

ETUDE EXPERIMENTALE DU TRANSFERT SIMULTANE DE CHALEUR ET DE MASSE AU COURS DU SECHAGE PAR CONTACT SOUS VIDE D'UN BOIS RESINEUX

C. MOYNE et M. MARTIN

Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée ENSMIM, Parc de Saurupt, 54042 Nancy Cedex, France

(Reçu le 23 février 1982 et sous forme modifiée le 21 avril 1982)

Résumé—On présente une étude expérimentale du transfert couplé de chaleur et de masse lors du séchage sous vide par contact d'un bois résineux.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence l'accélération du processus de séchage liée à l'existence d'un mouvement convectif induit par un gradient de pression totale en phase gazeuse aux fortes teneurs en eau libre.

L'analyse des profils de température et d'humidité permet de distinguer en dehors de la période d'établissement du régime thermique trois phases pour le séchage:

1^{ère} phase: la température du matériau n'évolue pas dans le temps mais cependant la vitesse de séchage décroît constamment.

2^{ème} phase: la température du matériau croît rapidement.

3^{ème} phase: l'équilibre hydrique est atteint asymptotiquement.

Les résultats précédents permettent de proposer un mécanisme de migration de l'humidité lors du séchage d'un bois résineux.

NOMENCLATURE

a_m ,	coefficient de diffusion massique;
c ,	capacité calorifique;
K_p ,	perméabilité intrinsèque en phase liquide;
K_g ,	perméabilité intrinsèque en phase gazeuse;
L_v ,	chaleur latente de vaporisation;
P_v ,	pression de vapeur;
p_{v_s} ,	pression de vapeur saturante;
P ,	pression totale;
q_m ,	densité de flux massique;
t ,	temps;
T ,	température;
T_c ,	température du condenseur;
T_p ,	température de la plaque chauffante;
u ,	taux d'humidité;
\bar{u} ,	taux d'humidité moyen d'un échantillon;
u_a ,	fraction massique de la phase gazeuse inerte (air) contenue dans les pores par rapport à la masse anhydre du matériau;
u_v ,	fraction massique de la phase vapeur contenue dans les pores par rapport à la masse anhydre du matériau;
V_x ,	vitesse du courant d'air extérieur;
V_s ,	vitesse de séchage;
x ,	coordonnée d'espace dans l'épaisseur;
z ,	coordonnée d'espace dans la longueur.

Lettres grecques

ϵ ,	taux de changement de phase;
δ ,	coefficient de thermomigration;
λ ,	conductivité thermique;
ν_g ,	viscosité cinématique de la phase gazeuse;
ν_l ,	viscosité cinématique de l'eau;
ρ_0 ,	masse volumique anhydre du matériau;
ψ ,	humidité relative de l'air.

I. INTRODUCTION

LE SECHAGE est un problème d'une grande actualité du fait des quantités d'énergie qu'il met en jeu, surtout lorsqu'il s'effectue quasi exclusivement par voie thermique comme dans le cas du bois.

C'est également un problème difficile parce qu'il a pour objet des matériaux peu 'classiques' présentant des difficultés dont d'ordinaire le mécanicien cherche à s'affranchir mais qui ici font partie intégrante du problème. Par exemple, la détermination de coefficients de 'diffusion' dans un matériau tel que le bois [1-3] est un travail très délicat du fait d'une part des influences de la température et de l'humidité et d'autre part de la grande variabilité du produit ne donnant de sens à la mesure que pour un échantillon bien défini et rendant toute généralisation très difficile. Aussi, il apparaît nécessaire d'évoquer préalablement les propriétés du matériau bois dans le but d'illustrer ces propos avant d'aborder la partie séchage proprement dite.

On exposera ensuite les résultats relatifs au cas du séchage sous vide par contact d'un bois résineux. Les conditions spécifiques de fonctionnement qui ont été choisies: pression à l'intérieur de l'enceinte P ($7,3 < P < 66,6 \text{ kPa}$) et température du plateau chauffant ($40^\circ\text{C} < T_p < 80^\circ\text{C}$) sont proches de celles rencontrées dans l'industrie du bois où les procédés de séchage sous vide se développent depuis quelques années [4].

L'expérimentation est conduite dans le but: de dégager l'influence conjuguée de la pression de l'enceinte et de la température du produit sur l'accélération du processus de séchage, d'analyser les évolutions de la température et du taux d'humidité dans le temps et dans l'espace afin de distinguer les diverses phases du séchage et enfin de proposer un mécanisme de migration de l'humidité au cours du séchage.

2. LE MATERIAU BOIS

Examinons brièvement les difficultés particulières que pose le matériau bois à l'analyse [5]:

C'est un matériau anisotrope que l'on peut en première approximation considérer comme orthotrope: il faut distinguer entre directions longitudinale (sens du fil), radiale et tangentielle. Le Tableau 1 montre que pour un résineux, cette anisotropie toujours très marquée est différente selon les propriétés:

C'est un matériau hétérogène à tous les niveaux de description. La simple observation à l'oeil nu d'une section transversale permet de distinguer: l'aubier du duramen, les différents cernes annuels et même à l'intérieur de chaque cerne le bois initial du bois final. L'examen des parois cellulaires au microscope révèle également une structure de couche aux propriétés très différentes.

C'est un matériau hygroscopique. Le point pour lequel les parois cellulaires sont saturées alors qu'il n'y a pas d'eau dans la structure capillaire grossière du matériau est appelé 'point de saturation des fibres'. Il correspond à un taux d'humidité moyen du matériau voisin de 30%.

C'est un matériau 'vivant' naturellement adapté à la circulation des fluides. Le mécanisme de montée de la sève ayant lieu sous l'action de forces capillaires, il faut pouvoir éviter toute rupture de la colonne liquide ou toute embolie qui détruirait irrémédiablement le matériau. Aussi, chez les résineux, les cellules communiquent généralement entre elles par des passages en forme d'aréole appelés ponctuations et dont la partie centrale (ou chambre) est occupée par une membrane, le torus qui peut se déplacer sous l'action d'un gradient de pression pour obturer le passage. Un tel mécanisme nécessaire à la survie de l'arbre joue également durant le séchage et explique en particulier que la perméabilité d'un bois sec ne représente que 1 à 3% de celle d'un bois vert [6].

3. LES MECANISMES DE MIGRATION DE L'HUMIDITE A L'INTERIEUR DU BOIS

Du fait du caractère hygroscopique du matériau bois, il faut distinguer entre le domaine hygroscopique et le domaine de l'eau libre.

Dans le domaine hygroscopique, de nombreux travaux ont étudié le mécanisme de migration de l'humidité. D'après Stamm [7, 8] le mouvement de l'eau liée est un mécanisme combiné de migration de l'eau à

travers les parois cellulaires—qui est le phénomène limitant du point de vue cinétique—and d'une diffusion de vapeur dans les lumières des cellules qui peut être considérée comme une diffusion de Fick de vapeur d'eau dans l'air ou en régime de Knudsen dans les pores des ponctuations.

Pour être plus précis si l'on définit le nombre de Knudsen Kn comme le rapport: libre parcours moyen des molécules/dimension caractéristique des passages, deux cas sont à envisager:

Dans les lumières des cellules Kn est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-3}$ à la pression $P = 100 \text{ kPa}$ et $5 \cdot 10^{-2}$ à $P = 7,3 \text{ kPa}$. Ce qui justifie l'utilisation d'un modèle de Fick.

Dans les pores des ponctuations, les valeurs de Kn justifient l'existence d'un régime de Knudsen puisque Kn vaut 2 pour $P = 100 \text{ kPa}$ et 20 pour $p = 7,3 \text{ kPa}$.

Le mécanisme de migration de l'humidité à l'intérieur des parois cellulaires est un problème très discuté. De nombreux auteurs ont assimilé ce mécanisme à une simple diffusion de Fick où le potentiel pour le transfert serait le taux d'humidité. Stamm [9] a alors montré que dans ces conditions, l'énergie d'activation du processus était légèrement inférieure à l'enthalpie nécessaire à la vaporisation de l'eau, c'est-à-dire à la somme de la chaleur différentielle de sorption et de la chaleur latente de vaporisation. Suite à ces travaux, Bramhall [10] propose d'utiliser la pression de vapeur d'équilibre comme potentiel pour le transfert, le coefficient de diffusion devant alors être indépendant de la température. La démarche classique de la thermodynamique des processus irréversibles conduit plus rigoureusement à utiliser le potentiel chimique de la vapeur $\mu = \mu^\circ(T) + RT \ln(p_v/p_{v_0})$ comme potentiel pour le transfert [11, 12].

Pour le mouvement de l'humidité dans le domaine de l'eau libre, par exemple pour un séchage convectif classique à pression atmosphérique et température nettement inférieure au point d'ébullition de l'eau, le mécanisme essentiel de la migration est la capillarité. La validité d'une telle analyse au moyen d'une description de type Luikov [13, 14] a été démontrée dans le cas d'un matériau inerte par Crausse, Bacon et Bories [15]. D'après Comstock [16], les écoulements de fluide à l'intérieur du bois peuvent être décrits en première approximation au moyen d'une loi de type Darcy. L'essentiel de la résistance au transfert se situe au passage des ponctuations entre les fibres. C'est ce qui explique en fonction de l'anatomie du matériau la forte anisotropie de la perméabilité intrinsèque.

Cependant, dans les cas, soit d'un séchage convectif à haute température [17], soit d'un séchage avec abaissement de la pression extérieure, peut se développer à l'intérieur du solide un gradient de pression totale en phase gazeuse qui induit alors un flux liquide ou gazeux pouvant contribuer de façon importante au transfert total [18].

Parmi les rares études sur le séchage sous vide, il faut cependant signaler l'analyse de Krischer [19] sur le séchage sous vide de matériaux inertes non hygroscopiques.

Tableau 1.

Rapport $\left(\frac{\text{coefficent transversal}}{\text{coefficent longitudinal}} \right)$	
Conductivité thermique	1/2,5
Coefficient de migration dans le domaine hygroscopique	1/2,5
Perméabilité intrinsèque (bois à l'état vert)	1/20 000

piques en l'occurrence des billes de verre. Celui-ci distingue :

Le séchage par évaporation

La température du générateur de chaleur est inférieure à la température de vaporisation de l'eau à la pression correspondante. Le phénomène limitant du point de vue de la cinétique du processus est essentiellement la migration de l'humidité. Ceci est le cas typique d'un séchage convectif à des températures inférieures au point d'ébullition de l'eau.

Le séchage par vaporisation

La température du générateur de chaleur est nettement supérieure à la température de vaporisation de l'eau. Le phénomène limitant est alors le transfert thermique. La température du niveau humide est peu différente de la température de vaporisation à la pression de l'enceinte. Le passage du front d'évaporation en un point se traduit par une brusque augmentation de la température qui commence toujours du côté de l'apport de chaleur qu'il s'agisse de séchage par contact ou par rayonnement.

4. LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'installation expérimentale représentée sur la Fig. 1 se compose d'une enceinte cylindrique horizontale de 800 mm de longueur dans laquelle la pression absolue peut être ajustée à une valeur de consigne comprise entre 7,3 et 66,6 kPa. Le 'vide' est créé par une pompe à anneau liquide et réglé à l'aide d'un manovacuomètre. A l'intérieur de l'enceinte est disposé un plateau chauffant maintenu à température constante T_p dans le temps et dans l'espace par une circulation d'eau issue d'un bain thermostatique. La planche ou les échantillons à sécher reposent librement sur le plateau de sorte que le transfert de chaleur s'effectue par simple contact. La face supérieure de la planche échange librement avec l'atmosphère de l'enceinte. De plus, l'enceinte est pourvue d'un condenseur à température de surface imposée T_c qui permet de fixer la valeur de la pression de vapeur à l'intérieur de l'enceinte.

Les méthodes expérimentales utilisées sont classiques : microthermocouples pour les mesures de température, découpage, pesée avant et après dessication complète pour les mesures locales d'humidité.

Enfin, le matériau utilisé est un résineux *Abies Alba* communément appelé sapin noir des Vosges.

L'expérimentation a été conduite avec des planches de 27 mm d'épaisseur, de 200 mm de largeur soit sous forme de 'planches complètes' de 700 mm de longueur, soit d'échantillons de 50 mm de longueur.

Le détail de l'installation et des procédés de mesure sont exposés dans la référence [20].

5. LES COURBES DE SECHAGE

Examinons d'abord les courbes de séchage d'au bier de pin obtenues par Kollmann et Schneider [21] dans le cas d'un séchage convectif classique à température inférieure au point d'ébullition de l'eau (Fig. 2). Celles-ci sont représentées dans le plan taux d'humidité moyen \bar{u} , vitesse de séchage V_s (c'est-à-dire perte massique d'humidité de matériau ramenée à sa masse anhydre) pour différentes vitesses du courant d'air extérieur V_x .

L'expérience relatée met en évidence les trois phases décrites par Krischer pour le séchage par convection forcée de matériaux hygroscopiques sous des conditions extérieures constantes [19].

1^{ère} phase

Après une courte période d'établissement du régime thermique et tant que l'humidité en surface est supérieure au point de saturation des fibres, la surface prend une température d'équilibre voisine de la température de thermomètre humide. La pression de vapeur qui règne à la surface est alors la pression de vapeur saturante et la vitesse de séchage reste constante. Les couches limites thermique et massique sont les seuls obstacles au transfert. Les paramètres de l'écoulement extérieur et notamment la vitesse du courant d'air gouvernent le processus qui est alors régi par les lois de l'aérothermique. Notons cependant que dans le cas d'un séchage à conditions extérieures sévères, température élevée et/ou faible humidité d'équilibre hygroscopique, cette phase n'est pas toujours observable.

2^{ème} phase

Elle commence lorsque l'humidité en surface passe en-dessous du point de saturation des fibres. La pression de vapeur en surface est alors réduite par rapport à la pression de vapeur saturante suivant l'isotherme de sorption. La zone contenant l'eau libre s'enfonce à l'intérieur du matériau. La vitesse de séchage décroît. Le séchage dépend de plus en plus des propriétés physiques de la matière ainsi que le mon-

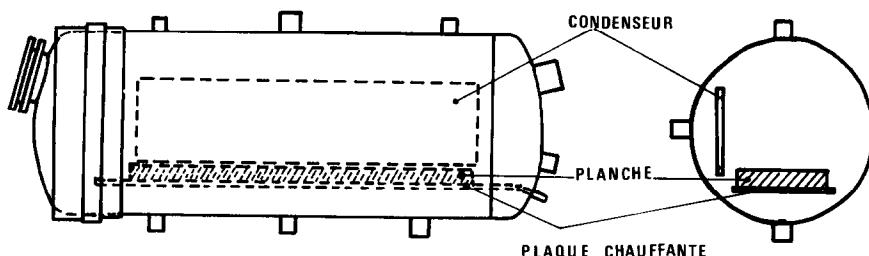


FIG. 1. Enceinte à vide et dispositif expérimental.

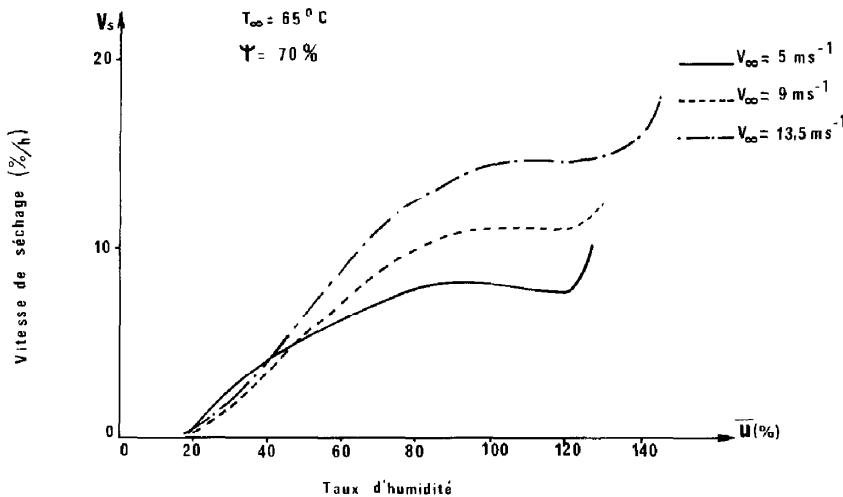


FIG. 2. Courbe de séchage convectif d'après Kollmann et Schneider.

trent les courbes de la Fig. 2 qui tendent à se rapprocher.

3ème phase

Krischer distingue une troisième période où tout le matériau étant dans le domaine hygroscopique la vitesse de séchage tend asymptotiquement vers zéro.

La Fig. 3 représente les courbes de séchage sous vide obtenues sur une 'planche complète' dans l'installation expérimentale précédemment décrite. Au contraire de ce qui se passe pour un séchage convectif à conditions extérieures constantes, la vitesse de séchage est constamment décroissante en fonction du taux d'humidité. D'autre part, les courbes présentent un point d'inflexion au voisinage de $\bar{u} = 50\%$ indiquant un changement de régime pour la migration de l'humidité.

On observe une nette différence entre les courbes de séchage relatives à 66,6; 26,7 et 7,3 kPa. Lorsque la pression de l'enceinte varie de 26,7 à 7,3 kPa, la vitesse de séchage est accrue de 70% aux fortes teneurs en eau libre mais en revanche, son accroissement est inférieur à 10% si elle passe de 66,6 à 26,7 kPa.

Or, la pression totale qui règne dans la phase gazeuse à l'intérieur du matériau est la somme de la pression de la phase gazeuse inerte enfermée dans les pores—qui en la supposant immobile varierait proportionnellement à la température absolue T conformément à la loi des gaz parfaits—and de la pression de vapeur qui, hors du domaine hygroscopique, doit être égale à la pression de vapeur saturante. D'après les tables de vapeur saturante, on a :

$$p_v(40^\circ\text{C}) = 7,3 \text{ kPa},$$

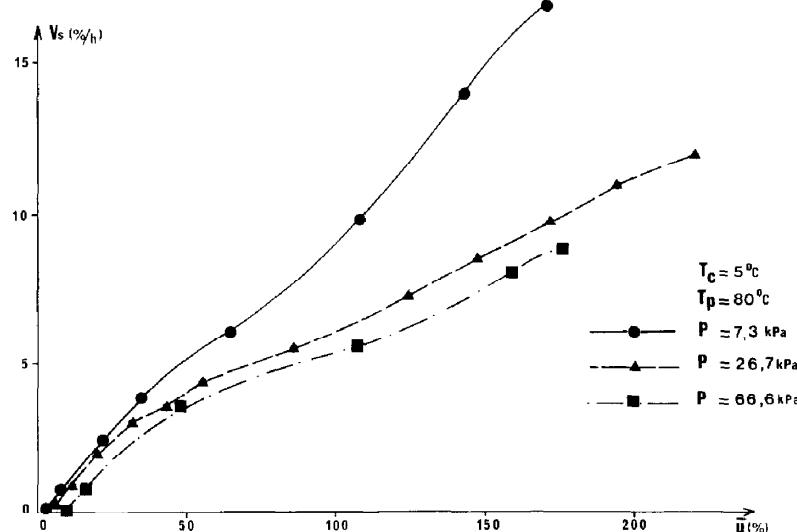


FIG. 3. Courbes de séchage par contact sous vide d'une planche complète.

$$p_v(60^\circ\text{C}) = 20,0 \text{ kPa},$$

$$p_v(80^\circ\text{C}) = 47,3 \text{ kPa}.$$

L'action conjointe de l'abaissement de la pression extérieure et de l'élévation de la température permet d'atteindre à l'intérieur du matériau une pression totale en phase gazeuse nettement supérieure à la pression extérieure c'est-à-dire ici la pression réduite régnant dans l'enceinte. Les valeurs précédentes de la pression de vapeur montrent que dans les conditions $T_p = 80^\circ\text{C}$; $P = 7,3 \text{ kPa}$, un tel phénomène peut se produire sur une épaisseur importante du matériau près de la plaque chauffante tandis que dans le cas $T_p = 80^\circ\text{C}$; $P = 26,7 \text{ kPa}$, seule la zone très proche de la plaque aura une température suffisante pour que ce phénomène se produise. Il ne pourra jamais exister dans le cas $T_p = 80^\circ\text{C}$ et $P = 66,6 \text{ kPa}$.

De là peut en résulter tant pour la phase liquide que pour la phase gazeuse, un mouvement convectif régi par une loi type loi de Darcy. Ce terme supplémentaire qui s'ajoute aux termes classiques de transfert entraîne une accélération du processus. La densité de flux massique s'écrit finalement :

$$\mathbf{q}_m = -\rho_0 a_m (\nabla \mathbf{u} + \delta \nabla \mathbf{T}) - \left(\frac{K_1}{v_1} + \frac{K_g}{v_g} \cdot \frac{u_v}{u_a + u_v} \right) \nabla \mathbf{P}$$

Du fait du rapport des viscosités cinématiques du liquide et de la vapeur cette accélération du transfert se fera essentiellement sous forme liquide.

De manière à préciser les mécanismes, nous avons procédé à des mesures locales de température et d'humidité d'abord sur des planches de longueur 700 mm, puis sur des échantillons de longueur 50 mm, la technique de mesure de l'humidité étant destructive et donc nécessitant un grand nombre d'échantillons. Sauf mention contraire, tous les résultats présentés ci-dessous auront trait au cas $T_p = 80^\circ\text{C}$; $P = 7,3 \text{ kPa}$.

6. EXPERIMENTATION AVEC UNE PLANCHE COMPLETE

L'expérimentation avec une planche complète permet de constater qu'à l'exception des effets de bord, l'on n'observe pas de gradients d'humidité et de température dans la longueur de l'échantillon.

L'absence de gradient d'humidité dans la longueur d'une planche complète s'explique pour les fortes teneurs en eau libre par la migration très facile de l'humidité essentiellement sous forme liquide dans le sens longitudinal du fait d'un rapport perméabilité intrinsèque longitudinale/perméabilité intrinsèque transversale voisin de 1/20 000 pour le bois saturé.

Au contraire dans le domaine hygroscopique où l'on montre que la migration de l'eau peut être décrite en bonne approximation par une loi de diffusion relative au taux d'humidité, le rapport coefficient de diffusion longitudinal/coefficient de diffusion transversal est de l'ordre de 2,5. Aussi du fait du rapport longueur de la planche/épaisseur de la planche voisin de 1/25 la migration doit prendre essentiellement place dans l'épaisseur de l'échantillon.

De même pour la transfert de chaleur, la structure en forme de cellules allongées longitudinalement explique une conductivité thermique longitudinale 2,5 fois supérieure à la conductivité thermique transversale. Le même raisonnement conduit pour la migration de l'humidité dans le domaine hygroscopique entraîne un transport de chaleur quasi-monodimensionnel dans l'épaisseur de la planche.

Mais la prise en compte du terme de changement de phase dans l'équation de la chaleur peut modifier les conclusions précédentes. Aux fortes teneurs en eau libre, la migration longitudinale est surtout liquide ; le terme de changement de phase influe peu sur la distribution longitudinale de température et l'on peut observer que les profils de température dans l'épaisseur de la planche, pour différentes positions dans la longueur de celle-ci, sont réductibles à une courbe unique.

Suit une période durant laquelle les différents profils ne sont plus réductibles à une courbe unique traduisant ainsi un phénomène complexe du transfert par conduction et évaporation couplés.

Enfin, quand tout le matériau est dans le domaine hygroscopique, le transfert d'humidité devient alors monodimensionnel dans l'épaisseur et les différents profils tendent à nouveau vers un profil unique.

7. EXPERIMENTATION SUR ECHANTILLONS

7.1. Courbes de séchage

De façon à préciser les résultats précédents, il a été procédé à une expérimentation plus fine qui, compte tenu du caractère destructif de la technique de mesure de l'humidité employée, a nécessité l'utilisation d'un nombre suffisant d'échantillons issus d'une même planche donc petits et de caractéristiques voisines de façon à partiellement s'affranchir de la grande variabilité des propriétés à l'intérieur d'un même arbre.

Dans ce qui va suivre, des échantillons de 50 mm de longueur, 200 mm de largeur et 27 mm d'épaisseur seront utilisés.

La Fig. 4 représente les courbes de séchage obtenues pour ces échantillons pour diverses températures et pressions de l'enceinte. On remarque qu'il existe, pour des conditions de séchage 'douces', une première phase à vitesse de séchage constante du fait d'une vitesse de séchage 'initiale' beaucoup plus faible.

7.2. Evolutions des températures dans le temps et dans l'espace

La Fig. 5 donne l'évolution dans le temps des températures au cours du séchage pour différents thermocouples placés dans l'épaisseur. Après la phase de montée en température qui n'est pas représentée, le matériau atteint un régime de quasi-équilibre thermique pendant lequel les températures n'évoluent quasiment pas dans le temps. Cette température durant cette première phase du séchage est comprise entre 35°C et 58°C ; elle doit être comparée à la valeur 40°C de la température correspondant à une pression de vapeur saturante égale à la pression extérieure $P =$

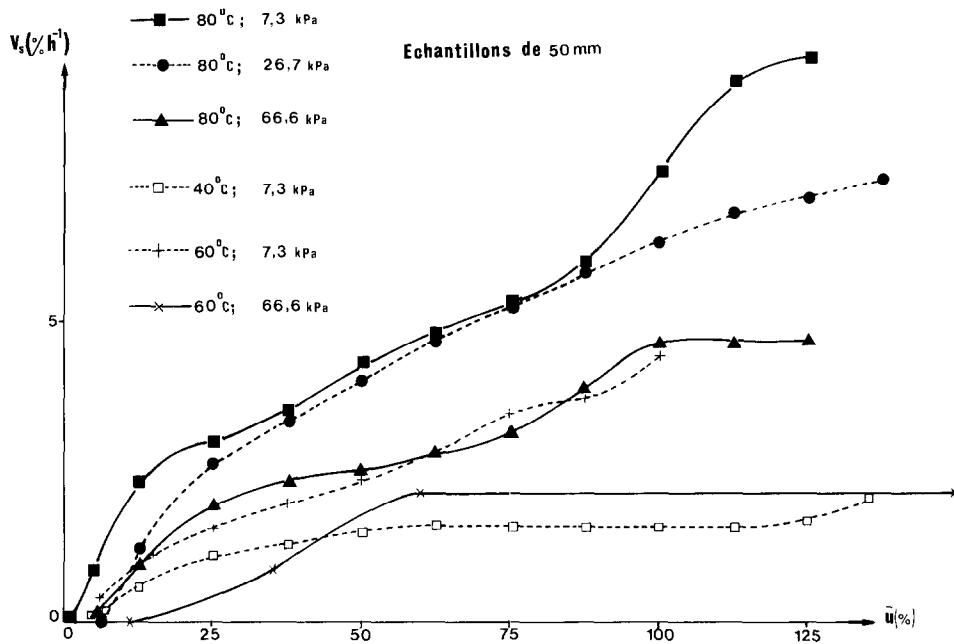


FIG. 4. Courbes de séchage d'échantillons de 50 mm de longueur.

6,7 kPa. Cette période dure environ une vingtaine d'heures jusqu'à ce que le solide atteigne une humidité moyenne de 30%.

Suit alors une deuxième phase de rapide montée en température (une trentaine de °C en une quinzaine d'heures). En comparant les pentes $\partial T / \partial t$ pour un temps donné, nous constatons en dépit d'une montée assez homogène un démarrage très net au voisinage de la plaque chauffante.

Après cette phase, on tend pour une humidité du solide \bar{u} très faible $\bar{u} = 3\%$ vers le régime permanent

caractérisé par des pertes hydriques très faibles et une température constante dans le temps.

7.3. Profils de température

L'analyse précédente peut être complétée par l'examen des divers profils de température dans l'épaisseur de l'échantillon au cours du séchage (Fig. 6).

Aux temps courts: $t = 5$ et 10 h, les profils présentent une allure parabolique très marquée au voisinage immédiat du plateau chauffant ce qui explique qu'on ne l'ait pas observé lors de l'analyse sur la

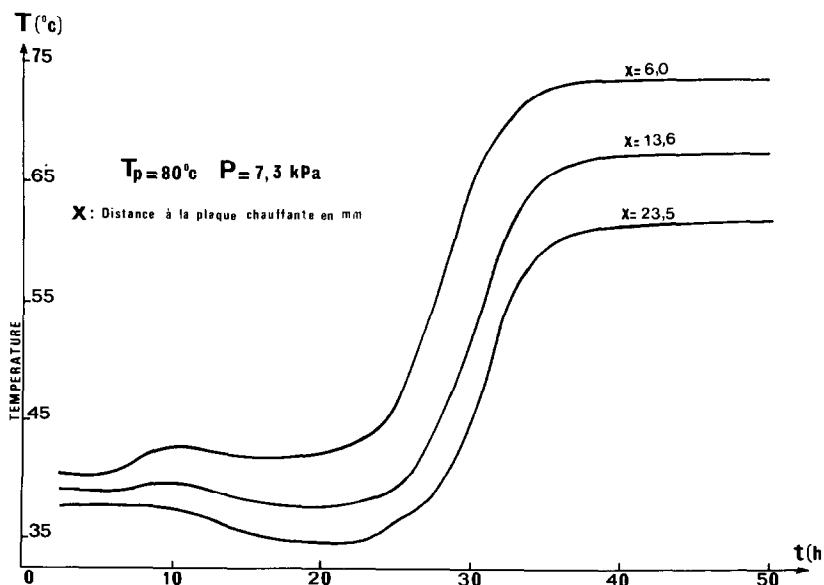


FIG. 5. Evolution du champ de température d'un échantillon dans le temps.

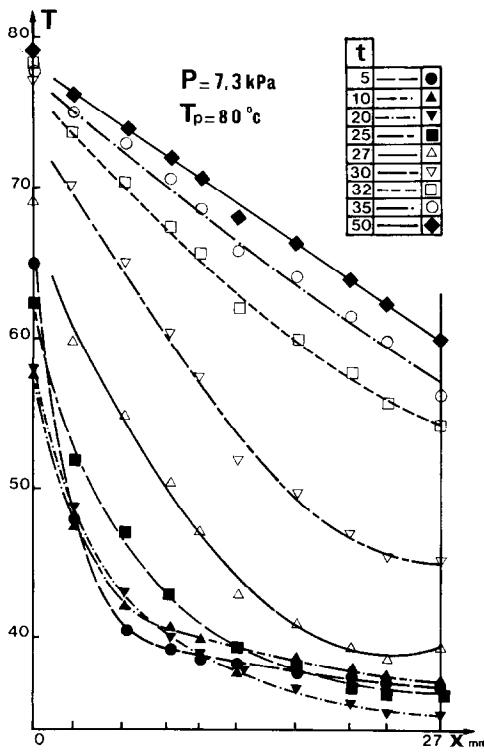


FIG. 6. Profils de température dans l'épaisseur d'un échantillon.

planche complète. La cassure du profil se situe pour une température voisine de 40°C pour laquelle $p_v(40^{\circ}\text{C}) = 7,3 \text{ kPa}$.

Aux temps intermédiaires $t = 27, 30$ et 32 h, on observe un brutal décalage; la cassure se déplaçant vers la partie supérieure de l'échantillon.

Aux temps élevés $t = 35$ h et 50 h, l'analyse est la plus aisée dans la mesure où le profil de température devient celui caractéristique d'une conduction pure monodimensionnelle en régime permanent.

7.4. Profils d'humidité

Toujours pour les conditions de séchage les plus sévères $T_p = 80^{\circ}\text{C}$, $P = 6,7 \text{ kPa}$, nous avons représenté sur la Fig. 7 les profils d'humidité au cours du séchage.

La Fig. 7 présente deux types de profil très distincts suivant que l'on se trouve dans le domaine de l'eau libre ou dans le domaine hygroscopique. Alors que dans ce dernier les profils présentent une allure 'régulière', la forme des différents profils dans le domaine de l'eau libre est beaucoup plus irrégulière. Les points expérimentaux étant obtenus avec une bonne précision, nous avons délibérément choisi de faire passer les profils par ces points.

Dans le domaine de l'eau libre, c'est le potentiel capillaire qui est le moteur du transfert. Compte tenu de l'anatomie du matériau et de la section quadrangulaire de la lumière des cellules qui reste constante sur une large plage d'humidité (au-dessus de $u = 60\%$), ce potentiel varie alors très peu. Cela revient à dire que de

faibles variations d'origine anatomique peuvent expliquer une grande variation de l'humidité mesurée. Au contraire, dans le domaine hygroscopique où l'eau à l'état adsorbé est fortement liée au matériau, une faible variation du taux d'humidité entraîne une grande variation du terme moteur pour le transfert.

L'observation des profils montre que l'humidité disparaît d'abord au voisinage de la plaque chauffante, c'est-à-dire là où la température dans le produit est la plus élevée et par suite là où la pression totale de la phase gazeuse est la plus importante.

8. VITESSE DE SÉCHAGE LOCALE

Une autre façon de préciser la zone dans laquelle s'effectue préférentiellement le séchage est d'analyser les profils de température au moyen de l'équation de l'énergie formulée avec l'approche de Luikov [13]

$$\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho_0 \varepsilon I_v \frac{\partial u}{\partial t}$$

Dans cette analyse, l'équation doit être considérée comme intégrée dans la longueur de l'échantillon d'où la valeur $\varepsilon = 1$ utilisée.

A l'exception des zones de montée en température, montée en régime thermique et deuxième du séchage, pour lesquelles l'analyse suivante ne s'applique pas, le terme $\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t}$ reste toujours négligeable devant le terme de Fourier $\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)$. En supposant la conductivité thermique sensiblement constante, il vient

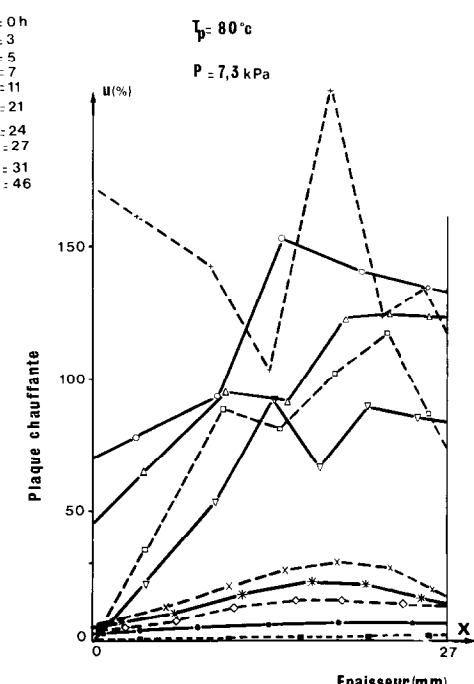


FIG. 7. Profils de taux d'humidité dans l'épaisseur d'un échantillon.

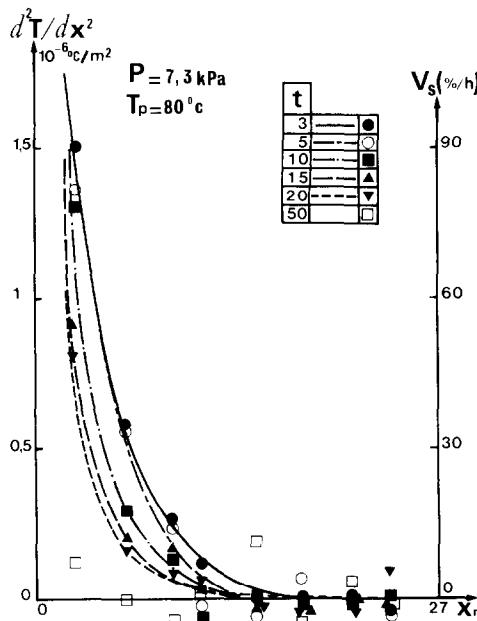


FIG. 8. Evolution de la vitesse locale de séchage dans l'épaisseur d'un échantillon.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = - \rho_0 \frac{L_v}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t}.$$

La dérivée seconde de la température est en première approximation proportionnelle à la vitesse locale de séchage.

La Fig. 8 représente un tel terme évalué d'après les résultats expérimentaux au point i selon la formule

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_i \approx \frac{2}{x_{i+1} - x_{i-1}} \left(\frac{T_{i+1} - T_i}{x_{i+1} - x_i} - \frac{T_i - T_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right).$$

Dans la première phase du séchage, la chaleur est essentiellement cédée au voisinage de la plaque chauffante indice d'une vaporisation à ce niveau. Au cours du séchage, la quantité de chaleur cédée au voisinage de la paroi décroît; la vaporisation devient plus uniforme dans l'épaisseur.

Un calcul analogue effectué pour d'autres conditions expérimentales montre que dans le cas $T_p = 80^\circ\text{C}$, $P = 26,7 \text{ kPa}$, le phénomène décrit précédemment existe toujours quoique de moindre amplitude. En revanche, pour $T_p = 80^\circ\text{C}$ et $P = 66,6 \text{ kPa}$, la chaleur semble dissipée plus uniformément à l'intérieur du matériau.

9. PROPOSITION D'UN MECANISME DE MIGRATION DE L'HUMIDITE

Dans une première phase du séchage, la migration de l'humidité à l'intérieur du matériau est relativement aisée du fait du cheminement très facile de l'humidité dans le sens longitudinal. L'évaporation de l'eau d'après l'analyse des profils de température se situe dans la zone au voisinage de la plaque chauffante.

On peut remarquer qu'un cheminement strictement longitudinal à l'état liquide avec une évaporation uniquement aux extrémités ne représente pour une planche complète qu'une part faible du transfert total, les profils longitudinaux indiquant une température plutôt constante dans la longueur de l'échantillon à l'exception d'une zone d'une soixantaine de millimètres aux extrémités.

L'eau à l'état liquide dans une première phase migre facilement longitudinalement et finit par trouver un cheminement transversal [Fig. 9(a)]. Cette migration importante du côté de l'apport de chaleur ainsi que le remarque Krischer se manifeste de manière évidente sur les profils hydriques: gradients importants côté plaque chauffante, déplacement du maximum du profil vers la face supérieure de l'échantillon.

Alors que pendant la 1ère phase du séchage les profils de température dans l'épaisseur du matériau pour différentes positions dans la longueur de la planche complète sont réductibles à une courbe unique et que dans une 3ème phase les différents points se regroupent sur une droite unique caractéristique d'une conduction pure monodimensionnelle, durant la 2ème phase du séchage, les courbes ne sont plus réductibles à une courbe unique. Cette remarque est à rapprocher du fait que durant la 1ère phase, la migration de l'humidité a lieu préférentiellement dans le sens longi-

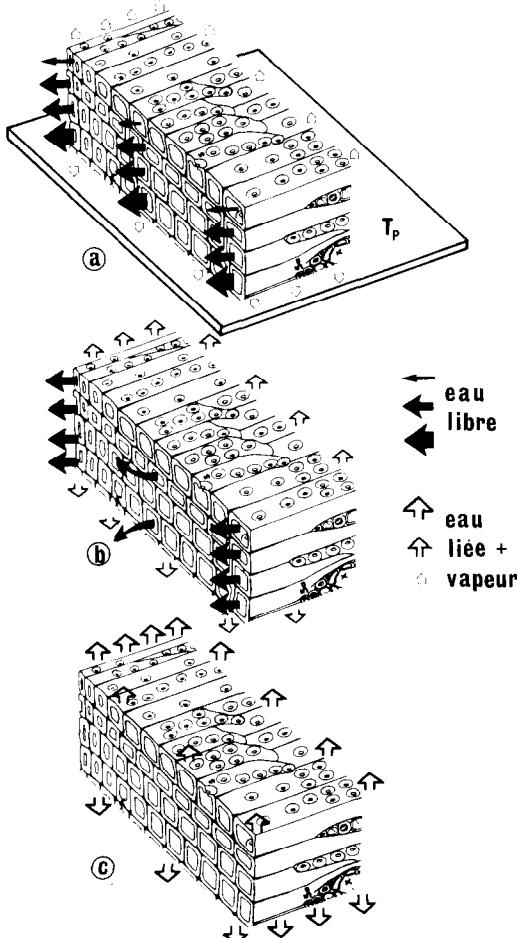


FIG. 9. Schématisation du mécanisme de migration de l'humidité.

tudinal et durant la troisième phase essentiellement dans l'épaisseur du matériau. Cette relative dispersion des profils de température durant la 2ème phase semble traduire le passage d'un mécanisme plutôt longitudinal à un mécanisme transversal pour le transfert de l'humidité ainsi que représenté sur la Fig. 9(b).

Enfin la migration purement dans l'épaisseur s'installe quand tout le matériau est dans le domaine hygroscopique [Fig. 9(c)].

10. CONCLUSION

Nous avons montré d'un point de vue expérimental que l'accélération du transfert massique dans le cas d'un séchage sous vide du matériau bois se produit pour des couples de valeurs température du matériau—pression dans l'enceinte qui permettent la création d'un gradient de pression totale en phase gazeuse important à l'intérieur du matériau. Il en résulte alors un flux convectif régi par une loi de Darcy qui s'ajoutant alors aux autres mécanismes explique l'augmentation du transfert. L'analyse des mesures de température a permis de distinguer trois phases au cours du séchage :

Une première phase, après l'établissement du régime thermique, correspond à une température constante dans le temps mais contrairement à la description classique de Krischer, elle présente une vitesse de séchage constamment décroissante.

Une deuxième phase où la température du produit montre une rapide variation dans le temps correspondant grossièrement au passage dans le domaine hygroscopique.

Enfin, une troisième période où la vitesse de séchage tend asymptotiquement vers 0, le régime thermique d'équilibre étant quasi-atteint.

L'analyse des profils de température jointe à celle des profils hydriques permet la proposition d'un mécanisme de migration de l'humidité à l'intérieur du matériau. Durant la première phase, l'essentiel de la chaleur nécessaire à la vaporisation de l'humidité est fournie au voisinage de la plaque chauffante, et ceci surtout pour des couples de valeurs température—pression qui autorisent un développement important d'un gradient de pression totale en phase gazeuse. Une telle migration, d'après l'anatomie du matériau, est surtout importante sous forme liquide et dans la direction longitudinale. Puis au cours du séchage, on passe d'un phénomène plutôt longitudinal à un phénomène trans-

versal lorsque le matériau est entièrement dans le domaine hygroscopique.

BIBLIOGRAPHIE

1. J. Yao, A new approach to the study of drying diffusion coefficients of wood, *Forest Prod. J.* **16**, 61–69 (1966).
2. W. W. Moschler and R. E. Martín, Diffusion equations in experimental wood drying, *Wood Sci.* **1**, 47–56 (1968).
3. G. L. Comstock, Moisture diffusion coefficients in wood as calculated from adsorption, desorption and steady-state data, *Forest Prod. J.* **13**, 97–103 (1963).
4. D. Aleon, Etude du procédé de séchage du bois par le vide, Centre Technique du Bois, étude générale n° 281 (1978).
5. J. F. Siau, *Flow in Wood*. Syracuse Wood Science Series, New York (1971).
6. G. L. Comstock and W. A. Côté, Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood, *Wood Sci. Technol.* **2**, 279–291 (1968).
7. A. J. Stamm, Movement of fluids in wood, Part I: Flow of fluids, Part II: Diffusion, *Wood Sci. Technol.* **1**, 122–141; 205–230 (1967).
8. A. J. Stamm, *Wood and Cellulose Science*. Ronald, New York (1964).
9. A. J. Stamm, Bound-water diffusion into wood in the fiber direction, *Forest Prod. J.* **9**, 27–32 (1959).
10. G. Bramhall, Fick's laws and bound-water diffusion, *Wood Sci.* **8**, 153–161 (1976).
11. S. Kawai, K. Nakato and T. Sadoh, Prediction of moisture distribution in wood during drying, *Mokuzai Galakaishi* **8**, 520–525 (1978).
12. S. Kawai, Moisture movement and drying stresses in wood, Doctoral dissertation, Kyoto University (1980).
13. A. V. Luikov, *Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies*. Pergamon Press, Oxford (1966).
14. A. V. Luikov, Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies, *Int. J. Heat Mass Transfer* **18**, 1–4 (1975).
15. P. Crausse, G. Bacon and S. Bories, Etude fondamentale des transferts couplés chaleur-masse en milieu poreux, *Int. J. Heat Mass Transfer* **24**, 991–1004 (1981).
16. G. L. Comstock, Longitudinal permeability of wood to gases and nonswelling liquids, *Forest Prod. J.* **17**, 41–46 (1967).
17. C. Basilico, C. Moyne and M. Martin, High temperature convective drying of softwood. Moisture migration mechanisms, Third International Drying Symposium, 13–16 September (1982).
18. C. Moyne and M. Martin, Influence of a total pressure gradient in gaseous phase on drying with particular reference to wood, 7th International Heat Transfer Conference, Munich (1982).
19. O. Krischer and K. Kröll, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer, Berlin (1956).
20. C. Moyne, Contribution à l'étude du transfert simultané de chaleur et de masse au cours du séchage sous vide d'un bois résineux, Thèse Docteur-Ingénieur (1982).
21. F. P. Kollmann and A. Schneider, Der Einfluss der Belüftungsgeschwindigkeit auf die Trocknung von Schnittholz mit Heissluft-Dampf-Gemischen, *Holz Roh-u. Werkstoff* **18**, 81–94 (1960).

EXPERIMENTAL STUDY OF SIMULTANEOUS HEAT AND MASS TRANSFER DURING VACUUM CONTACT DRYING OF SOFTWOOD

Abstract—An experimental study of the conjugate heat and mass transfer during the vacuum contact drying of softwood is described.

The experimental results show that the drying rate is increased by means of a convective movement induced by a total pressure gradient in the gaseous phase at high free moisture content.

An analysis of temperature and moisture distributions distinguishes three stages during drying (excluding the thermal transient regime):

1st stage: the wood temperature does not change in time but the drying rate decreases continuously.

2nd stage: the wood temperature increases quickly.

3rd stage: the moisture equilibrium is reached asymptotically.

The previous results suggest a moisture migration mechanism for softwood drying.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES GLEICHZEITIGEN WÄRME UND STOFFTRANSPORTS WÄHREND DER VAKUUMKONTAKTTROCKNUNG VON NADELHOLZ

Zusammenfassung—Berichtet wird über eine experimentelle Untersuchung des gleichzeitigen Wärme und Stofftransports während der Vakuumkontakttrocknung von Nadelholz.

Die Beschleunigung der Trocknungsgeschwindigkeit, verbunden mit einer konvektiven Feuchtigkeitsbewegung, die durch ein Druckgradient in gasförmiger Phase für hohen freien Feuchtigkeitsgehalt veranlasst ist, wird mit Versuchsergebnissen klar gestellt.

Die Unterscheidung von drei Abschnitten (ohne die thermische Übergangszeit) wird durch die Analyse der Temperatur und Feuchtigkeitsverteilungen ermöglicht.

1ster Abschnitt: die Temperatur des Holzes verändert sich nicht in der Zeit, während die Trocknungsgeschwindigkeit ständig abnimmt.

2ter Abschnitt: die Temperatur des Holzes nimmt schnell zu.

3ter Abschnitt: das Feuchtigkeitsgleich gewicht wird asymptotisch erreicht.

Die vorliegenden Ergebnisse erlauben, ein Modell für die Feuchtigkeitswanderung während der Nadelholztrocknung vorzuschlagen.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННОГО ТЕПЛО-И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВАКУУМНОЙ КОНТАКТНОЙ СУШКЕ МЯГКОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Аннотация—Проведено экспериментальное исследование взаимосвязанного тепло-и массопереноса при вакуумной контактной сушке мягкой древесины. Полученные результаты показывают, что интенсивность сушки возрастает за счет конвекции, вызываемой градиентом давления в газовой фазе при большом содержании несвязанной влаги. Анализ распределений температуры и влажности позволяет выделить три стадии процесса сушки (исключая переходный тепловой режим): (1) температура древесины не изменяется во времени, но интенсивность сушки непрерывно снижается; (2) температура древесины быстро увеличивается и (3) равновесное влагодержание устанавливается асимптотически. Результаты предыдущих исследований позволяют сделать предположение о миграционном механизме сушки мягкой древесины.