

Séchage de bois scié sous vide

Le séchage sous vide : Quand et pourquoi ?

Dipl.-Ing. Reinhard Brunner

Cet article reproduit les trois parties de l'article paru dans Holz-Zentralblatt en 1999 (numéros 55,56, 57/58). Cet article a été publié par extraits à l'occasion de LIGNA 99.

Le séchage sous vide : Quand et pourquoi ?

Dipl.-Ing. Reinhard Brunner¹, Hanovre

L'auteur a publié lors de LIGNA 1997 l'article intitulé « Les jours du séchage conventionnel du bois débité sont comptés : La vapeur remplace l'air ». Une âpre discussion entre spécialistes s'en est suivie. Il est important et indispensable de la prolonger, en particulier à cause des séchoirs exposés à LIGNA 99, à la veille du nouveau millénaire. On y observe que depuis LIGNA 1997 aucun progrès décisif n'est apparu dans le séchage à air conventionnel. Les solutions des constructeurs leaders sont pratiquement les mêmes qu'à l'époque. On peut citer le gaspillage d'énergie et la pollution qui s'en suit, le séchage à l'air libre et ses inconvénients : surcoût, coloration, fentes, dégradation par les insectes, immobilisation de capital. Les dégâts dus au séchage comme les tensions, les déformations, les fentes, les colorations sont nombreux. Les temps de séchage beaucoup trop longs entraînent un manque de flexibilité pour pouvoir s'adapter aux nécessités d'exploitation et aux besoins du marché.

Il en va tout autrement du développement des séchoirs sous vide. Il présente un potentiel important que ce soit en matière de recherche ou pour la construction. De nombreuses possibilités de pilotage de l'installation s'offrent en vue d'un meilleur aspect et d'une moindre sollicitation du bois. En conséquence, les résultats du séchage peuvent être améliorés et le prix des séchoirs peut diminuer. Il y a à ce sujet une multitude de nouveautés à présenter. Ceci dépasse largement le cadre de cet article et seuls les points importants des aspects économiques décisifs seront traités ici.

Dans un comparatif économique entre le séchage conventionnel et le séchage à vide se pose la question, typique aux Etats-Unis : « when will I start making money with it », à partir de quand vais-je en tirer profit ? Il ne s'agit pas d'un calcul comparatif des deux systèmes, mais du retour sur investissement. En tant que spécialistes, nous savons à quel point il est difficile, avec la technique dominante du séchage à air, de prouver ce retour sur investissement par la prise en compte critique des coûts.

Impératifs techniques

Même pour les cas courants, il est nécessaire de définir les préalables, si on veut avec les séchoirs à vide obtenir une alternative complète et effective par rapport au séchage à air. Citons les conditions techniques fondamentales du séchage à vapeur sous vide qui, en raison de ses avantages, remplacera petit à petit le séchage conventionnel. Ceci concerne aussi bien les bois durs que les bois tendres de toutes épaisseurs.

De plus amples détails techniques sont décrits dans différents articles, en particulier ceux de l'auteur dans cette revue en [2, 3, 4]. Nous nous contenterons donc d'évoquer ici uniquement les nouveautés et les principes fondamentaux.

Le séchage à vapeur sous vide n'a pu percer par rapport au séchoir traditionnel, meilleur marché, qu'en raison d'innovations impressionnantes. Celles-ci permettent de fabriquer à moindre coût des séchoirs à vide de grands volumes et ce, malgré des difficultés techniques et économiques importantes (une pression extérieure de près de 10 tonnes sollicite chaque m² de paroi ! Sur des volumes importants, la répartition rapide de la chaleur sur le bois à sécher est extrêmement difficile à atteindre, en raison du manque d'air caloporteur.).

¹ L'auteur est le gérant du groupe Brunner, comprenant entre autres les constructeurs de tunnels de séchage HILDEBRAND HOLZTECHNIK GMBH et BRUNNER TROCKNENTECHNIK GMBH.

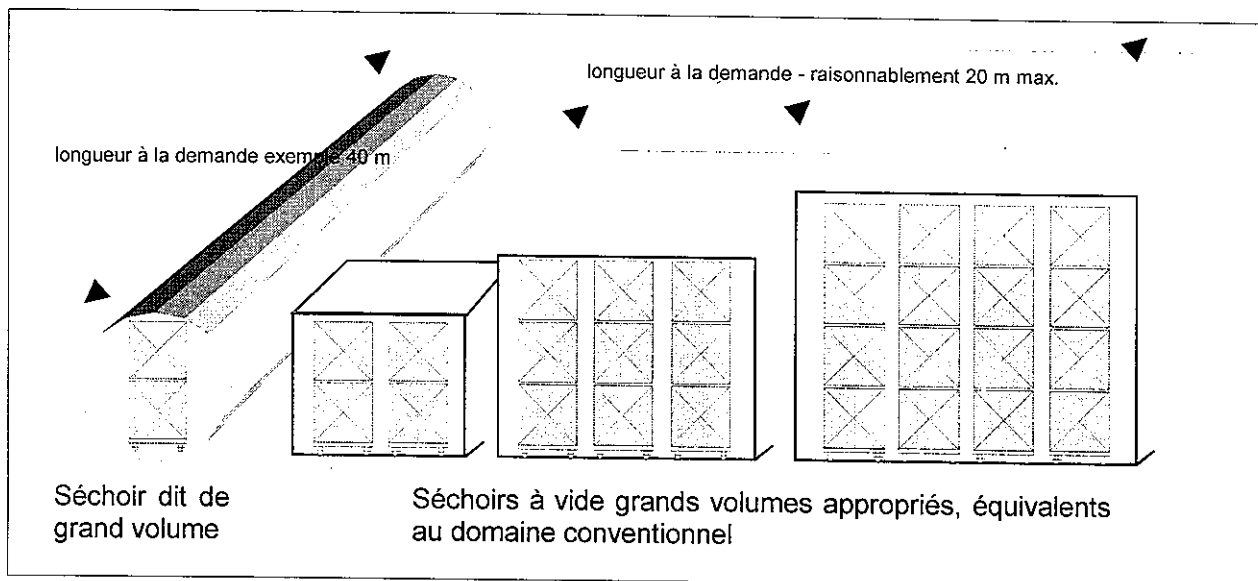


Fig.1: Tunnel rond avec un maximum de 2 billes en comparaison avec des séchoirs à vide à section rectangulaire

Naturellement, je ne parle pas ici des Jumbos, Goliaths ou autres méga-séchoirs, dans lesquels, on ne peut charger qu'un volume net de bois de 55 m³ dans un volume intérieur de 100 m³. Par leur géométrie inadaptée (par exemple 40, 80 voire 120 m de long), ils ne peuvent contenir que deux billes dans leur section. L'obtention d'une arrivée d'air uniforme nécessite un nombre de ventilateurs énorme (40 ventilateurs pour 40 m) pour obtenir. En raison de leur coût d'achat, du coût de manutention, de leur consommation énergétique, ils ne peuvent constituer une alternative à un séchoir conventionnel bien proportionné.

Un vrai tunnel de séchage à vide de grande capacité offre les mêmes possibilités de dispositions des billes en largeur et en hauteur qu'un bon séchoir à air. On peut y introduire 4, 6, 9, 12 ou 16 billes dans la section. A l'image des séchoirs conventionnels, ces séchoirs conçus en tronçons préfabriqués peuvent être assemblés sur site. L'étanchéité nécessaire est obtenue par soudage, bridage ou par l'emploi de nouveaux matériaux.

Fig. 2: Montage d'un tunnel circulaire de séchage à vide de grande capacité HIGH VAC® - avec un passage de 9 billes, sur 3 rangées et une longueur utile de 21 m Volume utile d'environ 260 m³. Photo HILDEBRAND HOLZTECHNIK GMBH

Fig. 3: Le nouveau HIGH-VAC® avec 2, 4, 6, 9, 12 ou 16 billes de section rectangulaire (ici en version 4 billes). Volume utile 10-400 m³. D'apparence similaire à un séchoir à air, il peut sécher de deux à sept fois plus rapidement. Photo HILDEBRAND HOLZTECHNIK GMBH

Dans le cas général, la comparaison porte sur un séchoir conventionnel et un séchoir sous vide de même géométrie, avec des dimensions intérieures identiques, la même disposition et la même composition des billes. On obtient ainsi la souplesse nécessaire, en fonction des essences et de la dureté des bois à traiter, malgré des contraintes de qualité, différentes à chaque chargement. Les délais d'exploitation se définissent de façon optimale en fonction des délais d'achat et de vente du bois, du temps de séchage et de la tenue des stocks. Ces éléments servent à définir la taille du séchoir. Pour chaque exploitation, on peut définir la plage de capacité économique du séchoir. Dans le cas de séchoirs multiples, il est conseillé dans la plupart des cas, de les choisir de tailles différentes.

On peut aussi imaginer de comparer les deux techniques en prenant pour base le même volume annuel. Si, pour une essence et une épaisseur de bois définie, on suppose qu'un séchoir à vide de 40 m³ a une vitesse de séchage trois fois plus élevée que celle d'un séchoir conventionnel, celui-ci aurait une capacité de 120 m³. Compte tenu des critères de qualité de séchage et de la flexibilité nécessaire, ceci serait sans intérêt pour la plupart des exploitations. Ce séchoir conventionnel s'avérerait inadapté. C'est pourquoi la comparaison se fait en règle générale à volume de séchage égal. La comparaison de coûts sur les applications à gros débits, où ne sont séchées qu'une à deux catégories différentes (essence, épaisseur, degré hygrométrique initial), pourra se faire par rapport à un séchoir de grande taille de préférence à deux ou trois petits. En effet les coûts au m³ des grands séchoirs traditionnels sont moindres.

Un fait est certain : Si pour un même volume, un séchoir à vide était au même prix d'achat qu'un séchoir conventionnel, n'importe quel investisseur devrait se décider pour le séchoir à vide, même pour sécher du sapin de 25 mm. Les avantages vont sans aucun doute tous dans le même sens : temps de séchage nettement plus court, qualité de séchage supérieure, meilleure conservation de la couleur en particulier grâce à l'absence d'oxygène, baisse de consommation électrique et de chaleur.

Malheureusement la pression d'air n'agit pas dans le même sens. Les 9 tonnes de pression par m² de paroi de séchoir, soit 2000 tonnes (!) Pour un séchoir de seulement 35 m³ de bois exigent une construction statique particulièrement solide. Il en résulte une augmentation des coûts de fabrication par rapport aux séchoirs conventionnels. On atteint alors très rapidement des rapports prix/débit antiéconomiques.

Les séchoirs de petits volumes peuvent facilement se réaliser sous forme d'un tube inox de 2 à 4 m de diamètre. Pour des volumes croissants, ces diamètres atteignent rapidement 6 m (pour des sections de 9 billes), voire 10 m. Ce sont des valeurs démesurées et peu rentables pour la construction, le transport et le montage sur site.

Par ailleurs, et pour des raisons de géométrie, les volumes morts sont inévitables et il faut bien les payer. La mise en ligne de plusieurs séchoirs entraîne des surcoûts en cloisons supplémentaires et en perte de place et d'énergie.

Tunnels à section rectangulaire comme les séchoirs conventionnels

Pour ces raisons, les grandes capacités imposent le recours à des tunnels de forme rectangulaire à l'image des séchoirs conventionnels. A ceci s'ajoutent d'autres contraintes telles que la tenue à la corrosion, la durée de vie, un montage simple et des conditions de transport favorables.

La tendance des prochains développements s'oriente vers une construction en inox ou vers des solutions tout aluminium au détriment de la construction en acier peint.

Inox ou aluminium ? Des particules de bois agressives, associées à la température et à la condensation peuvent entraîner une corrosion significative des inox faiblement alliés. Pour de nombreuses essences, il n'est donc pas possible de garantir une résistance durable à la corrosion, et ce malgré un badigeonnage ou un rinçage soigneux.

On doit alors recourir à des aciers fortement alliés (par exemple 1.4539 ou avec du titane 1.4541)

De bons alliages d'aluminium ont fait leurs preuves depuis 50 ans dans la tenue à la corrosion sur des séchoirs à bois. Des caractéristiques mécaniques plus faibles que celles de l'acier peuvent être compensées par des épaisseurs sensiblement plus fortes ou par des renforts de construction comme cela a été éprouvé en construction aéronautique, automobile ou sur les TGV.

Un séchoir à vide en aluminium de grandes dimensions ne supporte la concurrence avec un séchoir conventionnel qu'avec l'utilisation de certains composants techniques comme les profils d'aluminium extrudés spécifiques produits en grande quantité, les grilles, goussets et pièces embouties. Tous ces composants sont assemblés de façon modulaire pour composer le séchoir (comparer avec la Fig.3, page 4).

Les portes

L'extrême pression extérieure nécessite des portes blindées. Sur une section à 9 billes, une porte ne peut être fermée qu'à l'aide d'une motorisation à fermeture latérale. L'utilisation d'une porte battante, comme sur les petits tunnels, est à proscrire à cause du gaspillage de place du au battement. Une construction manuelle en aluminium reste possible pour des portes individuelles par rangée. Le montage de rails d'alimentation sur les séchoirs à vide d'aujourd'hui permet une ouverture porte par porte. Ceci permet un fonctionnement continu, une manipulation notablement plus simple que sur les séchoirs conventionnels et diminue le refroidissement lors du rechargement. Bien sûr de telles réflexions s'appliquent aussi au chargement par chariot élévateur sur les tunnels à section rectangulaire. Cette option est malheureusement trop chère pour les sections circulaires. Elle est également inadaptée à une exploitation continue.

La transmission de chaleur : un point particulièrement délicat

Le pouvoir caloporteur du fluide de séchage (dans notre cas la vapeur) diminue de façon à peu près proportionnelle à la chute de pression. Pour cela la vitesse de débit de vapeur doit être beaucoup plus élevée (environ 10 fois, c'est à dire 20 à 40 m/s) et beaucoup plus régulière (absence de diffusion) que sur les séchoirs conventionnels. Voir détails en [2, 4]. Pour ceci, il est nécessaire de prévoir des ventilateurs de gros diamètres. Des pales de 100 cm de diamètre permettent un débit environ du double par rapport à la plupart des ventilateurs de 80 cm utilisés aujourd'hui et une quantité de vapeur quatre fois plus importante qu'avec un ventilateur de 60 cm. Des essais sont en cours pour augmenter la vitesse de la vapeur au moyen de convertisseurs de fréquence en augmentant les vitesses (par exemple à 60 Hz au lieu de 50) plutôt que le diamètre des pales. Ce n'est pas recommandé, car la puissance nécessaire pour le moteur croît proportionnellement au cube de la vitesse et devient un non-sens économique.

Les convertisseurs de vitesse et les séchoirs à vide

L'utilisation de convertisseurs de fréquence aux seules fins d'économie d'énergie n'est recommandée que sous certaines conditions. En 1983 l'auteur avait déjà écrit un rapport sur les importantes possibilités d'économie d'énergie pour le séchage conventionnel du bois [1]. Il avait fixé les règles et édité un logiciel encore utilisés aujourd'hui. Il a alors fallu presque 5 ans pour que les convertisseurs de fréquence fassent partie de l'équipement standard d'un séchoir à air.

Malheureusement en pratique, on trouve de nombreux séchoirs conventionnels qui ne parviennent qu'à une économie de façade avec un fonctionnement « exagéré » du variateur. Globalement ils n'apportent pas de bons résultats : les temps de séchage sont trop longs et le taux d'humidité final irrégulier, à cause d'une vitesse d'air trop faible et irrégulière.

L'économie d'énergie obtenue avec une variation de fréquence sur les séchoirs à vide se monte au maximum à 1/3 de celle d'un séchoir conventionnel, car la consommation électrique même

sans convertisseur chute par exemple de 3 kW à 1 kW sous 100 mbar. Le convertisseur ne permet d'économiser que 10 à 20% de plus. Par contre le convertisseur présente d'autres inconvénients :

- a) Perturbation du réseau (Montage de selfs de filtrage onéreuses)
- b) Risque de panne du convertisseur à base d'électronique fragile
- c) Coût d'approvisionnement du convertisseur et du blindage des conducteurs
- d) Rendement du convertisseur de 95 à 97 % (perte de 3 à 5 %)

Une économie d'énergie plus importante peut être obtenue grâce à la commande judicieuse d'un ventilateur en fonction des phases de séchage, à l'augmentation du diamètre des pales et à la programmation de périodes de fonctionnement du ventilateur pendant les périodes de chauffe. Ces périodes de chauffe sont asservies à des mesures de température du bois en dessous de 200 mbar. Les capteurs de température dans le bois permettent aussi de définir la fin des phases de séchage.

Le taux de fonctionnement du moteur sans variateur avoisine 100% et le réseau n'est pas perturbé. Les arrêts éventuels de l'installation par suite d'une panne de variateur sont éliminés et la fiabilité s'en trouve améliorée.

Avant tout, on obtient sur toutes les rangées un débit de vapeur plus homogène et une saturation relative de vapeur fiable à une vitesse élevée. Ces conditions sont indispensables pour obtenir un séchage rapide et un taux d'humidité final régulier. Elles ne peuvent être obtenues avec un fonctionnement à convertisseur de fréquence et avec des ventilateurs de faible diamètre.

Toute une série d'équipements complémentaires sont indispensables pour une exploitation économique et sans faille des séchoirs à vide. Parmi ces équipements on peut citer tous les éléments relevant du contrôle des procédés.

Comparaison des coûts par rapport aux séchoirs conventionnels

Nombreux sont les spécialistes et les constructeurs qui pensent que le séchoir à vide, tout comme le séchoir à condensation d'il y a 20 ans, ne peut supplanter le séchoir conventionnel, en raison de son coût d'achat. Il devrait donc se situer dans une niche, réservée à quelques cas particuliers, principalement aux bois durs de forte épaisseur, sensibles à la couleur. Ils oublient malheureusement que les coûts d'achat ont chuté de façon démesurée, continuent à chuter et que seul le rapport prix / performances décide les acheteurs. Des calculs comparatifs issus de la pratique fournissent les éléments de base utiles et concrets pour emporter la décision.

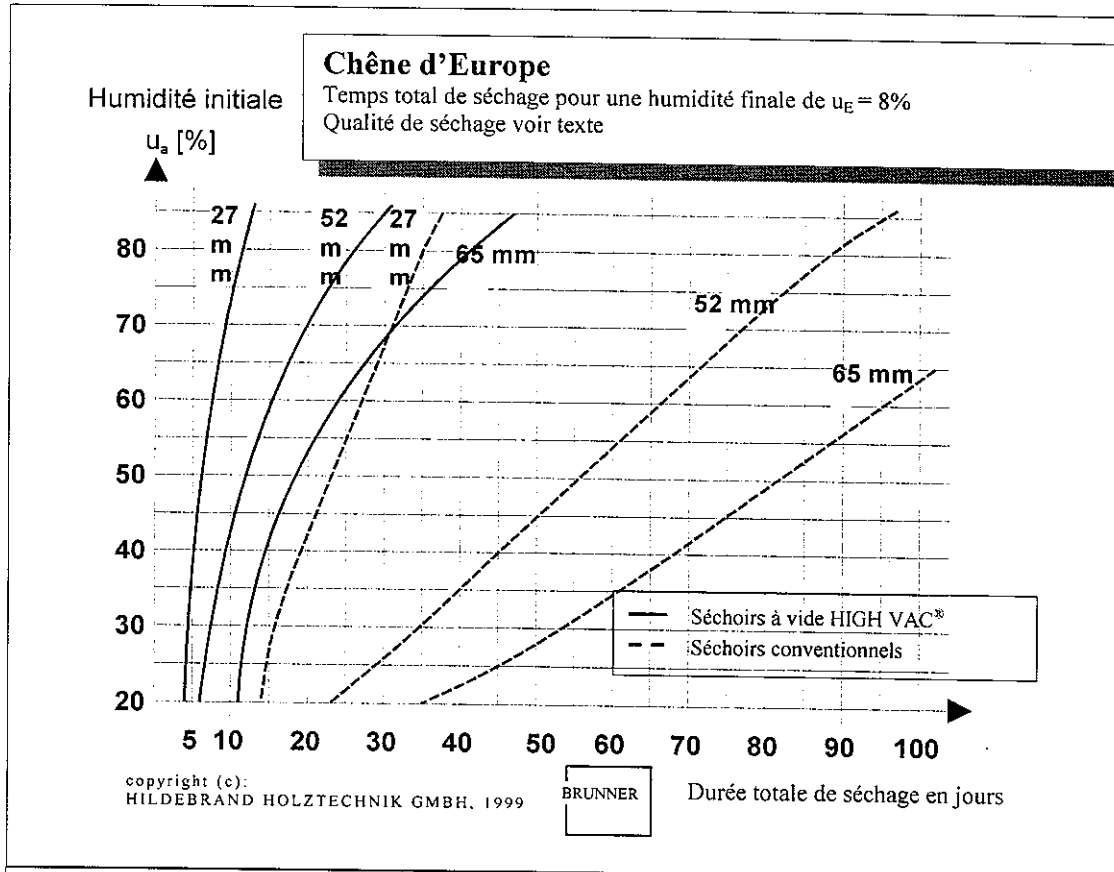
Toute comparaison ne peut être sérieuse si elle fait état de cas particuliers. Elle ne peut l'être qu'en s'appuyant sur un maximum de cas pratique. Ceci prévaut en particulier pour le thème hasardeux mais décisif de la durée de séchage, eu égard à sa qualité.

Temps de séchage obtenus pour une qualité déterminée

Depuis 1993, plus de 50 séchoirs de tailles diverses, dont 25 séchoirs à vide, ont été observés par modem et analysés par logiciel. Environ 1200 cycles de séchage de chênes, de hêtres, de sapin de 27 à 240 mm d'épaisseur ont permis d'étudier systématiquement la durée de séchage, la dispersion du taux d'humidité finale, la courbe de température du bois, le comportement du séchage et du tunnel, etc. De plus dans environ 350 cas, les exploitants ont été interrogés dès la fin du cycle sur place, par téléphone, par télécopie ou par courrier. L'enquête détaillée a porté sur les déformations de tous types, les décolorations ou les fissures. Ces résultats ont été rapprochés des procédés de séchage correspondants. Cette étude a été enrichie par celle du séchage sous vide d'autres essences dont le frêne, le pin, diverses espèces d'érables ou de chênes, le châtaignier, diverses espèces d'eucalyptus ou de bois exotiques de toutes épaisseurs.

C'est la première fois qu'une étude aussi complète et aussi ciblée est réalisée dans ce domaine. Elle donne des résultats pratiques de séchage en fonction des essences et des épaisseurs et offre une base de comparaison entre séchage conventionnel et sous vide. Les résultats ont été comparés aux données de séchage disponibles pour ces essences avec des séchoirs d'autres fabrications. On a pu en déduire les courbes et les tableaux aux résultats représentatifs suivants.

Fig. 4: Temps de séchage du chêne en séchoirs à vide ou conventionnel



Nombre de séchages / chargements annuels, (320 jours/an), y compris chargement / déchargement (4 à 8 heures selon taille du tunnel):

		27 mm	52 mm	65 mm
u_A = fraîchement scié	Air	9,1	3,6	2,2
$u_E = 8\%$	HIGH VAC	25,9 - 26,3	11,7 - 11,8	7,6
$u_A = 40\%$	Air	15,7 - 15,9	7,1	4,6
$u_E = 8\%$	HIGH VAC	54,9 - 56,5	36,2 - 36,9	22,3 - 22,6

Tableau 1: Coût de séchage du chêne en séchoirs à vide ou conventionnel

Vous trouverez l'évaluation de ces figures, les courbes de séchage correspondantes et les calculs de coût pour le hêtre et le sapin dans la suite de cet article.

Interdépendance de la durée et de la qualité de séchage

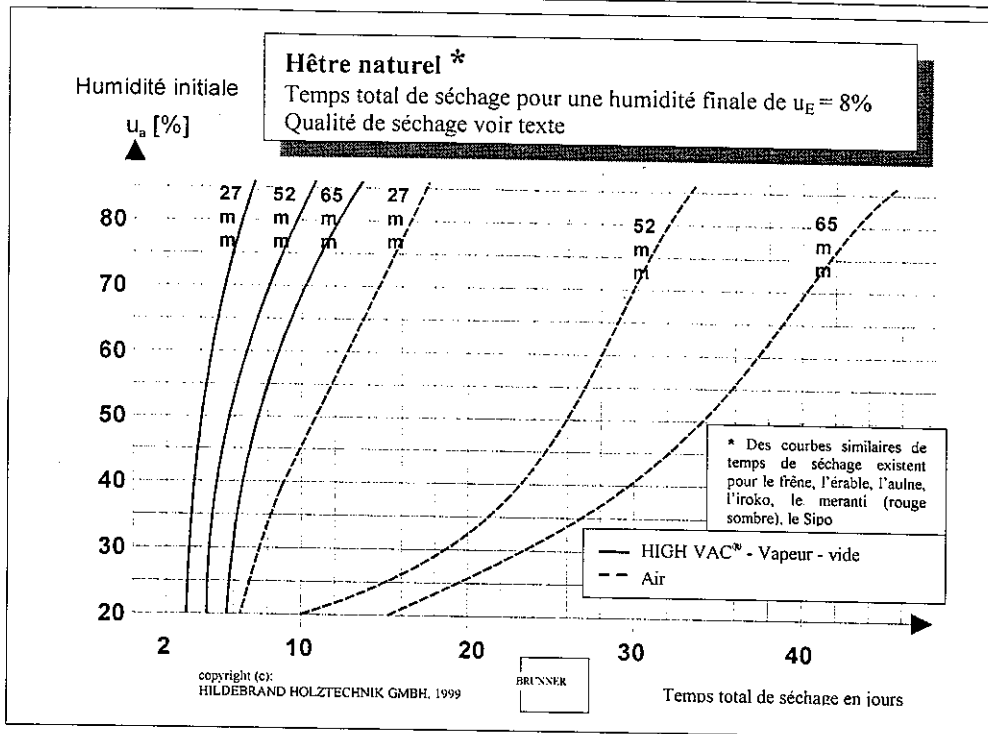
Dans certaines limites, des consignes de température et de vitesse de séchage rapides permettent des durées de séchage très réduites. Malheureusement elles entraînent aussi des défauts de qualité liés au séchage : déformations, fissures, écarts d'hygrométrie, décolorations, tensions. Bien avant le séchage, d'autres défauts résultent d'un stockage prolongé du bois débité ou en grumes pendant des mois ou des années.

C'est pourquoi les fabricants de tunnels de séchage doivent être en mesure de mener une marchandise trop sèche, mouillée ou fraîchement débitée, au niveau d'hygrométrie souhaité. On attend d'eux qu'ils le fassent à bon marché et de façon fiable. En cela le séchage à la vapeur sous vide apporte les meilleures caractéristiques physiques de séchage. Le séchoir lui-même doit être doté d'importants équipements techniques spéciaux [4].

Pour obtenir les comparaisons de coûts correspondantes, il y a lieu de définir la qualité de séchage finale du bois. Ici interviennent presque exclusivement les valeurs de consignes de température et de rapidité de séchage qui influencent directement le temps de séchage. Compte tenu de la tendance en faveur d'une qualité croissante, les valeurs de consignes des séchoirs conventionnels sont définies de façon plus précise et plus prudente qu'il y a quinze ans. De même, pour le sérieux de cette étude portant sur 1 200 cycles de séchage, l'ensemble des courbes a fait l'objet d'une définition prudente des paramètres. Ceci ne signifie pourtant pas que tous les séchages ont été réalisés en vue d'une qualité exceptionnelle. Pour cela, il est nécessaire de s'accommoder d'un prolongement du temps de séchage de 10 à 30 % (par exemple en vue d'obtenir un hêtre naturel clair, particulièrement demandé aujourd'hui). D'un autre côté, des exigences de qualité moindres et des réglages plus rapides autorisent des durées plus courtes. C'est d'autant plus vrai pour les bois qui se prêtent bien au séchage sous vide (par exemple le hêtre, bois perméable). Les spécificités de différents bois de même nature influent également sur le temps de séchage (provenance, poids à l'état sec...).

Pour le séchage sous vide, certains constructeurs annoncent des durées de séchage irréalistes de 30 voire 40 % en deçà des durées de séchage constatées. L'exploitant devrait relativiser ces données. Voici quelques explications :

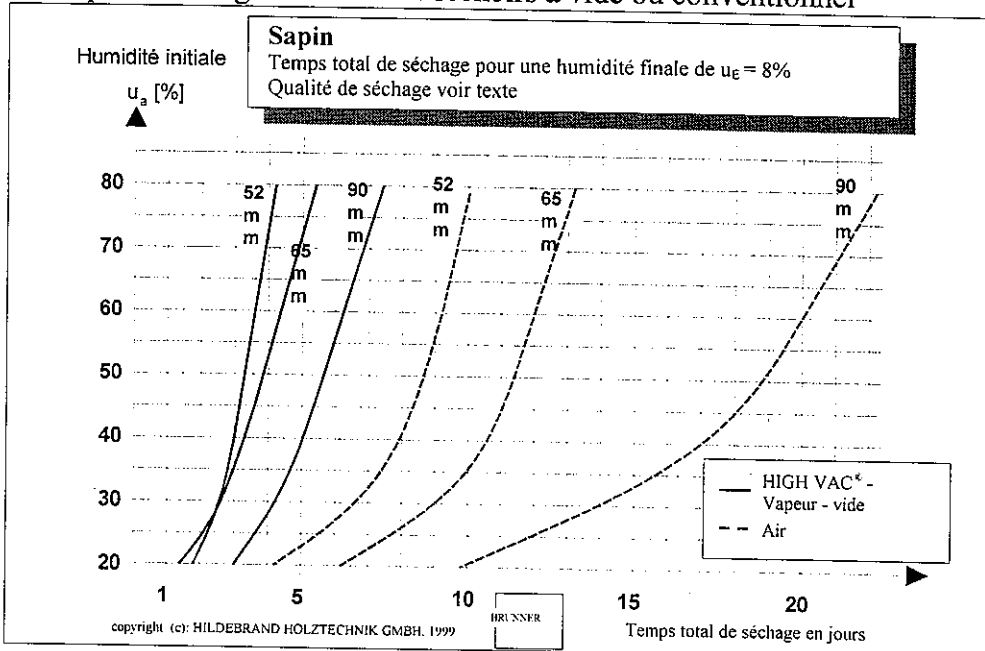
- Mesures imprécises de l'hygrométrie initiale (en particulier pour des humidités importantes, tenir compte de la durée de préstockage)
- Erreurs de mesure de l'hygrométrie finale (moyenne, cœur, ...)
- Points de mesure non représentatifs
- Séchage dans des séchoirs trop petits ou de laboratoire, avec des équipements techniques sur dimensionnés
- Temps de conditionnement trop courts ou inexistant
- Critères de qualité négligés



Nombre de séchages / chargements annuels, (320 jours/an), y compris chargement / déchargement (4 à 8 heures selon taille du tunnel) :

		27 mm	52 mm	65 mm
$u_A =$ fraîchement scié $u_E = 8\%$	Air	20,2 - 20,4	9,6	7,1
	HIGH VAC	43,6 - 44,7	28,2 - 28,7	24,0 - 24,3
$u_A = 40\%$ $u_E = 8\%$	Air	34,3 - 34,9	13,7 - 13,8	10,5 - 10,6
	HIGH VAC	83,5 - 87,3	60,0 - 61,9	44,9 - 45,9

Fig.5: Temps de séchage du hêtre sur séchoirs à vide ou conventionnel



Nombre de séchages / chargements annuels, (320 jours/an), y compris chargement / déchargement (4 à 8 heures selon taille du tunnel) :

		52 mm	65 mm	90 mm
$u_A =$ fraîchement scié $u_E = 8\%$	Air	31 - 31,5	23,1 - 23,4	14,3 - 14,4
	HIGH VAC	67,6 - 70,1	54,9 - 56,5	40,9 - 41,7
$u_A = 40\%$ $u_E = 8\%$	Air	38,4 - 39,2	29,5 - 30	18,5 - 18,6
	HIGH VAC	90,6 - 95,0	83,5 - 87,3	60 - 61,9

Fig.6: Temps de séchage du sapin sur séchoirs à vide ou conventionnel

Sur les diagrammes figurent les temps de séchage pour une sélection de sections. Par exemple pour le séchage d'un bois de construction de 90 mm, la courbe du sapin donne 11 jours en séchoir conventionnel contre 4 jours en séchoir à vide, en ramenant l'hygrométrie de 70 % à 20 %. En raison de la moindre qualité du bois de construction, ces valeurs peuvent encore être diminuées.

Les courbes donnent des qualités de séchages à peu près équivalentes en séchage conventionnel ou à vide. Toutefois, à temps de séchage et de conditionnement égal, les tensions sur les planches en fin de séchage sont plus faibles avec le vide. Pour des humidités inférieures à 12 %, on constate un léger écart d'humidité entre le cœur et la moyenne (1/3 de l'épaisseur). Pour de nombreuses essences, la meilleure conservation des couleurs et une plus faible propension aux fissures jouent également en faveur du vide.

Calculs de prix réalistes

Dans de nombreuses exploitations, le séchage du bois reste aujourd'hui encore peu lucratif. Il est souvent impossible d'atteindre une meilleure qualité avec les séchoirs conventionnels et d'en tirer ainsi de meilleurs revenus : Ou il manque une preuve convaincante, ou les clients n'achètent qu'en fonction du prix. Il reste à voir si ces difficultés ne s'accroissent pas en présence d'un nécessaire effort de normalisation d'assurance qualité (ISO, directives, normes), si celle-ci impose une base de travail généralisée.

À côté des améliorations de qualité, le séchage à vide présente des avantages décisifs par une plus faible immobilisation de capital (stock de bois) et surtout par une flexibilité accrue avec une mise à disposition rapide, attendues par la clientèle. Malgré leur importance, ces avantages ne sont pas pris en compte dans les comparaisons de coûts entre le séchage à vide et le séchage conventionnel. Dans la comparaison, les deux modes de séchage sont présentés avec les mêmes équipements, le même volume utile et les mêmes bases de coûts fixes et variables.

Finalement, la possibilité est laissée au lecteur de prendre en compte les avantages subjectifs du séchage à vide pour son exploitation. Les tableaux comparatifs lui permettront de trouver sa propre rentabilité et donc de choisir le bon séchoir.

Comparons en premier lieu le prix d'un séchoir à vapeur sous vide HIGH VAC® comprenant ordinateur, modem, régulation de vitesse de rotation, local de commande, avec un séchoir conventionnel de même taille, équipé de même. La comparaison s'appuie sur les prix en cours du marché pour la même configuration et un bois de même essence, même épaisseur, même hygrométrie.

[Prix en DM]	Séchoir à vide		Séchoir conventionnel	
Volume utile brut	95 m ³	140 m ³	95 m ³	140 m ³
1992	510.000	840.000	110.000	115.000
1997	420.000	710.000	100.000	105.000
1999	290.000	335.000	100.000	105.000

Tableau 2: Comparaison des coûts d'installation d'un séchoir à vide et d'un séchoir conventionnel (HIGH VAC®: marque déposée de Brunner Trockentechnik GmbH)

Ces quelques chiffres mettent déjà en évidence les éléments suivants :

1. Les prix des séchoirs conventionnels sont au « plancher ». Aujourd'hui, face à une dure concurrence, les constructeurs ne peuvent plus tenir leurs prix qu'en « dégraissant » leurs installations (par exemple avec des parois toujours plus minces ou un abaissement des

performances ventilateur / température). La recherche et le développement sont bloqués, ceci au désavantage de l'utilisateur.

2. Tout comme les séchoirs conventionnels dans les années 1975 à 1990, les séchoirs à vide offrent un potentiel d'économie important. Ces économies, réalisées grâce à une fabrication en série, vont permettre une baisse des prix dans les années à venir.

Comme il faut s'y attendre, le séchoir à vide est appelé à couvrir une part croissante de la demande. La perspective d'une baisse de prix dans un rapport de 2 à 2,5 est parfaitement réaliste. Pour les petits séchoirs, par exemple pour le bois de construction, ce rapport peut encore chuter de 1,5 à 1,8. En conséquence, il faut s'attendre à une concentration des fabricants, où seuls quelques entreprises pourront supporter les investissements nécessaires à la recherche, au développement et à la fabrication afin d'atteindre ce rapport prix / performances.

Tableau 3: Coûts comparés du séchage du hêtre sur séchoirs à vide et conventionnels

Tableau 4 Coûts comparés du séchage du sapin sur séchoirs à vide et conventionnels

Commentaires des tableaux de coûts pour le chêne, le hêtre et le sapin de toutes épaisseurs

Un commentaire ne se justifie que dans les grandes lignes, tant les tableaux 2, 3 et 4 correspondent aux analyses habituelles et les chiffres parlent d'eux-mêmes.

Les tableaux se lisent de la façon suivante : Dans chaque colonne, un séchoir conventionnel (colonne de gauche) est comparé à un séchoir à vide (colonne de droite). Les séchoirs ont le même volume utile et la comparaison est faite avec des bois de l'épaisseur donnée. Les lignes 1 à 7 donnent le détail des coûts de l'installation en rapport avec le montage et l'exploitation. La ligne 8 cumule le montant total de l'investissement. On en déduit, lignes 9 et 10 les coûts fixes annuels. Les lignes 11 à 15 donnent les coûts variables annuels, pour lesquels plages de séchage et combustibles ont été judicieusement différenciés. Les coûts totaux fixes et variables apparaissent lignes 16.1 à 16.4. La charge annuelle correspondant aux courbes de séchage, publiées dans cet article, est donnée ligne 17 à 17.1. Les coûts de séchage par m³ de bois ressortent lignes 18.1 à 18.4.

Remarque : Il n'a pas été tenu compte de quelques coûts répartis peu significatifs, comme les chariots élévateurs, taxes, assurances, immobilisation des terrains. Ceux-ci seraient en faveur des séchoirs à vide (ou neutres en ce qui concerne les chariots élévateurs). S'agissant tout d'abord d'une comparaison entre séchage à vide et séchage conventionnel et d'une décision d'achat en faveur ou non du séchage à vide, les variations de ces éléments dans des limites habituelles restent sans effets sur la décision.

Les tableaux comprennent une colonne libre pour vos propres données. Naturellement chaque exploitant devrait procéder à sa propre évaluation des paramètres a à f, ceux-ci pouvant revêtir une importance pour sa rentabilité.

Pour l'obtention de chiffres absolus de retour et de rentabilité de l'investissement ou du séchage en sous-traitance, les valeurs personnelles et réelles de l'exploitation sont déterminantes. En dernier lieu, face aux économies réalisées lors de l'achat de marchandise brute de sciage, il y a lieu de prendre aussi en compte les avantages immatériels. Ces derniers dépendent de l'entreprise et sont difficiles à définir. Ces avantages jouent généralement en faveur du séchoir à vide. Ils sont ici évalués en €/m³ :

a.	Amélioration de la qualité par rapport au séchoir conventionnel	0,- 40,-
b.	Amélioration de la flexibilité et du service client, grâce à un temps de séchage réduit	0,- 0,-
c.	Augmentation de capacité annuelle, grâce au chargement continu	0,- 10,-
d.	Diminution du stock de bois du fait du temps de séchage réduit	5,- 50,-
e.	Baisse du risque de séchage	0,- 15,-
f.	Diminution des défauts dus au séchage à l'air libre	10,- 30,-

Tableau 5: Seul l'exploitant peut évaluer pour lui-même les avantages particuliers du séchage sous vide : Valeurs indicatives en €/m³

Détails de comparaison

- I. La taille identique des séchoirs est l'hypothèse de base. Chercher à couvrir la capacité de séchage annuelle avec un séchoir du plus gros volume utile possible, donc avec un seul séchoir, constituerait sans doute l'investissement le moins cher. Mais compte tenu de ce qui précède, ceci n'a absolument pas de sens. Les conditions d'exploitation et du marché imposent une production continue et par conséquent des séchoirs de taille appropriée. En

raison d'une vitesse de séchage beaucoup plus élevée sur les séchoirs à vide, les très grosses exploitations peuvent avoir intérêt à multiplier le nombre de tunnels pour assurer leur production lorsqu'elles n'ont qu'un ou deux produits différents quant à l'essence, à l'épaisseur, à la qualité de séchage souhaitée. Il peut être bon de comparer les résultats du séchage sous vide aux valeurs des lignes et des colonnes correspondant aux séchoirs conventionnels de taille immédiatement supérieure. Les critères correspondant à ce saut ont déjà été décrits. La relation de coûts en faveur du séchoir conventionnel a été rejetée, car son coût d'achat en fonction de la taille augmente moins vite que pour les séchoirs à vide. De toutes façons, les avantages immatériels a à f jouent ensuite en faveur du séchoir à vide. Pour les séchoirs à vide récents, on peut entièrement démontrer que, dans les limites de l'exploitation, la taille croissante des tunnels aboutit à un meilleur prix d'achat (ligne 1) et à un meilleur coût global, rapportés au m³ de bois sec.

- II. Les coûts en personnel, électricité, chauffage, travaux de fondation ou d'installation ressortent à peine dans la comparaison. Ces éléments ne sont à prendre en compte que dans le cas de résultats équivalents ou limites.
- III. Pour le prix des installations conventionnelles (ligne 1), un très grand nombre d'offres récentes de fabricants leaders ont été étudiées. De cette façon, les prix bas négociés devraient donc être représentatifs. Il en est de même pour les séchoirs à vide, où toutefois seules les offres les plus intéressantes ont été retenues.
- IV. Les coûts de séchage d'autres variétés peuvent être extrapolés, du fait du choix des extrêmes (chêne et sapin) et de l'exemple intermédiaire du hêtre. On peut ainsi obtenir une bonne approche des coûts de l'érable, l'aulne, l'iroko, le méranti, le sipo en les comparant aux données du hêtre en séchage conventionnel ou sous vide.
- V. Naturellement les coûts de séchage totaux rapportés au m³ du chêne brut de sciage à 8 % sont plus que proportionnels par rapport à un séchage de 40 à 8 %, avec préséchage à l'air. Ceci est particulièrement vrai pour des marchandises de forte épaisseur en séchoirs de faible capacité. A l'inverse, les pertes importantes dues au séchage à l'air doivent être évaluées. Il s'agit des défauts du bois, des intérêts financiers, de la place de stockage, du personnel. Le séchage sous vide de chêne fraîchement scié, de forte épaisseur, dans de très petits séchoirs présente un avantage évident par rapport au séchage à l'air, vu la chute continue du prix des installations.

Augmentation de la rentabilité grâce au chargement continu

Le déchargement et le chargement d'un séchoir conventionnel avec un chariot élévateur prennent environ 4 à 8 heures, en fonction de la capacité du séchoir. Des durées de cet ordre correspondent également au chargement de séchoirs à vide de mêmes dimensions avec des chariots sur rails. Ces arrêts de production ont été pris en compte sur les figures 4, 5, 6 avec le nombre de chargements annuels. Ils abaissent le taux d'utilisation du séchoir investi, ce qui n'a plus de sens aujourd'hui.

Avec un séchoir conventionnel, le chargement par chariot élévateur et l'interruption de la production sont inévitables. Avec un séchoir à vide, le chargement continu, associé à des chariots élévateurs permet de réduire le temps d'intervention à une demi-heure ! Avec une seule porte par rangée, le tunnel ne se refroidit que faiblement. L'énergie calorifique n'est plus gaspillée et le temps de montée en température est réduit. Lorsqu'un cycle de séchage se termine de nuit ou le

week-end, sans recours possible à du personnel, un bon logiciel peut prolonger automatiquement le conditionnement. La qualité et la rentabilité s'en trouvent améliorées.

A condition de disposer de la surface nécessaire au chargement continu (allongement du tunnel) ou d'avoir une plate-forme de manutention pour charger le contenu d'un deuxième chariot de marchandise humide sans frais supplémentaires, toute entreprise se déciderait évidemment pour une production continue. Malheureusement on se trouve face à des coûts induits par les travaux de fondations, les chariots élévateurs supplémentaires, les jeux de câbles de mesure d'humidité, les portes de séchoirs ou plates-formes de manutention. Ici les clients attendent des constructeurs qu'ils permettent une bonne rentabilité, y compris pour de longues durées de séchage et des temps de chargement courts, sans surcoûts excessifs (en particulier pour les portes). Pour des durées de séchage courtes, le chargement continu devient une évidence.

Remarque : En alternative au chargement continu, une solution bon marché consiste à mettre en œuvre un pré chargement à proximité immédiate du séchoir, avec une deuxième chaîne de mesure. On peut alors remplacer rapidement le chargement sec par le chargement humide préparé au moyen de chariots élévateurs.

Vous pouvez comparer :

- a. Une durée de séchage conventionnelle 10 jours + un jour de chargement = 11 jours, à raison de 320 jours/an, donne 29 charges/an.
- b. En séchage sous vide, sans chargement continu, 3 jours de séchage + un jour de chargement = 4 jours, soit 80 charges/an.
- c. Un séchage sous vide, avec chargement continu, séchoir maintenu chaud, temps de chargement/déchargement inclus (environ 3 jours/an) donne plus de 100 séchages/an.

Dans le cas c, le chargement continu permet 20 chargements supplémentaires / an, c'est à dire 25 % de plus.

Le lecteur peut, en s'appuyant sur les tableaux 2 à 4, calculer l'augmentation de résultat, avec ses propres chiffres et les coûts d'investissement induits (approximativement 10 % du montant total de l'investissement ligne 8). L'amélioration de résultat pour des temps de séchage courts sous vide est convaincante. Elle n'est possible qu'avec un chargement par chariot sur rails et peut toujours se réaliser dans l'espace disponible. Le chargement continu facilite l'approvisionnement, régularise le fonctionnement et optimise le flux de marchandise.

Conclusion

Dans quels cas vous décider pour un séchoir à vide ? La réponse à cette question n'a pu être donnée qu'après évaluation du séchage de 1200 chargements de chêne, de hêtre et de sapin. Pour ce faire, on a intégré les prix actuels du marché des séchoirs. On a alors pu constater que le prix des modèles à air sont au plus bas depuis de nombreuses années. Par contre les séchoirs sous vide font l'objet d'importantes baisses de prix, grâce aux progrès techniques, et en particulier au recours à des logiciels intelligents. Remarquons que jusqu'à présent les spécialistes tenaient pour impossible l'augmentation de volume des séchoirs en raison de la pression sur les parois (presque 10 tonnes au m²). Aujourd'hui on sait construire des séchoirs à vide rectangulaires de capacités équivalentes aux séchoirs conventionnels.

« Séchage du bois : Fini le séchoir conventionnel, la vapeur remplace l'air » Ce slogan de LIGNA 97 se trouve confirmé deux ans plus tard par la majorité des décisions d'achat. Grâce à des coûts de fabrication devenus entre temps plus abordables, le séchoir à vapeur sous vide est

devenu concurrentiel et a quitté sa position de niche. Comme les innovations marquantes des années 1950 à 1990 (ventilateurs axiaux, caissons tout aluminium, planchers intermédiaires, logiciels de séchage, régulation de vitesse), une véritable technique de pointe nous arrive encore d'Allemagne avec les séchoirs HIGH VAC, prêts pour le marché mondial. Cette importante avancée est le résultat de recherches abouties et de nouveaux développements innovants, partiellement brevetés. Et on peut tenir pour sûr que la recherche et le savoir-faire de processus et de construction continueront à progresser. On peut aussi se réjouir de ce que les coûts de fabrication sont encore loin d'être au plus bas.

Grâce à cette technique et aux baisses de prix à venir, on peut renoncer au séchage à l'air libre, y compris pour le chêne et le hêtre de forte épaisseur. Dans les séchoirs à grand volume, le bois arrive aussi vite que la capacité du séchoir le permet. De ce fait les dommages sont évités, les belles teintes du bois et sa qualité sont conservées. L'entreprise peut tirer du séchage une meilleure rentabilité.

Tout ceci ne pouvait se faire avec le séchage conventionnel des 50 dernières années. C'est maintenant possible avec le vide, à l'issue de recherches abouties et grâce à un effort important de développement et de production. Les entreprises qui veulent subsister n'ont pratiquement pas d'autre choix que de suivre rapidement la dynamique de ce tournant technique.

Bibliographie

- [1] R. Brunner: Holz Trocknung mit computergesteuerter Drehzahlregelung
Le séchage des bois, à vitesse de rotation pilotée par ordinateur
Holz-Zentralblatt 1983, N° 53/54
- [2] R. Brunner: Die Schnittholztrocknung im Vakuum - eine echte Alternative bietet sich an.
Le séchage du bois sous vide : une véritable alternative
Holz-Zentralblatt 1991, N° 54 et 55/56
- [3] R. Brunner: Holz Trocknung zukünftig im Vakuum - oder bleibt alles konventionell?
Le vide s'empare t-il du séchage du bois
Holz-Zentralblatt 1993, N° 58
- [4] R. Brunner: Die Tage der konventionellen Schnittholztrocknung sind gezählt - Dampf statt Luft
Séchage du bois : Fini le séchoir conventionnel, la vapeur remplace l'air
Holz-Zentralblatt 1997, N° 52/53