

0017-9310(94)00216-9

La perte de température à travers la charge : intérêt pour le pilotage d'un séchoir à bois à haute température

M. MARTIN, P. PERRE† et M. MOSER

LEMTA (URA-CNRS n° 875), 2, avenue de la Forêt de Haye, 54516 Vandoeuvre, France

(Reçu 22 mars 1994 et sous forme finale 6 juillet 1994)

Résumé—On présente une étude sur la désurchauffe (perte de température du fluide à travers la pile) lors du séchage convectif d'une pile de bois en vapeur surchauffée. Elle repose sur des mesures effectuées grâce à un aménagement spécifique de la veine d'expérience d'une soufflerie de laboratoire. Les résultats sont comparés d'une part, à ceux issus d'un bilan enthalpique global (à partir de la dérivée de la cinétique de séchage) et d'autre part, à ceux résultant de l'intégration d'un bilan enthalpique local qui utilise la courbe caractéristique (modèle de van Meel). Le bon accord obtenu permet de s'intéresser au pilotage d'un séchoir à partir du suivi de la désurchauffe. Cependant, deux facteurs sont source d'erreur : les pertes thermiques inhérentes au séchoir et la variabilité de la courbe caractéristique dans le cas du matériau bois. L'effet de ces deux paramètres est quantifié. Il en ressort que, moyennant certaines précautions, l'incertitude peut être suffisamment réduite pour envisager le pilotage du séchage à partir de cette mesure de désurchauffe. Compte tenu de sa simplicité de mise en oeuvre et du caractère global de l'information qu'il procure, ce système peut également être utilisé en complément aux dispositifs existants.

INTRODUCTION

L'art du séchage du bois consiste à trouver un subtil équilibre entre le temps de séchage et la qualité du produit séché. Il faut, en particulier, intégrer l'essence, l'épaisseur, la variabilité au sein de la pile, les possibilités thermiques du séchoir. Du fait de cette complexité, les conduites de séchage exploitées actuellement sont le résultat de l'expérience.

Il convient de mentionner qu'en pays tempéré, le nombre d'essences utilisé est assez limité et, dans la plupart des cas, la connaissance empirique suffit pour un séchage de routine.

Cependant, dans certaines circonstances, cette connaissance empirique fait cruellement défaut. Citons par exemple le cas des forêts tropicales humides où de nouvelles essences commerciales, totalement inconnues du point de vue du séchage, voient le jour. Le cas du séchage à haute température en est un autre exemple. Il s'agit cette fois d'adapter une nouvelle procédure à des essences connues.

Face à ce qu'on peut appeler des innovations technologiques, la recherche a un rôle important à jouer, mais le problème n'est pas simple, il faut :

(a) d'abord comprendre la physique de base qui régit les transferts de chaleur et de masse au sein du milieu poreux bois sans oublier la pression gazeuse interne qui joue un rôle très important en séchage à haute température [1–8]

(b) intégrer la spécificité du matériau bois : vari-

abilité inter et intra espèce, intra arbre (le coeur étant différent de l'aubier), l'hétérogénéité, l'anisotropie [9,10]

(c) passer des champs d'humidité aux contraintes et aux déformations induites par le retrait [11–14]

(d) enfin, simplifier suffisamment toute cette approche pour obtenir des règles de conduite adaptées à l'industrie. Il faut notamment disposer d'un moyen de contrôle fiable et simple à mettre en oeuvre.

L'objectif de cet article est ciblé sur ce dernier point. Il propose une conduite de séchage par suivi de la désurchauffe de la vapeur entre l'entrée et la sortie de la pile de bois ; cette solution est très simple à mettre en oeuvre en contexte industriel et se révèle suffisamment précise.

APPROCHE GLOBALE DU SECHAGE

Complexité du séchage à haute température

La compréhension des mécanismes mis en jeu lors du séchage convectif à haute température d'un bois résineux est développée dans les publications référencées [1–8] et plus particulièrement dans celles qui constituent une synthèse de travaux du laboratoire [1, 2]. Aussi se bornera-t-on ici à rappeler que le principal intérêt de ce nouveau procédé réside dans la réduction importante des temps de séchage qui, par rapport à un séchage traditionnel, sont divisés par trois ou quatre suivant les essences.

En séchage convectif à basse température, le fluide séchant sert : d'une part à apporter l'énergie nécessaire

†ENGREF, 14, rue Girardet, 54042 Nancy Cédex, France.

NOMENCLATURE

b	largeur du volume considéré ou largeur de la pile [m]	y	abscisse dans le sens de l'écoulement [m]
c_p	chaleur massique à pression constante [J kg ⁻¹ °C ⁻¹]	α	coefficient local de transfert de chaleur [W m ⁻² °C ⁻¹].
D_H	diamètre hydraulique du sous canal considéré [m]	Symboles grecs	
e_1	épaisseur d'une planche [m]	Π	capacité d'évaporation réduite du fluide
e_2	distance entre deux planches [m]	ρ_0	masse volumique du produit à l'état anhydre [kg m ⁻³].
f	vitesse de séchage réduite	Caractères spéciaux associés à une grandeur φ	
$h(T)$	enthalpie massique à la température T [J kg ⁻¹]	φ^*	grandeur réduite
$\Delta h_v(T)$	chaleur latente de la vapeur à la température T [J kg ⁻¹]	$\bar{\varphi}$	moyenne de φ dans l'épaisseur
Δh_v^0	chaleur latente de la vapeur à $T = 0^\circ\text{C}$ [J kg ⁻¹]	$\langle \varphi \rangle$	moyenne de φ sur la longueur L
L	longueur de la planche ou du lit de planches dans le sens de l'écoulement [m]	$\dot{\varphi}$	dérivée de φ par rapport au temps.
m	masse totale du produit [kg]	Indices inférieurs	
m_s	masse totale anhydre du produit [kg]	b	relatif au bois
m_v	débit massique de vapeur [kg s ⁻¹]	cr	critique
Nu	nombre de Nusselt	e	entrée
Nu_∞	nombre de Nusselt en régime turbulent établi	eb	relatif à l'ébullition
Pr	nombre de Prandtl	eq	équilibre
Re	nombre de Reynolds	exp	expérimental
S	surface d'échange [m ²]	f	final
t	temps [s]	h	humide
T	température [°C]	I	relatif à la première phase
ΔT	désurchauffe [°C]	i	initial
V	vitesse d'entrée de la vapeur [m s ⁻¹]	l	relatif à l'eau liquide
v	volume du produit [m ³]	mes	mesuré
X	teneur en eau locale [kg d'eau/kg matière sèche] ($\times 100$ si exprimée en %)	p	paroi
		per	perdes
		s	sortie ou sèche (pour la température)
		th	théorique
		v	relatif à la vapeur.

à la vaporisation et d'autre part à évacuer la vapeur d'eau sortant du produit.

Schématiquement, la vitesse de séchage dépend de quatre résistances : deux résistances thermiques en série (une interne et une externe) et deux résistances massiques également en série (une interne et une externe). Ces deux flux thermique et massique sont liés par un bilan enthalpique.

En première phase de séchage, seules les résistances externes sont à prendre en compte. De plus, la résistance au transfert de masse est toujours très faible devant la résistance au transfert de chaleur. Elle devient même nulle dans le cas particulier du séchage en vapeur surchauffée. Dans tous les cas, la vitesse de séchage est contrôlée par l'apport énergétique.

En deuxième phase, l'eau devant migrer sous la forme de vapeur d'eau ou/et d'eau liée sur une portion de produit, la résistance interne au transfert massique est alors souvent prépondérante. C'est durant cette phase que se manifeste l'intérêt du séchage à haute

température. En effet, la température du produit pouvant dépasser la température d'ébullition, une suppression interne gazeuse apparaît et diminue fortement la résistance interne au transfert de masse. Selon les propriétés du matériau, la vitesse de séchage sera alors contrôlée par l'une ou l'autre des résistances internes, ou les deux à la fois.

Dans le cas du bois, du fait de l'ordre de grandeur élevé (compris entre 10^2 et 10^4) du rapport des perméabilités longitudinale et transversales (radiale et tangentielle), cette suppression favorise la migration de l'eau liquide ou gazeuse vers les extrémités des planches. Les résultats expérimentaux et issus d'une simulation numérique 2D montrent en effet que les extrémités des planches restent très longtemps à la température humide de 100°C alors que les faces de la planche sont déjà largement plus chaudes [2].

Il ne faut toutefois pas oublier que le choix d'un procédé de séchage est généralement un compromis entre des souhaits qui peuvent être contradictoires : la

diminution du temps de séchage qui permet une plus grande souplesse de fonctionnement, une meilleure adaptation de l'offre et de la demande, une réduction de stocks et une miniaturisation de la taille du séchoir ; mais aussi et surtout la qualité du produit final. De ce point de vue, il est nécessaire de distinguer le séchage en vapeur surchauffée (température humide égale à 100°C) du séchage à haute température en air humide (température humide inférieure à 100°C).

En vapeur surchauffée, la température du produit atteint la température d'ébullition dès la première phase de séchage. L'effet de suppression interne est donc mieux exploité.

Par opposition, le séchage en air humide à haute température s'apparente, durant toute la première partie du procédé, à un séchage à basse température. De ce fait, pour une même température sèche, le séchage en air humide impose au produit des conditions de séchage plus dures qu'avec la vapeur surchauffée [2].

L'optimisation du séchage à haute température n'est possible qu'en gardant à l'esprit la complexité des mécanismes. Cependant, pour étudier une pile et piloter un séchoir, l'approche en terme de génie des procédés se révèle efficace. Dans ce travail tous les mécanismes internes seront intégrés dans la forme de la cinétique de séchage.

Cinétique de séchage

La pesée d'une planche au cours du séchage est le moyen le plus simple lorsque l'on souhaite suivre et quantifier l'abaissement progressif de l'humidité moyenne \bar{X} du produit caractérisée par le rapport de la masse d'eau contenue à l'instant t à la masse m_s du produit anhydre $\bar{X} = (m - m_s)/m_s$ ($\times 100$ si exprimée en %).

Cette humidité passe de la valeur initiale \bar{X}_i à la valeur finale \bar{X}_f souhaitée et définie en fonction des conditions d'utilisation ultérieures du produit. Les cinétiques de séchage sont indifféremment représentées par les courbes $m(t)$ ou $\bar{X}(t)$.

Une difficulté apparaît toutefois dans ce dernier cas du fait que la masse sèche est a priori inconnue. Elle n'est obtenue qu'après déshydratation complète (étuvage à 102–103°C jusqu'à stabilisation de la masse).

Courbe de séchage et phases de séchage

On traduit très souvent les diverses phases du séchage à l'aide des courbes de séchage qui présentent l'avantage de permettre une interprétation physique des différents mécanismes mis en jeu. On trace la vitesse du séchage $\dot{\bar{X}}$ qui est la dérivée par rapport au temps de l'humidité moyenne \bar{X} du matériau ($-\dot{\bar{X}}/dt$) en fonction de \bar{X} .

Les vitesses de séchage dépendent considérablement des produits et des conditions de séchage. De ce fait, les expérimentateurs sont souvent amenés à choisir des unités telles que les ordres de grandeur obtenus restent raisonnables.

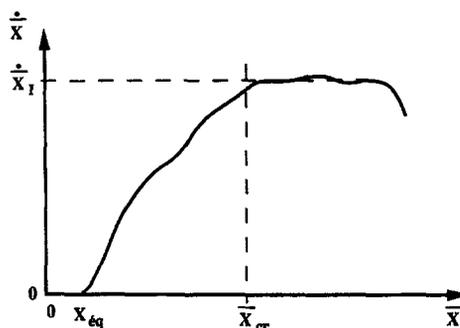


Fig. 1. Courbe de séchage ($\dot{\bar{X}}$ fonction de \bar{X}).

La Fig. 1 représente l'allure générale d'une courbe type pour des conditions de séchage constantes (température, vitesse, humidité du fluide séchant).

Selon Krischer [15] on distingue, après une période de mise en régime :

(a) Une première phase de séchage durant laquelle la vitesse de séchage reste sensiblement constante. Elle est notée $\dot{\bar{X}}_1$.

Le mécanisme de succion capillaire, qui achemine l'eau vers l'interface où elle s'évapore, est le terme moteur en séchage traditionnel. On dit alors que l'on est dans le domaine de 'l'eau libre'. A haute température, l'effet 'piston' que joue la surpression interne devient le mécanisme prépondérant. Cette phase se poursuit jusqu'à une teneur critique, notée \bar{X}_{cr} , à partir de laquelle la vitesse décroît.

(b) A partir de \bar{X}_{cr} , débute une phase de séchage à vitesse décroissante.

La migration capillaire n'étant plus suffisante pour alimenter l'interface en eau libre, une partie sèche se développe à la périphérie. Le mécanisme moteur s'y réduit à une diffusion d'eau liée et de vapeur caractéristique du domaine hygroscopique.

Progressivement, l'épaisseur de la zone d'eau libre diminue en partant de la surface vers le centre de la planche. Ce phénomène s'accompagne d'une augmentation progressive de la température.

(c) Une troisième phase de séchage où le matériau est entièrement dans le domaine hygroscopique, la teneur en eau tendant asymptotiquement avec le temps vers la teneur en eau d'équilibre \bar{X}_{eq} . Cette troisième phase n'est que théorique, elle est très difficile à mettre en évidence expérimentalement.

Concept de courbe caractéristique réduite

La description des différents mécanismes requiert la détermination d'un certain nombre de coefficients phénoménologiques liés au matériau mais aussi aux conditions aérodynamiques : vitesse, température et humidité du fluide séchant. Le concept de courbe caractéristique est né d'une expérimentation conduite en faisant varier les paramètres liés au fluide. Dans cette approche globale, une normation adéquate permet de rassembler les diverses courbes de séchage

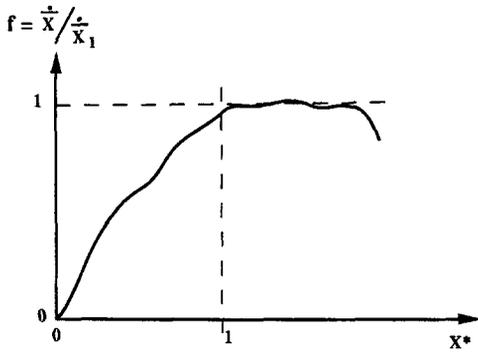


Fig. 2. Courbe réduite de séchage (f fonction de X^*).

relatives à un matériau donné et de dessiner une 'courbe unique' appelée courbe caractéristique réduite. Il faut bien spécifier que ce concept n'a pas de justification théorique et que le succès de cette opération n'est assuré que si la plage de variation des paramètres est suffisamment réduite.

En particulier, lorsque l'on substitue à la vapeur surchauffée l'air humide à haute température, le début de procédé fait apparaître un comportement analogue au séchage à basse température. Ceci modifie de façon sensible l'allure de la courbe caractéristique [1].

Pour cette raison, les résultats présentés ici se limitent à la vapeur surchauffée.

Une teneur en eau et une vitesse de séchage adimensionnelles, notées respectivement X^* et f sont obtenues de la façon suivante :

$$X^* = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{\bar{X}_{cr} - X_{eq}} \text{ et } f = \frac{\dot{X}}{\dot{X}_1}. \quad (1)$$

Avec ces notations, la vitesse de séchage s'écrit :

$$\dot{X} = \dot{X}_1 f(X^*). \quad (2)$$

Les courbes de la Fig. 1 ainsi réduites se transforment en une courbe caractéristique telle que celle de la Fig. 2.

L'intérêt principal de cette présentation réside dans sa facilité d'emploi pour dimensionner un séchoir ou définir la conduite du séchage. Nous verrons dans la suite que cette présentation est particulièrement souple lorsqu'une formulation mathématique simple de $f(X^*)$ peut être proposée.

CARACTERISATION DU SECHAGE A HAUTE TEMPERATURE DE L'ABIES GRANDIS

Sélection des échantillons de planches

Quelle que soit l'approche utilisée, il est nécessaire de procéder à une identification sur des échantillons aussi semblables que possible.

Compte tenu de la très grande variabilité du matériau, liée à l'anatomie du bois et à son histoire, l'échantillonnage est une opération qui doit être effectuée

avec soin. On peut se reporter à la référence [10] pour avoir une description plus détaillée du matériau.

Seuls les points importants sont rappelés ici :

(a) l'architecture du bois considéré joue un rôle très important dans le déroulement du séchage,

Pour une même essence, on distingue le 'bois de coeur' qui constitue la partie centrale 'morte' de l'arbre, du 'bois d'aubier' qui est la partie extérieure encore active dans laquelle monte la sève.

(b) les perméabilités du 'bois de coeur' sont beaucoup plus faibles que celles du 'bois d'aubier',

(c) la perméabilité longitudinale du 'bois d'aubier' est 100 à 50 000 fois supérieure à la perméabilité radiale et tangentielle,

(d) l'humidité initiale est plus grande dans le 'bois d'aubier' que dans le 'bois de coeur'.

En conséquence, une planche comportant à la fois du coeur et de l'aubier présentera une très grande hétérogénéité de propriétés et de teneur en eau initiale.

Il s'en suit que.

(a) une cinétique de séchage de bois de coeur et une cinétique de séchage de 'bois d'aubier' seront très différentes,

(b) il est souvent difficile de sélectionner plusieurs planches uniquement dans l'aubier (cela dépend du diamètre de l'arbre),

(c) l'histoire de l'arbre et encore plus celle des planches est déterminante. Une planche d'aubier peut avoir une humidité initiale faible si le temps écoulé entre l'abattage, le sciage et le séchage est grand.

De plus, le temps de stockage influence non seulement l'humidité moyenne de la planche mais aussi le profil d'humidité dans l'épaisseur de celle-ci.

Conscient de tout cela et adoptant délibérément une approche de 'type génie des procédés', on se place à l'échelle de l'épaisseur de la planche tout en prenant en compte la nature différente des bois de coeur et d'aubier. C'est-à-dire que nous tenons compte des différences de teneur en eau moyenne initiale résultant de la nature du bois mais pas du gradient de teneur en eau initial dont l'effet est minimisé par utilisation de planches fraîchement débitées dans un arbre venant d'être abattu.

Courbes de séchage obtenues pour l'Abies grandis

Elles sont relatives à des expérimentations effectuées dans la veine d'expérience d'une soufflerie à haute température décrite dans ref. [1] et schématisée sur la Fig. 3.

Pour le type de résineux étudié, on peut dire que :

(a) si : $[\langle \bar{X}_i \rangle] > 150\%$ la planche est totalement issue de l'aubier,

(b) si : $[\langle \bar{X}_i \rangle] < 100\%$ la planche est principalement issue du coeur.

Les courbes de séchage relatives à deux vitesses d'écoulement : 7 m s^{-1} et 10 m s^{-1} et deux températures 135 et 160°C sont représentées sur la Fig. 4.

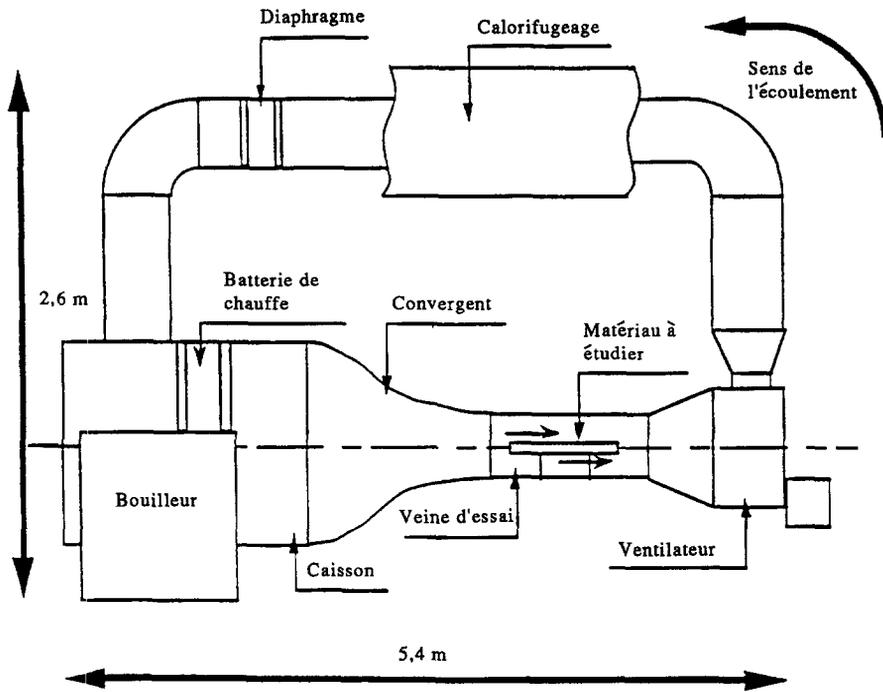


Fig. 3. Soufflerie à haute température.

On constate que ces courbes ressemblent à celle de la Fig. 1 mais la première phase, à vitesse de séchage constante, est moins marquée du fait de la mise en régime thermique. Cependant, on peut parler de première phase pour les essais 1, 1' et 1'' dans la mesure où, pour les mêmes conditions aérodynamiques, les maxima sont très voisins de 80% h⁻¹. De même, bien que cela soit moins net, les courbes 2 et 2' présentent un maximum compris entre: 40 et 44% h⁻¹. En revanche, l'essai 3, effectué sur une planche: micoeur/miaubier, montre un comportement différent puisqu'on observe un pic très marqué et une cassure souvent rencontrée dans le 'bois mixte'.

Pour simplifier, on s'intéressera dans la suite aux seuls essais 1, 2 et 3. Or, même à partir de ceux-ci, il s'avère très difficile de déterminer, sur les courbes, les valeurs des \bar{X}_{cr} . En conséquence, nous avons opté pour une approche moins subjective utilisant une formulation simple de $f(X^*)$ [17].

Identification des paramètres \bar{X}_1 et \bar{X}_{cr}

La forme simplifiée de la courbe caractéristique utilisée dans ce travail a été choisie à partir des allures réelles (Fig. 4). Il s'agit d'une courbe définie par deux droites:

- (a) $f(X^*) = 1$ pour $X^* \geq 1$
- (b) $f(X^*) = X^*$ pour $X^* < 1$

En conséquence la courbe de séchage sera définie par deux paramètres: \bar{X}_1 et \bar{X}_{cr} .

\bar{X}_1 ne dépend que de l'écoulement externe, il est relié au coefficient moyen d'échange de chaleur $\langle \alpha \rangle$ par la relation:

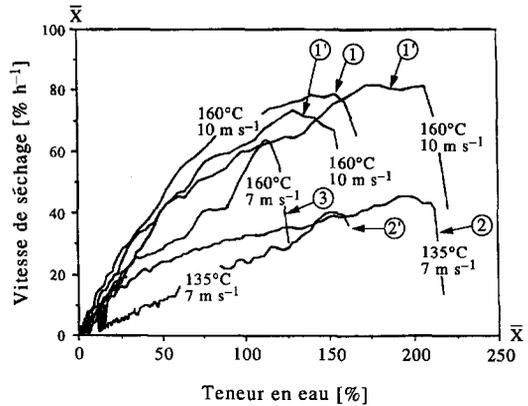


Fig. 4. Courbes de séchage obtenues pour diverses vitesses et températures (*Abies grandis*).

$$\hat{X}_1 = - \frac{\langle \alpha \rangle (T_s - T_h) S}{\Delta h_v (T_h) m_s}$$

Le principe de la méthode d'identification consiste à déduire de la forme de la courbe caractéristique réduite la forme de la cinétique de séchage par intégration en initialisant les deux paramètres \bar{X}_1 ou $\langle \alpha \rangle$ et \bar{X}_{cr} nécessaires au passage d'une courbe à une autre. La confrontation de ces cinétiques et des cinétiques expérimentales à l'aide d'un critère des moindres carrés minimisé par la méthode du 'Simplex' nous a permis, par une méthode itérative sur \bar{X} et \bar{X}_{cr} , de déterminer les valeurs de ces deux paramètres les plus appropriées. La réduction des courbes effectuée sur

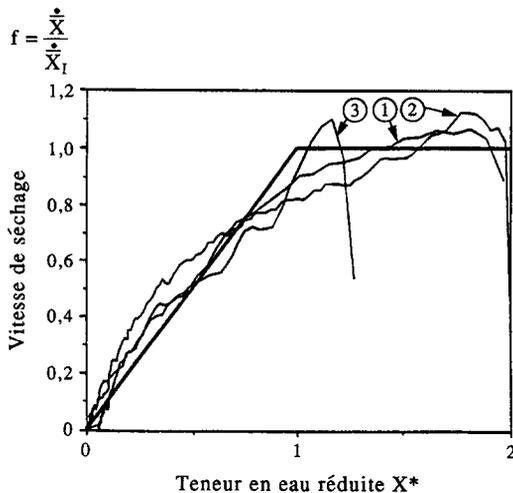


Fig. 5. Illustration du concept de courbe caractéristique.

les essais 1, 2 et 3 donne lieu à la représentation de la Fig. 5.

Si on note une bonne concordance entre les valeurs de \bar{X}_1 obtenues dans les trois essais, il n'en est pas de même pour les valeurs de \bar{X}_{cr} qui montrent une dispersion assez grande autour de 80%. Plus généralement, l'ensemble des essais effectués sur des planches non sélectionnées permettent de faire état d'une fourchette encore plus large: $60\% < \bar{X}_{cr} < 100\%$.

Contrairement à l'intuition, ce sont les planches les plus humides qui ont tendance à avoir une humidité critique \bar{X}_{cr} la plus faible.

En fait, cette analyse simple de la cinétique de séchage à l'aide de deux paramètres, dont un seul dépend de la planche, permet de retrouver un effet bien connu: les planches d'aubier sont plus humides au départ mais séchent plus vite que les planches de coeur dont la perméabilité est fortement réduite par aspiration des ponctuations aréolées et accumulation d'extractibles.

Plusieurs travaux montrent que les cinétiques du bois d'aubier peuvent rattraper, voire dépasser les cinétiques du bois de coeur [9, 10]. Cette constatation est plutôt avantageuse dans notre cas puisqu'une valeur moyenne de 80% donnera pour toutes les planches des informations suffisamment précises.

Calcul de la vitesse de séchage en première phase \bar{X}_1 ou du coefficient d'échange thermique moyen, $\langle \alpha \rangle$

Expérimentalement, les courbes caractéristiques ont été déterminées en utilisant une seule planche dans la veine d'expérience (configuration type 'plaque plane'). L'association de cinq planches utilisées pour l'étude de la désurchauffe modifie la configuration de l'écoulement (configuration type 'établissement entre deux plans').

Afin d'estimer l'effet de ce changement de configuration sur le coefficient $\langle \alpha \rangle$, ce dernier a été calculé avec les corrélations habituelles.

Considérons d'abord le cas d'une plaque plane rugueuse placée en incidence nulle dans un écoulement turbulent. La théorie de la couche limite conduit à une expression du nombre de Nusselt moyen de la forme:

$$\langle Nu \rangle = 0.037 Pr^{1/3} Re_L^{0.8} \quad (3)$$

d'où il vient la valeur du coefficient d'échange moyen $\langle \alpha \rangle$ sur la longueur L d'une planche ou d'un lit de planches.

Si on considère que l'écoulement entre deux planches ou deux lits de planches peut être assimilé à l'écoulement en cours d'établissement entre deux plans parallèles, il faut faire appel à la corrélation applicable au régime établi (4) et la corriger pour tenir compte de l'effet d'établissement (5).

La corrélation du régime turbulent établi est:

$$Nu_{\infty} = 0.022 Pr^{0.6} Re_{D_H}^{0.8} \quad (4)$$

où D_H est le diamètre hydraulique de l'espace entre planches ou entre lits.

Selon Kays [18], le transfert moyen $\langle Nu \rangle$ sur la longueur L peut être évalué à partir de cette relation moyennant l'introduction d'un facteur correctif traduisant l'effet d'établissement.

$$\frac{\langle Nu \rangle}{Nu_{\infty}} = 1 + \frac{C}{L/D_H} \quad (5)$$

où C est une constante empirique égale à 1.4 en écoulement turbulent incident.

A partir de ces expressions il est intéressant de comparer les vitesses de séchage en première phase ou plus concrètement les valeurs du coefficient d'échange moyen $\langle \alpha \rangle$ dans les conditions des trois expériences qui vont être décrites c'est-à-dire pour une vitesse d'écoulement égale à 6 m s^{-1} .

Le Tableau 1 montre que:

(a) la valeur prédite par la corrélation dans le cas d'une plaque plane est en bon accord avec les valeurs identifiées à partir de l'expérience,

(b) la configuration de l'écoulement a peu d'effet sur les valeurs moyennes du coefficient d'échange.

BILANS ENTHALPIQUES SUR UN LIT DE PLANCHES

Considérons l'espace confiné compris entre deux lits horizontaux de planches de bois séparés par des tasseaux qui permettent au fluide de circuler entre les planches (Fig. 6).

L'objectif de ce paragraphe est d'étudier la perte de température entre l'entrée et la sortie de l'écoulement de vapeur surchauffée. La valeur absolue de cet écart sera appelée désurchauffe.

Dans un premier temps nous présentons un bilan enthalpique global simplifié qui permet de relier la désurchauffe à la vitesse de séchage.

Dans un deuxième temps, à l'aide d'un bilan local, nous montrons comment on peut calculer l'évolution de la désurchauffe à partir des caractéristiques de la

Tableau 1. Coefficient d'échange identifié et calculé

	Méthode d'identification†	Calcul type 'plaque plane'	Calcul type 'établissement entre deux plans'
$\langle \alpha \rangle$ [W m ⁻² °C ⁻¹]	21 < ($\langle \alpha \rangle$) < 29	$\langle \alpha \rangle = 22$	$\langle \alpha \rangle = 24$

† Expérimentalement les vitesses ne sont pas rigoureusement constantes mais comprises entre 5 et 7 m s⁻¹.

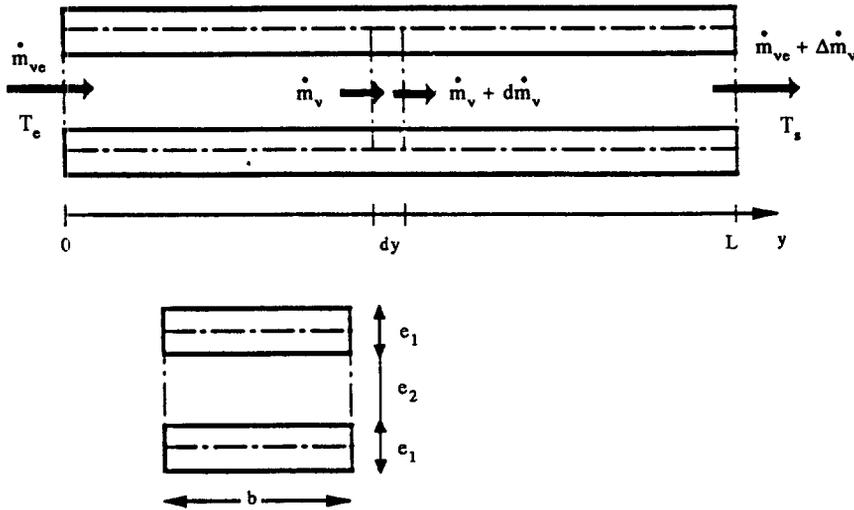


Fig. 6. Volumes sur lesquels s'effectuent les bilans global et local.

vapeur à l'entrée de la pile et de la courbe caractéristique.

Bilan enthalpique global

L'approche utilisée ici permet de relier l'évolution de la désurchauffe à la cinétique de séchage de la pile.

Pour un sous-canal, le bilan enthalpique entre l'entrée et la sortie s'écrit :

$$\dot{m}_v h_v(T_e) - (\dot{m}_v + \Delta \dot{m}_v) h_v(T_s) = \rho_0 v \frac{d}{dt} [h_b + \langle \bar{X} \rangle h_1] \tag{6}$$

où en supposant les chaleurs massiques constantes dans la plage de températures concernées :

$$\begin{cases} h_v(T) = C_{pv} T + \Delta h_v^0 \\ h_b(T) = C_{pb} T \\ h_1(T) = C_{p1} T \end{cases}$$

Pour le même sous-canal, le bilan de masse s'écrit :

$$\Delta \dot{m}_v = -\rho_0 v \frac{d\langle \bar{X} \rangle}{dt} \tag{7}$$

Après développement on obtient :

$$\dot{m}_v C_{pv} (T_e - T_s) = \rho_0 v \left([C_{pb} + \langle \bar{X} \rangle C_{p1}] \frac{d\langle T \rangle}{dt} + [\Delta h_v(T_p) + C_{pv} (T_s - T_p)] \frac{d\langle \bar{X} \rangle}{dt} \right) \tag{8}$$

avec

$$\Delta h_v(T) = \Delta h_v^0 - (C_{p1} - C_{pv}) T.$$

(a) Le premier terme du deuxième membre correspond à la montée en température respectivement du matériau bois et de l'eau qu'il contient. Selon la densité et la teneur en eau initiale, cette énergie correspond à environ 10–20% de l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau. De plus une grande partie de cette énergie est requise en début de séchage. Dans ces conditions, hors de la mise en régime thermique, c'est-à-dire après la première demi-heure, ces termes peuvent être négligés.

(b) Dans le second terme du deuxième membre, l'effet de la chaleur sensible de la vapeur peut être négligée devant la chaleur latente.

Le bilan se réduit alors à :

$$\dot{m}_{ve} C_{pv}(T_c - T_s) = \rho_0 v \frac{d\langle \bar{X} \rangle}{dt} \Delta h_v(T_p). \quad (9)$$

Cette équation montre comment la désurchauffe est reliée à la vitesse de séchage de la pile. On pourra passer de la désurchauffe à la cinétique par intégration ou de la cinétique à la désurchauffe par dérivation.

Dans ce cas, il ne faudra pas oublier que la dérivation amplifie le bruit expérimental. La méthode de dérivation utilisée a consisté à approximer, au sens des moindres carrés, un groupe de cinq points expérimentaux par une parabole. La dérivée est calculée au point centré sur une fenêtre contenant les cinq points. L'ensemble de la courbe est scruté par cette méthode grâce aux déplacements successifs de la fenêtre.

Bilan local selon van Meel [16]

Il s'agit d'une approche locale qui calcule $d\bar{X}/dt$ à partir de la courbe caractéristique. Elle repose sur un bilan instantané effectué sur une tranche dy de séchoir (ou de l'ensemble constitué par deux demi-lits de planches et l'espace confiné qui les sépare) situé à l'abscisse y de l'entrée.

L'intérêt de cette approche par rapport à l'approche globale réside dans le fait qu'elle permet de modéliser le séchage de la pile (désurchauffe) et l'évolution spatio-temporelle de l'humidité dans la planche uniquement à partir de la courbe caractéristique et des conditions de séchage.

La Fig. 6 montre la section droite d'abscisse y considérée. Son aire est $A = (e_1 + e_2)b$ où b est la largeur de la pile, e_1 l'épaisseur d'une planche et e_2 la distance entre deux planches.

Soient $d\bar{X}$ la variation d'humidité de la planche, $d\dot{m}_v$ la variation de débit massique de fluide suivant la tranche dy .

La conservation de la masse sur la tranche d'extension dy fait intervenir l'échange entre le bois et le fluide ainsi que la variation du flux convectif de vapeur entre l'entrée et la sortie de la tranche :

$$-\rho_0 e_1 b dy \quad d\bar{X} = d\dot{m}_v dt. \quad (10)$$

Compte tenu des ordres de grandeur des termes en présence, discutés dans le paragraphe précédent, le bilan enthalpique s'écrit :

$$d\dot{m}_v \Delta h_v(T) = -C_{pv} \dot{m}_v dT \quad (11)$$

où T est la température de mélange du flux de vapeur.

En considérant les expressions (10) et (11) et en exprimant les différences $d\dot{m}_v$ et dT par un développement au premier ordre, il vient

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = \frac{C_{pv} \dot{m}_v}{\rho_0 e_1 b \Delta h_v} \frac{\partial T}{\partial y}. \quad (12)$$

En adoptant l'approche fondée sur l'existence d'une courbe caractéristique $\bar{X} = \bar{X}_1 f(X^*)$, van Meel [16] écrit les équations (2) et (12) sous une forme adimensionnelle :

$$\frac{\partial X^*}{\partial t^*} = \frac{\partial \Pi}{\partial y^*} = -\Pi f(X^*) \quad (13)$$

où

$$\begin{cases} X^* = \bar{X}/\bar{X}_{cr} \\ \Pi = C_{pv}(T_c - T_{eb})/\Delta h_v \\ t^* = \frac{2\alpha t}{\rho_0 e_1 C_{pv} \bar{X}_{cr}} \\ y^* = \frac{2b\alpha y}{\dot{m}_{ve} C_{pv}} \end{cases} \quad (14)$$

Ce système d'équations permet la résolution spatio-temporelle des champs :

- de teneur en eau dans le matériau $\bar{X}(y, t)$
- de température dans la vapeur $T(y, t)$

connaissant la courbe caractéristique réduite de séchage $f(X^*)$, les conditions d'écoulement, les propriétés physiques du matériau et la géométrie du séchoir.

Il conduit à une description du séchage de la pile en trois périodes :

- toute la planche est en première phase de séchage à vitesse constante. $X^* \geq 1$
- une partie de la planche ou du lit ($y < y_{cr}$) est déjà en phase de vitesse de séchage ralentie ($X^* < 1$) et le reste $y > y_{cr}$ est encore en première phase ($X^* \geq 1$)
- toute la planche ou le lit considéré est en phase de vitesse de séchage ralentie.

La résolution du système (13) dans les trois domaines permet de déterminer les évolutions de $\bar{X}(y, t)$ et de $T(y, t)$. En particulier, nous pouvons accéder aux gradients d'humidité du matériau entre l'entrée et la sortie et surtout à la désurchauffe globale $\Delta T(t)$ sur la longueur L de la planche ou du lit de planches.

La résolution ne nécessite que la courbe caractéristique réduite de séchage $f(X^*)$ qui dépend de deux paramètres : \bar{X}_1 et \bar{X}_{cr} .

ETUDES EXPERIMENTALES DES DESURCHAUFFES—COMPARAISONS

Afin de simuler la configuration d'une pile de planche d'un séchoir industriel, la veine d'expérience de la soufflerie a été modifiée (Fig. 7).

La pile est simulée à l'aide de cinq planches de 27 mm d'épaisseur distantes de 20 mm. La planche centrale est pourvue de thermocouples et pesée en permanence. La mesure de la désurchauffe entre l'entrée et la sortie des canaux situés de part et d'autre de la planche centrale est effectuée à l'aide de thermocouples munis d'écrans disposés dans le plan médian de l'espace libre. Afin de limiter les perturbations sur la pesée, ces thermocouples sont fixés sur la planche fixe qui jouxte la planche centrale.

Trois essais ont été effectués et exploités complètement.

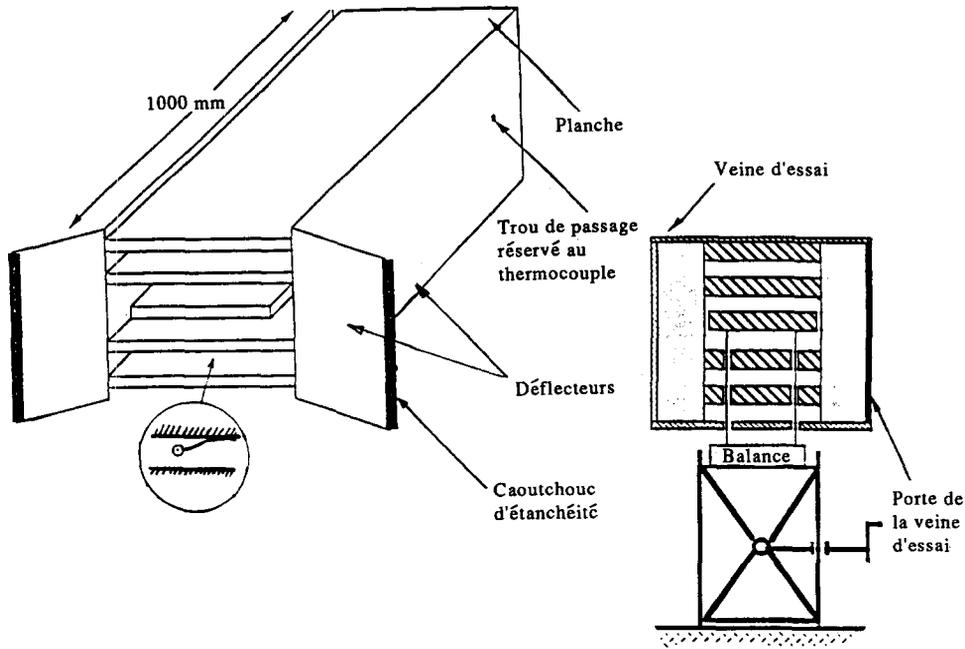


Fig. 7. Schéma du montage utilisé pour l'étude de la désurchauffe.

Pour permettre de travailler uniquement sur du 'bois d'aubier', la largeur des planches est supérieure à la largeur de la veine d'expérience, c'est pourquoi des déflecteurs latéraux délimitent les sous-canaux. Ils sont destinés à empêcher le contournement de la vapeur qui ferait perdre toute signification à la mesure de la désurchauffe.

Les cinétiques de séchage sont obtenues à partir du suivi de la masse de la planche centrale en fonction du temps et les désurchauffes par enregistrement direct des températures d'entrée et de sortie sur une centrale d'acquisition reliée à un micro-ordinateur.

D'après ce qui vient d'être présenté il est intéressant de comparer les évolutions temporelles de trois valeurs :

- (a) la désurchauffe expérimentale
- (b) celle déduite d'un bilan enthalpique global [cf. équation (9)] après dérivation de la courbe de séchage expérimentale
- (c) celle déduite de l'approche locale de Van Meel

qui ne suppose connus que les deux paramètres de la courbe caractéristique réduite de l'*Abies grandis*. Compte-tenu du Tableau 1, on prendra $\langle \alpha \rangle = 24 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et la valeur moyenne des \bar{X}_{cr} évaluée au cours de six essais en milieu infini : $\bar{X}_{cr} = 80\%$.

Essai 1	Essai 2	Essai 3
$V = 6 \text{ m s}^{-1}$	$V = 6 \text{ m s}^{-1}$	$V = 6 \text{ m s}^{-1}$
$T_e = 160^\circ\text{C}$	$T_e = 160^\circ\text{C}$	$T_e = 145^\circ\text{C}$
$\langle \bar{X}_i \rangle = 103.3\%$	$\langle \bar{X}_i \rangle = 174\%$	$\langle \bar{X}_i \rangle = 94\%$

L'essai 1 (Fig. 8) regroupe les résultats relatifs aux trois approches : expérimentale, semi-empirique obtenue à partir de la cinétique expérimentale $\langle \bar{X}(t) \rangle$ dérivée par rapport au temps et "théorique" obtenue

par simulation à partir de la connaissance de deux paramètres caractéristiques. Les évolutions de la désurchauffe globale en fonction du temps sont respectivement représentées par les courbes a, b, et c.

Pendant les 40 premières minutes les trois courbes sont très différentes.

Les valeurs les plus élevées sont obtenues avec la désurchauffe expérimentale (courbe a) qui, du point de vue énergétique, intègre : la chaleur latente de vaporisation, la chaleur sensible nécessaire à la mise en régime thermique et les pertes inhérentes au séchoir.

La désurchauffe calculée par dérivation de la cinétique expérimentale (courbe b) ne prend en compte que la chaleur latente de vaporisation. En tout début du procédé cette valeur est très faible. Elle peut même être négative du fait de la condensation qui a lieu dans les premiers instants.

La courbe donnée par le bilan local (courbe c) semble se situer entre les deux premières. En effet, elle ne prend en compte que la chaleur latente de vaporisation mais néglige la phase de mise en régime thermique. Le modèle considère que la vitesse de première phase est atteinte dès le début du séchage, ce qui est erroné ; ceci augmente artificiellement la durée du plateau qui résulte du séchage en régime établi au cours de la première période.

Pour $t > 100 \text{ min}$, les désurchauffes semi-empirique b et "théorique" c se situent respectivement à environ 2.5 et 3°C en-dessous de l'expérience en suivant donc une évolution quasi parallèle.

En fin de séchage ($t > 400 \text{ min}$) on remarque que les courbes b et c qui ne prennent en compte que l'énergie nécessaire au séchage tendent tout à fait logiquement vers zéro. La désurchauffe "théorique"

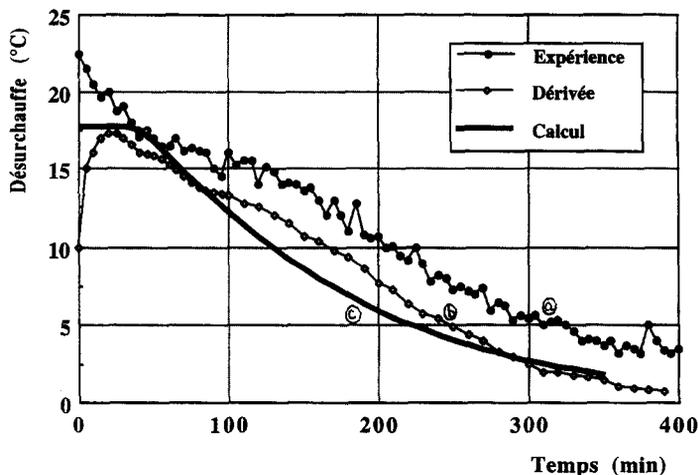


Fig. 8. Comparaison de la désurchauffe expérimentale aux désurchauffes calculées par dérivation de la cinétique et par la modélisation de van Meel ($T_e = 160^\circ\text{C}$ et $\bar{X}_i = 103.3\%$).

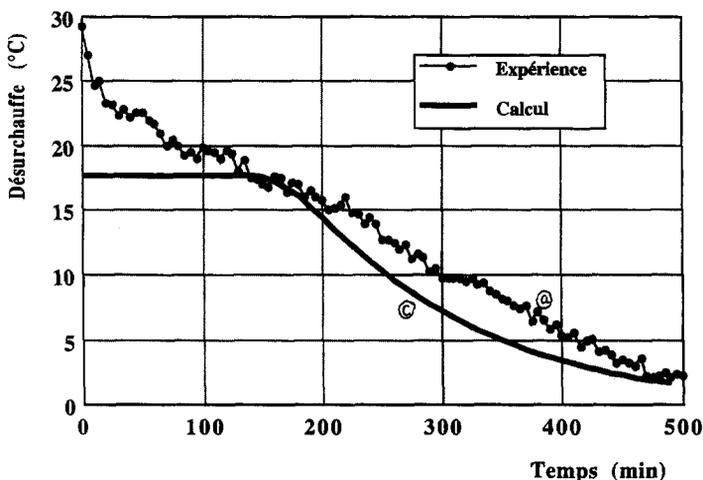


Fig. 9. Comparaison de la désurchauffe expérimentale et de la désurchauffe calculée par la modélisation de van Meel ($T_e = 160^\circ\text{C}$ et $\bar{X}_i = 174\%$).

semble s'équilibrer à une valeur proche de 2.5°C . Compte tenu du grand nombre d'expériences que nous avons faites dans la soufflerie, nous pouvons affirmer que cette désurchauffe correspond aux pertes thermiques. Elles sont bien sûr en valeur relative d'autant plus importantes que la vitesse de séchage est faible.

Pour obtenir une teneur en eau moyenne finale égale à 7.5%, le séchage doit être arrêté au bout d'un temps $t = 340$ min, valeur pour laquelle la désurchauffe 'théorique' est de 2°C et la désurchauffe expérimentale de 4°C . Le calcul montre que les écarts d'humidité entre l'entrée et la sortie de pile sont de 3.1% ce qui est en accord avec des résultats d'essais effectués dans un séchoir pilote semi-industriel.

L'essai 2 (Fig. 9) ne compare que les courbes a et c mais il confirme globalement les résultats obtenus au cours de l'essai n°1.

On note que la première période dure 140 min du fait de la très forte humidité initiale des planches

($\bar{X}_i = 175\%$) et que la deuxième période se termine à $t = 200$ min.

Cette forte humidité initiale augmente l'inertie thermique de la pile ce qui allonge la phase de mise en régime thermique. Il faut attendre 100 min pour que l'accord devienne satisfaisant.

Il se dégrade un peu pour $t > 250$ min mais on observe, comme dans le cas 1, que les évolutions des courbes a et c demeurent parallèles.

Cela confirme la valeur de l'ordre de 2°C pour les pertes thermiques non prises en compte dans la simulation.

Pour obtenir une teneur en eau moyenne finale à 7.5%, le temps de séchage est ici de 470 min, temps pour lequel la désurchauffe théorique est de 1.95°C et la désurchauffe expérimentale de 3.5°C .

L'essai 3 (Fig. 10) a été conduit à plus basse température et sur un matériau d'humidité initiale plus faible ($\bar{X}_i = 94\%$). En conséquence la première

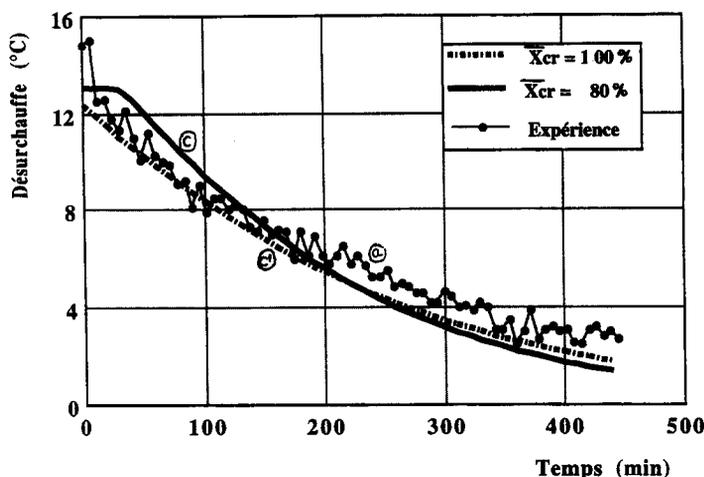


Fig. 10. Comparaison de la désurchauffe expérimentale et de la désurchauffe calculée par la modélisation de van Meel ($T_e = 145^\circ\text{C}$ et $\bar{X}_i = 94\%$).

Tableau 2. Caractéristiques principales des trois essais

	$\langle \bar{X}_i \rangle$ [%]	T_e [°C]	t_f [min]	$\Delta \bar{X}_f$ [%]	ΔT_{th} [°C]	ΔT_{exp} [°C]	$\Delta T_{th}/T_e - T_{eb}$
Essai 1	103,3	160	340	3.1	2	4	3.33×10^{-2}
Essai 2	174	160	470	5.4	1.95	3.5	3.32×10^{-2}
Essai 3	94	145	430	2.7	1.40	3	3.16×10^{-2}

période de séchage ne dure que 30 min et la désurchauffe théorique est plus réduite.

Contrairement aux deux autres essais, on note un croisement des courbes a et c pour $t = 150$ min. En conséquence, les évolutions parallèles des courbes ne sont obtenues qu'en fin de séchage ($t > 200$ min).

Dans ce cas, le déroulement du procédé n'étant apparemment pas bien traduit par la modélisation adoptée, nous avons fait varier le paramètre \bar{X}_{cr} qui prend en compte les transferts internes. La courbe c' donne l'évolution de la désurchauffe pour $\bar{X}_{cr} = 100\%$. On constate que l'accord avec l'expérience est bien meilleur et tout à fait comparable en qualité aux essais précédents. Il convient donc de garder à l'esprit que la teneur en eau critique pouvant sensiblement varier d'un lot de planches à un autre, l'influence de ce paramètre ne doit pas être passée sous silence. Elle est développée dans le paragraphe suivant.

Les trois essais sont synthétisés dans le Tableau 2 qui, pour une teneur en eau moyenne finale de l'ordre de 7.5%, donne: la teneur en eau moyenne initiale $\langle \bar{X}_i \rangle$, la température sèche d'entrée de la vapeur T_e , le temps de séchage t_f , l'écart d'humidité entre bord de fuite et bord d'attaque $\Delta \bar{X}_f$, la désurchauffe "théorique" ΔT_{th} déduits de la simulation ainsi que la désurchauffe expérimentale ΔT_{exp} et le rapport $\Delta T_{th}/(T_e - T_{eb})$.

L'analyse de ce tableau conduit à formuler les remarques suivantes :

Le temps t_f doit être considéré comme le temps au bout duquel on arrête la phase de séchage proprement dite, laquelle est suivie en général d'une phase de rééquilibrage qui n'est pas examinée ici.

L'hétérogénéité de la teneur en eau du produit $\Delta \bar{X}_f$ est relativement modérée dans la mesure où la teneur en eau finale considérée est faible. Cependant, elle est d'autant plus grande que la teneur en eau initiale est élevée.

La désurchauffe théorique calculée ΔT_{th} (imputable au séchage seul) doit être majorée d'un ΔT_{pertes} qui est induit par les pertes thermiques qui dépendent du séchoir.

Pour les essais 1-3 effectués en soufflerie dont la veine d'expérience était peu isolée, ΔT_{pertes} est compris entre 1.5 et 2°C.

Le ΔT_{th} variant de 2°C (essai 1) à 1.4°C (essai 3) nous avons recherché une justification de cet écart dans la différence des deux désurchauffes de vapeur à l'entrée: $T_e - T_{eb} = 160^\circ\text{C}$ (essai 1) et $T_e - T_{eb} = 145^\circ\text{C}$ (essai 3).

En effet, en fin de séchage on peut écrire la vitesse de séchage (2) moyennée sur toute la planche :

$$\langle \dot{X} \rangle = \dot{X}_i \langle f(X^*) \rangle \cong \dot{X}_i f(\langle X^* \rangle) = \dot{X}_i \frac{\langle \bar{X} \rangle}{\bar{X}_{cr}} \quad (15)$$

où

$$\dot{X}_1 = -\frac{2\alpha(T_e - T_{cb})}{\rho_o e_1 \Delta h_v} [\text{équation (13) avec } f = 1]. \quad (16)$$

Soit encore par un bilan global (sur la longueur L) :

$$\frac{\Delta T_{th}}{T_c - T_{cb}} = -\frac{2\alpha b L \langle \bar{X} \rangle}{C_{pv} \dot{m}_v \bar{X}_{cr}}. \quad (17)$$

En calculant ce rapport théorique pour $\langle \bar{X}_f \rangle = 7.5\%$ on trouve, pour les conditions des essais 1 et 2 (pour l'essai 3, à vitesse égale, le débit massique est supérieur de 3%) :

$$\frac{\Delta T_{th}}{T_c - T_{cb}} \cong 3.25 \times 10^{-2}.$$

Cette valeur est très proche des valeurs calculées dans le Tableau 1.

Le $\Delta T_{arr\acute{e}t}$ qui définit l'instant de fin de séchage est donné par une relation du type :

$$\Delta T_{arr\acute{e}t} = B(T_e - T_{eb}) + \Delta T_{pertes}. \quad (18)$$

Dans le cas de la soufflerie utilisée et pour une teneur en eau moyenne finale de 7.5% : on a $B = 3.3 \times 10^{-2}$ et $\Delta T_{pertes} = 1.75 \pm 0.25^\circ\text{C}$.

APPLICATION AU PILOTAGE D'UN SÉCHOIR

Dans la perspective du pilotage d'un séchoir à partir de la désurchauffe le problème se pose en d'autres termes. Pour un séchoir donné, il s'agit de savoir avec quelle précision la mesure de la désurchauffe permet de conduire le procédé et de le stopper judicieusement ; c'est-à-dire ni trop tôt (teneur en eau trop élevée), ni trop tard (perte de temps et d'énergie, dégradations mécaniques accentuées). L'objectif pratique est d'évaluer la vitesse de séchage à partir de la désurchauffe mesurée.

Cette étape fait intervenir deux sources d'incertitude :

- (a) La différence entre la désurchauffe mesurée ΔT_{mes} et celle qu'il faut attribuer au séchage seul ΔT_{th} .
- (b) La valeur de \bar{X}_{cr} , paramètre qui dépend du lot de planches concerné. Dans le cadre de l'approche simplifiée exposée ici, il est bon de rappeler que \bar{X}_{cr} est le seul paramètre qui permet de différencier les essences et les épaisseurs.

Par rapport à la désurchauffe mesurée, la désurchauffe due à l'évaporation seule sera obtenue en retranchant la désurchauffe induite par les pertes thermiques. Celles-ci seront évaluées après calibrage du séchoir pour chaque valeur de la température sèche utilisée.

Cependant, il n'est pas raisonnable d'espérer obtenir une incertitude de moins de $\pm 0.25^\circ\text{C}$ sur ce calibrage. Cette incertitude se reportera sur la valeur de ΔT_{th} calculée à partir de la mesure de la désurchauffe.

D'autre part nous avons précisé au début de cet

article que les teneurs en eau critiques identifiées sur de nombreux essais s'échelonnaient entre 60 et 100%.

Le Tableau 3, à double entrée, permet de préciser l'effet de ces deux incertitudes sur la teneur en eau finale lorsque l'arrêt du séchage (ou le début de la période de rééquilibrage) est décidée à partir de la mesure de la désurchauffe.

Ce tableau regroupe des simulations effectuées avec les données de l'essai 1 pour différentes teneurs en eau critiques et une humidité finale moyenne de 7.5%.

Sur chaque ligne apparaît : le temps de séchage, la désurchauffe théorique finale ainsi que les teneurs en eau finales obtenues avec une erreur de $\pm 0.25^\circ\text{C}$ (cas favorable) et de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (cas défavorable) sur la désurchauffe théorique finale.

On peut remarquer que, si \bar{X}_{cr} est connu, l'incertitude sur la teneur en eau finale reste modérée, elle varie de $\pm 0.7\%$ pour le meilleur cas ($\bar{X}_{cr} = 60\%$ et $\Delta T = \pm 0.25^\circ\text{C}$) à $\pm 0.25\%$ pour le cas le plus défavorable ($\bar{X}_{cr} = 100\%$ et $\Delta T = \pm 0.5^\circ\text{C}$).

En revanche, la désurchauffe dépend sensiblement de la valeur de \bar{X}_{cr} (de 1.5 à 2.5°C). Ainsi, fixer la valeur de la désurchauffe finale indépendamment de \bar{X}_{cr} peut conduire à des teneurs en eau finales variant de 6 à 10% pour $\Delta T_{th} = 2^\circ\text{C}$ (Tableau 4).

En cumulant les deux incertitudes ($60\% < \bar{X}_{cr} < 100\%$ et $\Delta T_{th} \pm 0.25^\circ\text{C}$), la teneur en eau finale pourra varier dans une fourchette de plus 3.5% à moins 2.5% par rapport à la teneur en eau désirée. Cette incertitude fixe bien les limites de ce principe de conduite des séchoirs : système simple à mettre en oeuvre, sans instrumentation des planches mais limité en précision.

Du point de vue de la conduite du séchoir, le temps total du procédé est le paramètre économique important. Tableau 4 indique le temps requis pour obtenir une désurchauffe théorique de 2°C pour les trois teneurs en eau critique (colonne 3). Comparé au temps de référence (temps nécessaire à l'obtention de la teneur en eau finale désirée), l'erreur commise reste modeste puisque toujours inférieure à $\pm 10\%$ du temps total.

Il est bon de signaler que ces résultats sont meilleurs que ceux présentés par Taylor et Landoch [19]. Ces derniers semblaient dire que la mesure de désurchauffe ne pouvait pas servir à piloter un séchoir. En fait, ils avaient négligé la possibilité de calibrer les pertes thermiques et ne fixaient pas la désurchauffe finale par rapport à l'écart entre température sèche et température humide.

Pour une application industrielle performante et adaptée, la désurchauffe expérimentale de fin d'essai sera obtenue en sommant la désurchauffe due à l'évaporation et la désurchauffe due aux pertes thermiques.

La première sera proportionnelle à la différence entre la température sèche et la température d'ébullition, le coefficient de proportionnalité étant fonction de la teneur en eau finale désirée comme indiqué dans la formule (17).

Tableau 3. Variations de la teneur en eau à l'arrêt du séchage

\bar{X}_{cr} [%]	t_f $\langle \bar{X}_f \rangle = 7.5\%$	ΔT_{thf} $\langle \bar{X}_f \rangle = 7.5\%$	\bar{X}_f			
			$\Delta T_{th} + 0.5^\circ\text{C}$	$\Delta T_{th} + 0.25^\circ\text{C}$	$\Delta T_{th} - 0.25^\circ\text{C}$	$\Delta T_{th} - 0.5^\circ\text{C}$
60	277	2.53	9.0	8.2	6.7	6.0
80	342	1.92	9.5	8.5	6.5	5.5
100	415	1.55	10.0	8.8	6.6	5.1

Tableau 4. Effet de l'humidité critique sur le temps de séchage

\bar{X}_{cr} [%]	$\langle \bar{X}_f \rangle$ [%] à $\Delta T_{th} = 2^\circ\text{C}$	t [min] à $\Delta T_{th} = 2^\circ\text{C}$	t_f [min] à $\langle \bar{X}_f \rangle = 7.5\%$	Erreur sur le temps de séchage [min]	$\Delta t_f/t_f$ [%]
60	5.9	299	277	+22	+8
80	7.8	338	342	-4	-1
100	9.7	377	415	-38	-9

La seconde sera évaluée par calibrage pour différentes températures, par exemple, par des essais effectués sur une pile sèche.

CONCLUSION

A la lumière des résultats obtenus, il ressort que la conduite d'un séchage par suivi de la désurchauffe de la vapeur entre l'entrée et la sortie de la pile de bois est une solution non seulement envisageable mais suffisamment fiable pour être appliquée industriellement.

Toutefois, la recherche d'une grande précision nécessite une bonne maîtrise des paramètres, causes d'incertitudes et une parfaite conscience des limites de l'approche compte tenu de la variabilité des teneurs en eau initiales des planches.

Il convient d'abord d'effectuer une caractérisation du matériau à l'aide des deux principaux paramètres que sont le coefficient d'échange de chaleur par convection déterminé (soit de façon empirique à partir des corrélations adaptées prenant en compte l'état de surface des planches et l'aérodynamique du séchoir, soit par voie expérimentale en évaluant la vitesse de séchage en première phase à l'aide d'un essai préliminaire) et l'humidité critique qui varie en fonction de l'essence, l'épaisseur des planches, de la localisation dans l'arbre, de la durée du stockage...

A partir de la formulation de van Meel, ces deux paramètres permettent de calculer la désurchauffe 'théorique' en fonction de la teneur en eau finale désirée.

L'arrêt du séchage (ou du changement de conditions) sera décidé lorsque la désurchauffe mesurée sera égale à cette désurchauffe 'théorique' majorée de la baisse de température due aux pertes thermiques.

L'évaluation de la précision de la méthode fait ressortir une incertitude de l'ordre de quelques pourcents sur la teneur en eau finale de la pile.

En dépit de cette incertitude, l'intérêt du pilotage du séchoir sur la désurchauffe de la vapeur à la traversée de la pile réside dans le caractère global qu'il donne sur l'état de la pile. En cela il est comparable à l'approche fondée sur l'utilisation de la cinétique de séchage qui nécessite d'une part une pesée, dont la précision est souvent limitée, et d'autre part une dérivation de la courbe expérimentale, qui peut induire des erreurs très importantes.

En revanche le pilotage sur la désurchauffe est une méthode très facile à mettre en oeuvre: capteurs de type industriel fiables, précis, fixés à demeure dans le séchoir et dont le coût est tout à fait raisonnable. Rajoutée sur un séchoir existant, cette instrumentation apporte des informations supplémentaires et complémentaires à celles généralement enregistrées. Elle permet notamment de s'affranchir de l'aspect trop local de mesures fondées sur le suivi de la résistivité électrique dont en général seulement quelques planches sont équipées.

Remerciement—Ce travail a été soutenu financièrement par la Région Lorraine et l'Electricité de France (Les Renardières).

REFERENCES

1. C. Basilio et M. Martin, Approche expérimentale des mécanismes de transport au cours du séchage convectif à haute température d'un bois résineux, *Int. J. Heat Mass Transfer* 27, 657-668 (1984).
2. P. Perre, M. Moser and M. Martin, Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam and moist air, *Int. J. Heat Mass Transfer* 36, 2725-2746 (1993).
3. D. P. Lowery, Measurement of vapor pressure generated in wood during drying, *Wood Sci.* 3, 218-219 (1971).
4. D. P. Lowery, Vapor pressure generated in wood during drying, *Wood Sci.* 5, 73-80 (1979).
5. J. Schmitt, Press drying of beechwood, *Forest Prod. J.* 17(9), 107-113 (1967).

6. J. N. Beard, H. N. Rosen and B. A. Adesanya. Temperature distribution in lumber during impingement drying, *Wood Sci. Technol.* **19**, 277–286 (1985).
7. R. Northway, Moisture profile and wood temperature during very high temperature drying of *Pinus radiata* explain lack of degrade upgrading wood quality through drying technology, IUFRO, Wood Drying Symposium, Seattle (1989).
8. M. A. Stanish, G. S. Schajer and F. Kayihan, A mathematical model of drying of hygroscopic porous media, *A.I.Ch.E. JI* **32**(8), 1301–1311 (1986).
9. J. G. Salin, Remarks on the influence of heartwood content in pine boards on final moisture content and degrade, IUFRO, Wood Drying Symposium pp. 4–6, Seattle (1989).
10. P. Perre and M. Martin, Understanding the drying at high temperature of sapwood and heartwood to improve kiln control. In *3rd International Wood Drying Conference* (Edited by M. Vanek), pp. 187–195. Vienne (1992).
11. A. Ranta Maunus, The viscoelasticity of wood and varying moisture contents, *Wood Sci. Technol.* **9**, 189–205 (1975).
12. S. Kawai, Moisture movement and drying stresses in wood, Doctorate of Agriculture, Kyoto University (1980).
13. S. Felix and P. Morlier, Modelling of stresses and strains in a piece of wood under drying, *Holtzforschung* No. **46**, 369–377 (1992).
14. A. Martensson, Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variation, Doctoral Dissertation, Lund University (1992).
15. O. Krischer and K. Kroll, *Technique du séchage*. Cetiati, Orsay (traduit du texte original de 1963).
16. D. A. van Meel, Adiabatic convection batch drying with recirculation of air, *Chem. Engng Sci.* **9**, 36–44 (1958).
17. M. Moser, Le séchage convectif à haute température. Observation des mécanismes à deux échelles: la planche et la pile, Thèse de Doctorat, INPL, Nancy (1992).
18. W. M. Kays, *Convective Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill, New York (1966).
19. F. W. Taylor and D. Landoch, TDAL profiles of southern pine lumber during drying, *Forest Prod. J.* **40**(10), 47–50 (1990).

EVOLUTION OF THE TEMPERATURE DROP ACROSS A STACK OF BOARDS DURING DRYING: IMPROVEMENT OF KILN CONTROL

Abstract—This paper aims to analyse the temperature drop (temperature loss of the superheated steam across a stack of boards) during convective drying of wood at high temperature. The study is based on measurements made in an adapted test section of an aerodynamic wind tunnel for simulating a stack of five (27 mm × 150 mm × 1000 mm) boards located parallel to the horizontal plane of symmetry of the test section and separated from one other by a 20 mm gap. The results are compared to those obtained from a global enthalpic balance (from the derivation of the kinetic drying curve) and to those resulting from the integration of a local enthalpic balance which needs the characteristic drying curve (van Meel model). The good agreement leads us to suppose that control of the drying by the temperature drop evolutions could be used. Nevertheless, two factors are sources of error: the heat loss inherent in the kiln and, in the case of wood, the variability of the characteristic drying curve. The effects of both parameters are quantified. It emerges from the study that, taking great precautions, the preciseness can be improved in such a way that kiln control by the temperature drop becomes possible. Taking account of the simplicity of implementing the temperature probes and of the global information it gives, the system can also be used as a complement of other existing devices.