filtrage de l'air sortant du séchoir.

Plusieurs bois contiennent des quantités variables de sels qui provoquent des déviations par rapport à la normale lors de la mesure électrique de l'humidité du bois et empêchent, par conséquent, un fonctionnement régulier de l'automatisation.

Les bois à fibres entrecroisées, à coeur mou et à tensions internes de croissance posent des problèmes particuliers.

Quant à la perméabilité, on pourrait établir la classification approximative suivante:

- Bois perméables:

Toutes les essences feuillues à vaisseaux ouverts et en général celles à bois de coeur indifférencié, que nous trouvons principalement dans le groupe des bois à porosité diffuse (Hêtre, Tilleul, Peuplier, bois tropicaux "blancs" tels que l'Obèche, l'Abura, le Jélutong, etc.); l'aubier de toutes les espèces feuillues.

- Bois moyennement perméables:

Aubiers et bois de coeur indifférenciés des Conifères, à cause des ponctuations auréolées;

- Bois imperméable:

Bois de coeur des feuillus, à vaisseaux obtrusés par des thylles (Chêne Pédonculé, Chêne, Châtaigner, plusieurs bois des zones tropicales et australes); faux bois de coeur des feuillus à oublier de coeur indifférencié.

Sur la base de ce qui a été mentionné ci-dessus, le séchage du bois exige une intervention technique ou, tout au moins, il s'avère nécessaire de le contrôler, de façon à:

- augmenter la vitesse de dessèchement;
- éviter certains dégats (biodegradation, fentes, craquelures, tensions, etc.) dans le bois;

- atteindre le degré final voulu d'humidité, c'est-à-dire la stabilisation formelle et dimensionnelle.

2. Moyens de séchage:

2.1 Air et gaz de foyer

Les principales caractéristiques de l'air peuvent s'énumérer comme suit: température, pression, volume spécifique, poids de l'unité de volume, humidité et contenu de chaleur (enthalpie); elles sont interdépendantes selon les lois fondamentales et il en dérive que:

- le poids de l'air est proportionnel à sa pression;
- la vapeur d'eau se répand dans l'air en se dirigeant vers le lieu à plus basse pression;
- sans préjudice de la pression atmosphérique du mélange air/vapeur, toute augmentation de température correspondra à une dilatation de l'air sec et à une diminution de sa pression, de sorte qu'il en dérivera une augmentation de la pression de vapeur; par conséquent, nous pouvons dire qu'en fonction de l'élévation de température l'air peut contenir des quantités supérieures de vapeur.

La pression possible maximale de la vapeur dans l'air humide est appelée "pression de saturation".

Si la pression effective de la vapeur p_v pour une température donnée est inférieure à la pression de saturation p_{vs} , l'air n'est pas saturé. Le rapport entre ces deux grandeurs, dénommé "humidité relative de l'air", est normalement indiqué en pourcentage, c'est-à-dire, en multipliant le rapport en question par 100. L'humidité de l'air peut être exprimée par le rapport entre le poids de la vapeur d'eau contenue dans l'air et le poids de la vapeur d'eau à l'état de saturation. Si l'humidité relative de l'air est inférieure à 100 p. cent, cela signifie que la pression de la vapeur dans l'air est inférieure à la pression de saturation et que par conséquent l'air pourra absorber la vapeur d'eau des lieux où la pression de cette vapeur est plus élevée. Ce processus est l'évaporation.

La quantité maximale de vapeur que l'air peut contenir dépend de la température. Les quantités maximales de la teneur en vapeur d'eau (humidité de saturation) par rapport à certaines températures sont indiquées au tableau no. 4 qui les précise pour une pression atmosphérique totale normale de 760 mm de colonne de mercure (1 atm = 1.033 kg/cm²).

Tableau no. 4: Pression et humidité de saturation de l'air à différentes températures.

Température en °C	Pression de saturation en mm Hg	Eau de saturation en g/m ³	Humidité absolue de saturation en g par kg d'air sec
10	9,2	9,4	7,6
20	17,5	17,3	14,7
30	31,8	30,4	27,2
40	55,3	51,1	48,8
50	92,5	82,1	86,2
60	149,4	130,1	152,0
70	233,7	198,0	276,0
80	355,1	293,9	545,0
90	505,8	423,1	1400,0
100	760,0	600,0	air sec absent

La chaleur de l'air humide est égale à la somme des teneurs en chaleur respectives de l'air sec et de la vapeur que l'air humide contient; de ce fait, la teneur en chaleur de l'air à une température donnée augmente en fonction de l'accroissement de l'humidité.

Lors du séchage, l'air peut s'acquitter soit d'une double tâche qui serait l'échauffement de la matière intéressée (bois et eau) et évacuation de l'eau (évaporation) ou bien seulement de l'évacuation de l'eau. Dans ces deux cas il n'y a ni changements de température, ni réversibilité de l'humidité par suite du conditionnement. Au sens restreint du terme, les processus suivants constituent le conditionnement de l'air:

- augmentation de la température par chauffage, c'est à dire par un apport de chaleur;
- diminution de la température par refroidissement, c'est-à-dire par réduction de la chaleur;

- augmentation de l'humidité relative par humidification, c'est-à-dire par un apport de vapeur;
- diminution de l'humidité par dessiccation, c'est-à-dire par une soustraction de vapeur qui peut avoir lieu soit par rechange partiel de l'air soit par condensation partielle de la vapeur contenue dans l'air.

Les gaz de foyer ont des caractéristiques semblables à celles de l'air et peuvent être éventuellement mélangés à l'air et à la vapeur d'eau pour le conditionnement.

2.2 Vapeur

L'équilibre hygroscopique du bois en milieu de vapeur saturée à la pression atmosphérique normale se chiffre par quelques unités de pourcentage au-dessous du point de saturation des parois cellulaires.

La vapeur surchauffée est une vapeur dont la température dépasse celle de saturation pour une pression donnée. Pour donner un exemple, la vapeur saturée à 115°C devrait avoir, selon le tableau de la vapeur, une pression de 1,7239 kg/cm². La vapeur surchauffée n'est pas saturée (dans notre exemple, son humidité relative est égale à $\frac{1,0332}{1,7239} = 0,6$); elle est donc

en mesure de déterminer l'évaporation, c'est à dire d'absorber de la vapeur et de chauffer: en définitive, de mettre en liberté de l'énergie thermique en se refroidissant même avant sa condensation. Ces qualités la recommandent pour un emploi dans le séchage artificiel du bois.

2.3 Vide

Le vide présente la caractéristique d'abaisser la température d'ébullition de l'eau, comme le montrent les données ci-dessous:

Pression absolue	Température d'ébullition
p_0 (mm Hg)	t_{eb} ($^{\circ}$ C)
760	100
355	80
150	60
55	40
18	20

En considérant cette propriété, le vide est employé depuis longtemps déjà dans différents domaines (médecine, biologie, industries alimentaires) pour la dessiccation des substances très sensibles et aisément détériorables. Son application est envisagée de façon analogue pour sécher certains bois particulièrement sensibles aux températures élevées.

Le séchage sous vide peut être obtenu non seulement moyennant l'évaporation de l'eau, mais aussi par sublimation de la glace; dans ce dernier cas, toutefois, le vide doit être très poussé ($p_0 = 0,2...2$ Hg), parce qu'il faut opérer à une température de $- 30^{\circ}$ C.

2.4 Energie électrique à haute fréquence

Le bois étant considérablement diélectrique, les courants à haute fréquence peuvent servir de source de chaleur dans les traitements hygrothermiques du bois, avec emploi de fréquences de 2 à 40 MHz

On a entrepris tout récemment des essais de chauffage interne à micro-ondes, utilisant des fréquences d'un ordre supérieur à 900 MHz.

2.5 Rayons infra-rouges

Le bois absorbe très bien les rayons infra-rouges ($1...2\mu$) mais sa perméabilité vis-à-vis de ces rayons n'est pas considérable: ils ne parviennent à pénétrer que 4-5 mm en profondeur. Le bois ne les réfléchit presque pas, de sorte qu'on peut chauffer sans pertes d'énergie. Vu la faible pénétration à l'intérieur du bois, le chauffage aura une évolution et un effet analogues à ce qui se produit lors du chauffage à convection ou à contact.

2.6 Liquides

Parmi les liquides hydrophobes (c'est-à-dire non miscibles à l'eau) ceux dont la température d'ébullition dépasse celle de l'eau sont préférés pour l'usage visé: huile de lin, huile de goudron, et surtout résidus solides de la distillation du pétrole, communément désignés en Italie sous le nom de "paraffines" (et appelés, dans d'autres pays, "petrolats") et constitués par des mélanges de paraffine, de cérésine et d'huiles à haute viscosité formant une masse jaune qui devient fluide à 50°C et bout à 250°C. Ces matières ne sont pas toxiques. Leur densité est environ 0,9. Les traitements ont lieu par immersion.

Les conditions de chauffage et de séchage sont analogues à celles du traitement par la vapeur surchauffée.

Mélanges azéotropiques:

On désigne de ce nom les mélanges dont le point d'ébullition correspond à une température inférieure à celui de leurs constituants; par exemple les mélanges contenant de l'eau à l'ébullition au-dessous de 100°C (le mélange eau-tétrachloroéthylène bout à 87°C). Cette caractéristique s'avère très utile aux fins de l'élimination d'une partie de l'eau présente dans le bois, car les vapeurs du mélange se condensent et peuvent se séparer.

Solvants organiques hydrophiles:

Les solvants organiques hydrophiles polaires solubles dans l'eau sont très appropriés pour obtenir en même temps l'élimination de l'eau et celle des extractifs du bois. On peut employer à cet effet l'acétone, les alcools, l'éther.

Les solvants sont redistillés (rectification) après l'extraction.

2.7 Vapeurs de solvants organiques

On emploie, pour la production de ces vapeurs, des solvants non-solubles dans l'eau (xylol, toluol, tétrachloroéthylène) ou des fractions de

distillants de goudron à basse température d'ébullition. La chaleur d'évaporation de ces solvants a une température moins élevée que celle de l'eau; les coefficients de transmission de la chaleur sont très élevés.

Les vapeurs de solvants organiques sont utilisées dans le séchage du bois sous vide.

2.8 Solutions salines

La pression de la vapeur dans une solution saline saturée est inférieure à celle de la vapeur de l'eau; l'eau présente dans le bois se répand par conséquent dans la solution.

Les sels ou autres composés hygroscopiques (sel de cuisine, urée, mélasse ou sucre inverti, glycol polyéthylénique) sont employés dans des solutions à deux ou même à trois constituants, pour obtenir d'autres effets en plus de la dessiccation du bois, et notamment pour réduire l'hygroscopicité du bois et accroître sa stabilité dimensionnelle.

3. Séchage naturel:

Le séchage a pour but principal d'atteindre un degré d'humidité susceptible d'assurer la certitude d'avoir éliminé les possibilités d'attaque des micro-organismes et des insectes (18 à 20 p. cent).

L'humidité minimale à laquelle on peut parvenir par le séchage naturel dépend des conditions micro-climatiques et d'autres conditions locales; elle varie dans nos régions, de 8 à 20 p. cent, et l'évolution saisonnière exerce à ce sujet une influence considérable.

L'humidité du bois sec, laissé à l'air libre, varie au cours de l'année selon les variations du climat.

Les grumes de sciage destinées au séchage naturel à l'air libre sont d'ordinaire entreposées sur les esplanades en plein air, choisies sur la base des facteurs de dessiccation et organisées en secteurs expressément destinés à ce stockage. Les différents secteurs sont délimités par des clôtures de

séparation, avec prévision de passages pour le transport des piles de bois. Le terrain doit être soigneusement consolidé, avec une inclinaison qui garantit l'écoulement des eaux, et débarrassé de toute végétation ainsi que des accumulations de déchets tels que écorces, courçons, etc.

Les dimensions et le nombre des piles de sciages dépendent du système de transport et des conditions climatiques; les piles peuvent être d'autant plus larges (1,2 - 4 m) que l'endroit est plus aéré; l'espace qui les sépare va de 0,75 à 2 m. La direction des planches par rapport à la direction dominante du vent doit être étudiée dans chaque cas particulier.

Immédiatement après le sciage, les pièces destinées au séchage doivent être brossées et empilées avec les lattes séparant les planches; les pièces altérables et biodégradables et les matériaux auxiliaires seront traités par des antiseptiques, surtout s'il s'agit d'essences "fragiles" c'est à dire facilement attaquées par les champignons et les insectes. Les piles de bois scié doivent être toujours recouvertes et le bois particulièrement de valeur sera sauvegardé par des protections spéciales aux deux bouts des piles.

Le socle de chaque pile est constitué par des piliers en béton et par des traverses en bois d'abord traité, ou en béton armé, afin que les premières planches se trouvent à 30 cm au moins au-dessus du sol.

Les piles doivent être recouvertes d'une toiture en pente, afin de ne pas entraver l'aération et pour préserver aussi les côtés de la pile des effets du soleil et des précipitations atmosphériques. Les tas trop exposés au soleil sont complètement protégés sur les côtés par des planches de rebut, des claies, etc. Plus le climat est humide, plus les planches des rangées horizontales seront espacées (on peut éventuellement prévoir une sorte de cheminée verticale au milieu de la pile).

Les piles de bois ont d'ordinaire une hauteur de 4,5 à 5 mètres; mais elles peuvent atteindre 7 mètres.

L'espèce ligneuse, l'épaisseur et l'humidité initiale des planches de chaque pile doivent être uniformes.

D'autres assortiments sont empilés selon les exigences spécifiques: le bois scié en boules, comme il l'était dans le tronc, les planches lattées en piles sur des longueurs allant jusqu'à 7 mètres et des largeurs allant jusqu'à 1,5 m, et quelquefois disposées en lame de couteau pour faciliter le séchage. Les produits semi-finis sont espacés entre eux s'ils sont très courts, ou lattés s'ils dépassent 70 cm.

Les assortiments de bois de qualité sont séchés dans des hangars ou sous des marquises, avec prévision d'ouvertures réglables assurant une circulation d'air efficace. Les feuillards de bois sont rangés sur des étagères fixes.

Pour faciliter le séchage naturel du bois, différentes méthodes sont utilisées: disposition des planches debout (pour le pré-séchage des espèces très humides ou de couleur altérable: bouleau, érable, peuplier); pressage, centrifugation éventuellement combinée avec l'action du bois, ventilation forcée, utilisation de l'énergie solaire. Ces méthodes sont cependant réservées à des cas spéciaux, leur rentabilité étant généralement douteuse.

La capacité de stockage du bois à sécher est très variable, selon les nombreux facteurs d'empilage. Pour des planches normales et des piles de 5 m de hauteur utile, cette capacité va de 0,5 à 1 m³ par mètre carré de surface de l'esplanade.

4. Séchage artificiel:

Les systèmes de séchage utilisés à l'échelle industrielle sont fondamentalement au nombre de trois: 1) séchage traditionnel, 2) séchage par condensation, 3) séchage sous vide. D'autres méthodes de séchage, même désormais considérées comme technologiquement sûres - c'est le cas des procédés à vapeur saturée, à haute fréquence, etc. - ne sont en général appliquées que dans des cas exceptionnels. Les méthodes de séchage par condensation et sous vide, telles qu'elles sont appliquées actuellement, ont été mises au point et développées en Italie.

4.1 Séchage traditionnel:

L'emploi d'un séchoir à recyclage forcé de l'air chauffé par des radiateurs à eau chaude ou à vapeur, et conditionné moyennant une recharge

partielle d'air est la méthode de séchage traditionnel. Le bois est séché à une température allant de 40 à 100°C. L'air joue un double rôle: il chauffe par convection et évacue l'eau par évaporation. L'humidification éventuelle de l'air est effectuée au moyen d'une insufflation de vapeur ou d'eau nébulisée.

Economiquement, le séchage à convection est avantageux, étant donné qu'il permet une épargne d'énergie.

Ce système de séchage s'est développé par la réalisation d'installations à cellule ou à galerie, construites en maçonnerie ou en tôle d'acier et contenant des appareillages pour le recyclage et le conditionnement du moyen de séchage (air). Cellules et galeries doivent être imperméabilisées, isolées thermiquement (pour éviter les dispersions de chaleur, la condensation et le conditionnement déséquilibré de l'air).

Les types de structure de ce système sont variés, surtout en ce qui concerne l'emplacement des ventilateurs. Ils peuvent tous répondre parfaitement aux fins visées, pourvu qu'une circulation uniforme de l'air à travers la pile de bois soit assurée.

Nous pouvons affirmer que le séchoir à cellules, avec ventilateurs placés au-dessus a prévalu en Europe centrale: c'est en effet ce modèle qui a été l'objet des études les plus approfondies en matière de circulation uniforme de l'air. Le système de recharge partiel de l'air a été en outre préféré au système à condensation, avec réfrigération à l'eau; par ailleurs, en régime d'automatisation, c'est le système à mesure continue de l'humidité du bois qui a prévalu.

Dans tous les cas où des quantités considérables de bois et la manipulation est effectuée par chariots élévateurs à fourche (palettes), du bois en paquets, la construction de grandes cellules dans lesquelles les paquets de bois seront introduits directement peut être rationnellement envisagée, surtout lorsqu'il s'agit de gros bois à texture épaisse. La capacité de remplissage de ces cellules peut atteindre 500 m³.

Le procédé de séchage artificiel du bois comprend:

- un traitement préparatoire de préchauffage;
- l'opération de séchage proprement dite,
- un certain nombre de traitements d'amélioration de l'état du bois à la sortie du séchoir (qualité du séchage) - traitements additionnels.

Tout bois soumis au procédé de séchage doit, pour l'obtention d'un bon résultat, remplir les conditions suivantes: uniformité de l'essence (quant à la perméabilité et à la densité); épaisseur et humidité initiale uniforme; sciages provenant tous des mêmes zones des troncs, sans écorces ni tensions internes; température uniforme. Le préchauffage doit être simplement réalisé au climat initial du séchage, avec une augmentation de température de 10 à 15°C. La durée de l'opération devra être fixée à autant d'heures que l'épaisseur en centimètre des planches. Les facteurs pour le choix du régime de séchage sont: épaisseur des sciages, densité du bois, teneur en substances extractives et autres (graisses, huiles), vitesse de circulation de l'air. La température devra être d'autant plus basse et l'humidité relative de l'air d'autant plus considérable que ces facteurs sont plus élevés.

Le bois doit être séché dans les conditions suivantes:

- Le "degré de dessiccation" constant au moins pendant les deux premières phases (le degré de dessiccation est le rapport entre l'humidité des couches superficielles du bois et l'humidité d'équilibre du bois au climat de l'air de séchage);
- Température basse constante au cours des deux premières phases et augmentation de la température pendant la troisième;
- Humidité constante de l'air au cours de la première phase et diminution de l'humidité pendant les phases ultérieures.

Les régimes de séchage appropriés, selon l'espèce ligneuse et selon trois groupes d'épaisseurs, sont représentés aux tableaux nos. 5a et 5 b. Au lieu de fixer les deux températures, on peut fixer leur différence (différence psychrométrique).

Tableau no. 5: Régimes de séchage

A. Facteurs de taux de séchage pour différentes espèces ligneuses.

Groupe	Espèce ligneuse	Température		Facteur du taux de séchage ^{a/}
		initiale (thermomètre sec) (°C)	maximum finale (°C)	
1	Erable, Hêtre, Acajou, Sapelli, Sipo (pour conserver la couleur naturelle)	35	60	2,5-3,5
2	Azobé, Basralocus, Eucalyptus europ. Greenheart, Movingui, Chêne pédonculé, Ramin.	40	60	1,6-1,8
3	Eucalyptus austr., Framiré, Ilomba, Chêne, Ramin, Agnégré	40	65	1,8-2
4	Châtaigner, Hêtre, Frêne, Orme	40	65	2
5	Erable, Charme, Doussié, Ebène afr., Hickory Iroko, Lauan, Pommier, Noyer, Okoumé, Palissandre, Peuplier	50	75	2
6	Bouleau, Pommier, Méranti rouge, Acajou (Afrique et Amérique Centrale), Orme, Padouk, Pin sylvestre, Poirier, Acacia	50	75	2,5
7	Micocoulier, Balsa, Bété, Fromager, Mélèze, Teck, Tilleul	55	75	2,5
8	Sapin Rouge, Cèdre, Framiré, Kokrodua, Méranti blanc, Aulne, Sitka, Tola	60	80	3
9	Sapin blanc et rouge, Abura, Douglas, Hemlock, Obeche, Pitch pine	70	90	3
10	Sapins et pins américains, Obeche	80	95	3,5
11	Pin strobilifère	90	100	3,5-4,5

^{a/} Taux de séchage permissible: Le facteur du taux de séchage spécifie les températures des thermomètres sec et humide dans le séchoir à chaque étape du séchage (voir tableau 5 B)

B: Températures des thermomètres humides et secs pour différents facteurs de taux de séchage

Facteur du taux de séchage	Différence entre le thermomètre sec et humide		
	Première phase ^{a/} (°C)	Seconde phase ^{a/} (°C)	Troisième phase ^{a/} (°C)
1,6	1,5	2 - 5	6 - 20
1,8	2,0	2 - 7	8 - 24
2,0	2,5	3 - 9	10 - 26
2,5	4,0	5 - 13	15 - 28
3,0	6,0	8 - 16	18 - 30
3,5	8,0	10 - 20	25
4,5	11,0	14 - 23	28

a/ Pour la description des phases du séchage voir texte

L'évolution du séchage doit être suivie de la pesée des planches de contrôle, auxquelles nous attribuerons une humidité initiale égale à celle des éprouvettes.

Dans le cas des cellules de grandes dimensions, l'automation du séchage est avantageuse, sur la base de la mesure en continu de l'humidité des planches de contrôle par procédé électrique.

Le déroulage du séchage peut être même planifié dans le temps, lorsqu'on a affaire à l'Epicéa, au Pin ou aux bois tropicaux blancs et lorsque le bois séché ne doit pas obligatoirement être de qualité élevée.

La prévision d'une durée rationnelle du séchage est très malaisée, vu le nombre et la complexité des facteurs simultanés qui influencent son évolution.

Les temps présumés, calculés par n'importe quelle méthode de calcul, doivent être considérés uniquement comme une estimation de principe. En outre, le calcul peut servir à évaluer les moments où les points critiques sont atteints, ainsi qu'à mener à bien le séchage même si tout contact avec l'évolution effective est perdu.

Malgré tout le soin qui aura été accordé à l'opération, il est possible de constater à son terme une humidité plus ou moins grande des sciages et un gradient plus ou moins élevé dans les sections transversales des pièces séchées, avec tension dans la couche interne. Il est donc opportun de soumettre le bois séché à des traitements d'égalisation et de conditionnement.

Seul le traitement d'égalisation est appliqué constamment, afin que l'humidité atteigne à peu près le même niveau dans les différentes planches. Le résultat est atteint par conditionnement d'air, pour atteindre le degré voulu d'humidité finale du bois, avec augmentation simultanée de la température.

Le traitement de conditionnement final vise à égaliser l'humidité à l'intérieur des planches (pour rendre leur gradient éventuel d'humidité moins accentué). Il s'avère particulièrement nécessaire en cas de présence de poches humides (Sapin, Chêne) et de tensions finales. On l'effectue en opérant à l'air très humide et chaud (le climat doit être caractérisé par une humidité supérieure de 3 à 4 p. cent à la moyenne dans le bois).

L'opération a plus de succès si on l'exécute vers le milieu de la troisième phase plutôt qu'à la fin. Elle servira également à stériliser le bois et à éliminer les moisissures éventuellement constatées pendant le séchage.

Le bois soumis au séchage artificiel sera stocké de façon à ne pas être soumis à des variations climatiques saisonnières. Il est particulièrement opportun de stocker, pendant une certaine période après le séchage, les assortiments d'épaisseur considérable destinés à être ultérieurement refendus et débités, car l'élimination des tensions à l'intérieur du séchoir, indispensable en pareil cas, est difficile et coûteuse.

Le bois emmagasiné présentera, avec le temps, une diminution des tensions par suite des lentes déformations plastiques des tissus. Si l'humidité n'est pas trop basse, pour des planches réunies en paquets en contact l'une de l'autre (12 à 14 p. cent), le stockage peut être effectué en magasin fermé à ventilation réglable; si l'humidité, par contre, est faible (6 à 8 p. cent) et

que le bois reste latté tel qu'à sa sortie du séchoir, le magasin doit pouvoir assurer le conditionnement d'air. On obtiendra un meilleur effet de relâchement des tensions dans la pile de planches en contact les unes des autres.

4.2 Séchoir et méthode de séchage à condensation

L'affirmation du séchoir et de la méthode à condensation pour le séchage remonte à une quinzaine d'années, c'est à dire à l'époque où ce procédé a été diffusé en tant que traitement "de stabilisation". Le séchage à condensation fonctionne selon des principes identiques à ceux du séchage traditionnel à rechange partiel d'air. Ici encore, l'agent de dessiccation est une circulation d'air à la pression atmosphérique normale dans la pile de sciages, qui provoque l'évaporation de l'eau de la surface ligneuse, avec échange simultané de chaleur.

Le séchoir est composé d'une cellule recevant le bois latté et d'un appareillage de dessiccation. Ce dernier est constitué à son tour d'une pompe de chaleur, d'un ventilateur de recyclage et d'une batterie additionnelle de chauffage, le tout enfermé dans un bâti en tôle d'acier.

Du point de vue fonctionnel, deux systèmes existent:

- système à recyclage partiel de l'air à travers l'appareillage de dessiccation;
- système à recyclage total de l'air, à travers l'appareillage de dessiccation.

Dans le premier cas, le schéma fonctionnel est le suivant:

- 1) l'air pénètre dans la pile de sciage dans des conditions de sécheresse relative;
- 2) il sort de la pile à une température plus basse et avec un degré plus élevé d'humidité;
- 3) l'air est partiellement aspiré. La partie aspirée traverse l'appareillage de dessiccation, tandis que la partie restante demeure à l'intérieur de la cellule. L'air traversant l'appareillage de séchage est refroidi au point

de rosée, ou à une température encore inférieure. Ceci provoque la condensation de l'humidité du tas dans la mesure nécessaire pour parvenir aux conditions du point 1;

- 4) l'air doit être réchauffé au point d'atteindre dans le mélange, les conditions initiales visées au point 1.

Dans le deuxième cas, c'est à dire en cas de recyclage total de l'air à travers l'appareillage de séchage, l'air est entièrement réchauffé à l'intérieur de cet appareillage, qui le ramène aux conditions initiales.

Le système à recyclage total de l'air à travers la pile présente plusieurs avantages:

- (a) toutes les parties de l'appareillage sont enfermées dans un seul bâti, qui peut être connecté à la cellule sans aucun travail ultérieur de montage;
- (b) tous les organes de commande sont unifiés;
- (c) le réglage du climat est plus rapide et plus efficace.

En outre des températures de séchage plus élevées et un conditionnement d'air plus sûr peuvent être atteints sans aucune installation d'appareillages additifs à l'intérieur de la cellule. Par contre, ce système a un inconvénient: la distribution de l'air à l'intérieur de la pile se révèle beaucoup plus difficile à uniformiser.

L'appareillage de séchage peut être monté à l'intérieur ou à l'extérieur de la cellule.

Le séchoir à condensation a subi, depuis sa naissance, une évolution assez considérable. Il était construit, au début, avec prévision de circulation d'air à très faible vitesse et les températures qu'il permettait d'atteindre ne dépassaient pas 35°C; l'énergie électrique était également consommée pour la batterie additionnelle de chauffage et sans possibilité de conditionnement total. Le séchage était très lent et il était impossible d'atteindre un degré d'humidité inférieur à 25 - 30 p. cent (au-dessous de cette valeur, les temps et les coûts devenaient trop élevés). En résumé, ce séchage ne pouvait être considéré que comme un pré-séchage.

Récemment, l'appareillage de séchage a été modifié en vue d'un conditionnement complet de l'air (par adjonction de gicleurs) et en vue d'opérer à des températures même supérieures à eau chaude ou à vapeur (ce qui peut diminuer sensiblement le coût de fonctionnement); la vitesse de circulation de l'air peut être programmée selon les nécessités du séchage. En outre, dans la batterie à plusieurs cellules, la chaleur dégagée par le condensateur supplémentaire peut être récupérée au cours du fonctionnement alternatif pour chauffer d'autres cellules.

Ces perfectionnements ont pratiquement rapproché le séchoir à condensation des conditions fonctionnelles du séchoir traditionnel et d'une possibilité d'application universelle. En général, son meilleur domaine d'application est pour les bois durs, notamment lorsqu'il est possible d'obtenir des fournitures d'énergie à bas prix. Tout dernièrement, la pompe de chaleur a été également proposée pour le préchauffage, en utilisant la chaleur de l'air extérieur.

Le séchoir à condensation avec pompe de chaleur s'est révélé exceptionnellement efficace du point de vue énergétique (consommations totales de l'ordre de 0,5 à 1,5 kWh par kg d'eau).

Il y a lieu de prévoir dans ce secteur une évolution ultérieure favorable, notamment en ce qui concerne les températures.

4.3 Séchoir et méthode de séchage sous vide

La méthode de séchage sous vide remonte à une douzaine d'années, c'est-à-dire à l'entrée en service des premiers séchoirs sous vide, avec chauffage à plaques.

L'intérêt porté au séchage sous vide et les recherches dans ce domaine sont d'ancienne date; leur point de départ a été la considération de deux caractéristiques:

- 1) augmentation de la vitesse de mouvement de l'humidité dans le bois en fonction de la diminution de pression;
- 2) diminution, toujours en fonction de la réduction de la pression, de la température d'ébullition de l'eau.

Cet ensemble de circonstances a pour résultat des durées d'opération exceptionnellement brèves et un séchage qualitativement élevée, notamment en ce qui concerne la distribution uniforme de l'humidité dans le bois.

Le système de séchage sous vide initialement appliqué en Italie consistait dans la répétition des cycles de trois phases mentionnées ci-dessous:

- 1) chauffage par contact à l'aide de plaques à eau chaude;
- 2) refroidissement superficiel du bois;
- 3) pompage sous vide jusqu'à 20 - 40 mm Hg, avec condensation dans le circuit de la pompe à vide muni de condenseur (condensation se produisant aussi, en partie, sur la paroi interne de l'autoclave).

Les expériences poursuivies pendant plusieurs années ont prouvé que le chauffage à contact peut assurer un séchage à un rythme presque continu. Le procédé en question a été basé sur des cycles biphasés (une phase de pompage à vide et une d'arrêt du pompage). Le chauffage est toutefois continu.

Un appareillage qui a été construit récemment fonctionne à dépression continue et la condensation de la vapeur a lieu à l'intérieur du cylindre sur la batterie de réfrigération à l'eau.

Un étape ultérieure d'évolution a été l'introduction du chauffage à convection par conditionnement d'air à recyclage forcé. La paroi de l'autoclave, chauffée par eau chaude (ou vapeur) introduite dans la double paroi créée par un autre cylindre entourant l'extérieur de l'autoclave, sert de batterie de chauffage de l'air. L'humidification de l'air est assurée par giclage de vapeur d'eau. Les cycles sont à deux phases:

- 1) chauffage à recyclage d'air assuré par des ventilateurs latéraux;
- 2) pompage à vide, au cours duquel l'évaporation a lieu.

La vapeur qui se mélange dans la pompe au liquide de pompage se condense dans un échangeur de chaleur, puis le condensat se sépare du liquide. Cet échangeur a également fourni au constructeur la solution pour récupérer la chaleur de condensation, qui sert à chauffer l'eau du circuit de chauffage.

Il a été reconnu que dans une batterie à deux cylindres fonctionnant alternativement, la chaleur récupérée suffit à chauffer le bois, de sorte qu'après le premier chauffage la chaudière peut être exclue du circuit de chauffage du séchoir.

Ce nouveau type de séchoir doit être très bien isolé thermiquement.

Ce nouveau système a une caractéristique importante: celle de chauffer à des températures supérieures à 100°C , le mélange vapeur/liquide de pompage atteignant jusqu'à 140°C .

Le système de séchage sous vide par chauffage à convection allié à la qualité élevée des bois obtenue - qui s'exprime par l'absence de tout gradient d'humidité à la fin du séchage des bois durs (même pour de grandes épaisseurs) exempts de toute occlusion des vaisseaux par les thylles - l'exécution de traitements terminaux permettant l'amélioration de l'état même des bois dont les thylles obstruent les vaisseaux. Le chauffage peut être effectué à l'air conditionné. Les opérations de transport, de chargement et de déchargement sont simplifiées et les frais d'entretien des plaques sont entièrement éliminés. La réduction des temps totaux de séchage est à noter, même si les phases de chauffage sont prolongées. La versatilité d'un pareil système est de ce fait considérablement accrue, et s'étend à la quasi-totalité des cas susceptibles de se présenter. Le rendement énergétique est également exceptionnel, compte tenu de la récupération de chaleur dérivant de l'introduction de l'échangeur (récupération qui peut être à peu près totale, comme dans la pompe de chaleur).

5. Automatisation de la conduite du séchage.

L'effort d'automatiser la conduite du séchage artificiel, récemment expérimentée et réalisée, part d'un des trois systèmes servant à enregistrer la variation de l'état du bois dans la cellule:

- 1) pesée de la pile entière de bois par application des "cellules de charge" (load cells);
- 2) mesure du retrait de la pile de bois;
- 3) mesure en continu de l'humidité du bois et du climat par l'intermédiaire d'une résistance (conductance électrique).

Dans la pratique industrielle, le troisième système est le plus répandu du fait qu'il est plus flexible bien que moins précis que les deux premiers. Un ordinateur commande les organes de pilotage selon des programmes de séchage mémorisés ou dictés en mémoire au fur et à mesure. Le développement de la méthode a suivi pas à pas celui des systèmes électroniques computerisés, avec diminution graduelle de la rigidité du système, qui provoque des pertes de temps et d'énergie. Aujourd'hui le problème de la rigidité et de l'incertitude de la mesure de l'humidité du bois au-dessus du point de saturation des parois cellulaires est abordé par l'intermédiaire des microprocesseurs. On a également introduit le système à terminal vidéo qui permet une mémorisation du programme voulu et fournit en outre une information considérable.

Cette automatisation de l'exécution du processus de séchage présente toutefois deux défauts d'origine: la limitation du champ de mesure au point de saturation des parois cellulaires et l'incertitude de la mesure en présence de sels. On s'efforce d'éliminer également ces problèmes par l'apport technique des microordinateurs, mais il faut malgré tout en tenir compte.

Dans le séchoir traditionnel, nous avons pu également identifier des problèmes se rattachant à l'automatisation, notamment:

- l'automatisation retarde souvent la phase de pré-chauffage, surtout si une quantité suffisante de vapeur pour l'humidification de l'air n'est pas disponible.
- La mise à régime du conditionnement à la fin du séchage, telle que l'opère la marche automatique actuellement introduite, n'est pas fondée sur une base technologique. Le régime de cette opération est à mi-chemin entre l'égalisation et le conditionnement et - pis encore - elle est temporisée.
- Souvent les sondes qui doivent être introduites dans les sciages ne parviennent pas à mesurer l'humidité moyenne du bois, et dans les bois tropicaux contenant des sels, elle indiquent des humidités trop élevées, résultant en une prolongation ultérieure du temps de séchage.

- Les fiches électroniques imprimées sont détériorées par l'usage et les instruments perdent souvent leur étalonnage d'origine.

Il a été confirmé que l'automatisation ne remplace pas l'homme et n'élimine aucunement la nécessité de ses interventions. Elle constitue un précieux auxiliaire, qui a énormément accru la sûreté opérationnelle, surtout pour maintenir un climat constant. Les déterminations initiales et finales de l'humidité pour les tensions et la détermination du gradient d'humidité dans le bois demeurent des conditions fondamentales de la valeur qualitative des opérations. Les équipements automatiques doivent être continuellement contrôlés et comparés avec les étalons, mais il faut en tout cas reconstruire cela au moyen de sciages de contrôle si l'on veut avoir une certaine sécurité d'opération. Dans ces conditions, il y a lieu d'approuver les réserves avancées par les producteurs italiens vis-à-vis de l'automatisation totale. Les constructeurs de séchoirs et d'appareillages automatiques devraient faire preuve de plus de responsabilité dans de leur publicité, car il est inadmissible d'entendre proclamer que le service des séchoirs peut se dérouler parfaitement, sans aucune assistance de techniciens qualifiés, vu la disponibilité d'appareillages automatiques pour ce genre d'opérations.

6. Problèmes de choix du séchoir.

Aucune règle générale ne saurait être prescrite pour le choix d'un séchoir, mais il faut baser cette décision sur des conditions effectives, notamment sous l'angle de l'économie et de la capacité. Il y a surtout lieu d'étudier le rapport entre les coûts respectifs de l'énergie mécanique et de l'énergie calorifique.

Les conseils que l'auteur exprime ci-dessous sont tirés de sa propre expérience, mais ils sont valables si certaines conditions sont considérées, à savoir le coût très modique de l'énergie calorifique produite par les déchets de bois et le coût élevé de l'énergie électrique: les rapports entre le premier et le second vont de 1:5 à 1:20 en Italie (voir tableau no. 6 à la page suivante).

En ce qui concerne le coût du séchoir, à capacité égale de remplissage, le séchoir à condensation occupe la première place. Suit le séchoir classique,

et le séchoir sous vide vient en dernier lieu vu son prix plus élevé. Vu sous l'angle de la capacité productive, la classification est dans l'ordre inverse.

Pour ce qui est des coûts de séchage de tous les bois perméables (c'est à dire dont les vaisseaux ne sont pas occlus par les thylles), la première place doit être accordée sans doute au séchoir sous vide; le séchoir à condensation peut être avantageusement employé pour les bois durs peu perméables, le séchoir classique pour les bois tendres (conifères et feuillus légers).

Pour une grande capacité de séchage, le séchoir à condensation ou le séchoir classique est préférable.

Pour la vitesse de séchage, nous citerons en premier lieu le séchoir sous vide, suivi, dans l'ordre, du séchoir classique et du séchoir à condensation.

Tableau no. 6: Tableau de comparaison entre les systèmes de séchage des sciés, avec score progressif.

Caractéristique	Système		
	I	II	III
Investissement financier	2	3	1
Montage	1	3	2
Entretien	2	3	1
Universalité	3	2	2
Souplesse capacitive	3	3	..
Pour les espèces ligneuses:			
- latifoliées (vaisseaux occlus par les thylles)	1	3	2
- latifoliées (vaisseaux non occlus, dures)	1	2	3
- latifoliées (vaisseaux non occlus, tendres)	2	1	3
- Conifères	3	1	1
Vitesse de séchage	2	1	3
Qualité du séchage	2	1	3
Suintement d'huiles ou de résines	2	3	1
Altérations chromatiques	1	3	2
Stérilisations, moisissures	2	1	3
Egalisation	3	2	3
Conditionnement	3	1	3

NOTES:

1 est le moins élevé; 3 est le plus élevé

Ce tableau est valable pour les produits standard: I. Séchoir "classique"; II Séchoir "à condensation"; III. Séchoire "sous vide"

Ce dernier rivalise toutefois, à égalité de vitesse, avec le séchoir classique lorsqu'il s'agit de bois peu perméables, car il y a lieu d'appliquer des températures relativement basses dans les deux cas.

Le séchoir sous vide se révèle être le plus avantageux du point de vue de la qualité du séchage. En cette matière, séchoir à condensation et séchoir classique sont théoriquement au même rang. Dans le cas des bois durs, le séchoir à condensation est pratiquement le plus sûr en fait d'exploitation, car il opère à des températures relativement peu élevées.

Si l'extrême variété des bois à sécher est considérée, le séchoir classique est le plus universel, du fait de son adaptabilité; suivent, par ordre descendant, le séchoir sous vide et le séchoir à condensation.

L'installation du séchoir à condensation est la plus simple: elle n'a même pas besoin d'une chaudière. Le séchoir sous vide est au deuxième rang, suivi du séchoir classique (l'un et l'autre exigent une chaudière dans leur exécution standard).

Le réglage du climat est plus sûr dans le séchoir à condensation, une fois le conditionnement achevé; cela surtout pendant les mois d'été, caractérisés par une température et une humidité de l'air extérieur élevées.

Le suintement d'huiles et de résines à la surface du bois se manifeste surtout en cas d'emploi du séchoir sous vide, le moins dans le cas du séchoir à condensation; le séchoir classique est de ce point de vue, à placer entre les deux.

La meilleure stérilisation du bois et la meilleure protection contre les moisissures sont obtenues par le séchoir sous vide; de ce point de vue, le séchoir à condensation est le moins efficace. Du point de vue écologique, autrement dit en matière de pollution de l'environnement, la première place revient au séchoir à condensation, la dernière au séchoir classique.

Le séchoir à condensation est celui qui exige le moins de réparations et son entretien est le plus aisé; le contraire se produit dans le cas du séchoir sous vide.

Lors de l'étude d'un projet d'installation de séchage, la première étape consiste dans le calcul de la capacité et des coûts économiques pour le cas concret de la production programmée (quantité, rapport entre essences et assortiments, humidité initiale et finale du bois, qualité de séchage requises) de différents systèmes de séchage, ainsi que dans le choix du système de séchoir. L'orientation rationnelle d'une fabrique vise toujours l'adoption d'un système unique de séchage. Les dimensions de la cellule doivent être réglées selon les capacités journalières du cycle de production, le système de transport, les dimensions du bois et du paquet (pile). Les transports et les passages exigeant des inversions de la direction ou une réfection des tas doivent être rigoureusement exclus.

Au cas où il faut sécher des volumes importants de bois - surtout de bois durs - il est opportun d'ajouter un petit séchoir utilisant un système analogue, afin d'effectuer des essais préliminaires pour établir rationnellement le régime de fonctionnement.

Les données fournies par les constructeurs et par les organismes de recherche sont disponibles aux fins des calculs économiques et des calculs de capacité. Les tableaux 7 et 8 ci-dessous exposent les données d'orientation sur les temps de séchage fournis par les producteurs de séchoirs.

**Tableau no. 7 Temps (présumés, à titre d'orientation) de séchage (en heures)
pour obtenir une humidité finale de 10% (séchoir sous vide).**

Humidité initiale du bois	80%				40%			
Epaisseurs (en mm)	30	50	70	90	30	50	70	90
Espèce	Temps (h)				Temps % (h)			
Chêne, Châtaignier, Lauan rouge et autres bois imperméables	230	350	--	--	120	170	210	240
Hêtre, Noyer, Charme, Cerisier, Sipo, Acajou africain	110	138	182	218	57	75	104	130
Frêne, Erable, Afrormosia Bété, Lauan blanc	46	122	158	194	48	70	96	122
Sapins, Douglas, Pins, Mélèze, Obèche	67	82	108	132	37	53	73	92

Note: Les temps de préchauffage ne sont pas compris.

Tableau no. 8: Temps (indiqués à titre d'orientation) de séchage par condensation au cours des journées de travail continu.

Humidité du bois en pourcentage	Initiale	80%				40%			
	Finale	12%				12%			
Epaisseurs (en mm)		30	50	70	100	30	50	70	100
Sapin, Cèdre, Cyprès, Douglas, Mélèze, Pin, Pitch-pine, Bouleau, Charme, Mûrier, Yeuse, Orme champêtre, Aulne, Peuplier, Saule, Tilleul, Jelutorg, Light red Meranti Sepetir, Seraya, Terentong		8-10				4-5			
			12-15				7-9		
				16-18				12-14	
					21-23				14-16
Fromager, Balsa, Dibétou, Obeche (Samba, Ayous)		8-10		18-20		4-5		12-14	
			12-15		21-29		7-9		14-16
Châtaignier, Cerisier, Hêtre, Frêne, Pommier, Noyer, Orme monta- gnard, Dark red Meranti, Mengkulang, Kauri, Kempas, Keruing, Ramin, Teck, Nyatch, Kalam, Abura, Bossé, Aiélé, Framiré, Limba, Sipo, Niangon, Paçouk, Mécrusse, Tiama, Acajou, Sapelli, Bété		10-12				6-7			
			13-16				8-11		
				20-22				14-16	
					23-15				16-18
Erable, Chêne chevelu, Eucalyptus, Acacia, Poirier, Olivier, Balau, Lauan, Kérani, Merawan, Ebène, Bété, Iroko, Pau Amarello, Palissan- dre, Ramin, Santal, Afrormosia, Teck, Aniégré, Doussié		12-13				8-9			
			15-18				10-12		
				22-25				16-18	
					26-28				18-20

