



Les méthodes de séchage du bois II - Affinage et maturation du bois : pratiques et intérêts respectifs

Nicolas VIVAS¹, Nathalie SAINT-CRICO DE GAULEJAC¹ et Christelle ABSALON²
 (1)Tonnellerie Demptos détaché au Centre d'Etude Structurale et d'Analyse
 des Molécules Organiques (CESAMO), Université Bordeaux 1
 351, cours de la Libération, 33405 Talence, France
 (2)CESAMO, CNRS UMR 5802

Mots clés : bois de chêne, séchage naturel, eau de pluie, température, lessivage, oxydation, hydrolyse, transformation chimique et microbiologique.

Une investigation complète des différents paramètres pouvant intervenir au cours du séchage naturel du bois de chêne est présentée. Elle concerne l'influence respective des phénomènes de lessivage, d'oxydation chimique ou d'hydrolyse et de transformation par voie biochimique. Nos résultats montrent que ces divers facteurs interviennent ensemble, mais c'est principalement les transformations biochimiques permises par les champignons et les bactéries qui permettent d'interpréter la plus importante partie des modifications subies par le bois au cours de cette étape d'affinage.

Stricto sensu, le séchage consiste à déshydrater le bois pour que son taux d'humidité s'équilibre avec l'hygrométrie ambiante. Sans cela le bois travaille et perd ses dimensions initiales. En tonnellerie, ceci signifie que la barrique ne restera pas étanche. Le séchage ne doit pas être trop rapide pour limiter les pertes liées à l'apparition de fentes de retrait et de ruptures des fibres (VIVAS, 1993b). Cette opération, purement physique, d'évaporation de l'eau libre contenue dans les fibres du bois peut se faire dans une étuve. Mais cette définition est trop restrictive ; il est en effet insuffisant de déshydrater les bois pour produire des barriques aptes à l'élevage et à l'amélioration des qualités des vins et des eaux-de-vie (TARANSAUD, 1976 ; PONTALLIER *et al.*, 1982).

C'est à JOSEPH et MARCHE (1972) que l'on doit les premières études qui ont révélé la complexité des phénomènes associés au séchage naturel du chêne. Ces auteurs ont identifié sur le bois et dans ses couches plus profondes une flore diversifiée représentée par des champignons et quelques espèces de bactéries. Beaucoup plus récemment VIVAS *et al.* (1991) ont confirmé l'existence de ces micro-organismes, identifié les principales espèces et souligné leur rôle dans la modification de composition des extraits de bois de chêne (VIVAS et GLORIES, 1993). Le séchage naturel est donc une véritable étape de maturation du bois (VIVAS, 1993a). De nouveaux travaux (CHATONNET *et al.*, 1994 ; LARIGNON *et al.*, 1994) ont analysé la flore fongique totale du bois au cours de son séchage, sans pour autant s'attacher plus spécialement aux champignons caractéristiques, qui se développent réellement et influencent le processus de maturation (VIVAS *et al.*, 1996). Dans les conditions de la pratique, l'ensemble des facteurs (eau, vent, soleil, champignons...) agit simultanément pour amener le bois à un état de maturité compatible avec le souci d'amélioration, de renforcement et de révélation des qualités intrinsèques des vins et des eaux-de-vie élevés en barriques.

Actuellement, le séchage demeure une opération non contrôlée, dont la sagesse de l'empirisme et les observations répétées durant plusieurs décennies ont fixé les règles. Cependant, d'une façon très générale, le séchage est plutôt géré comme une réserve de bois et non comme une étape d'affinage et de maturation de la matière première ; ce qui est tout aussi important que la qualité du bois brut. Nous proposons donc dans ce travail de préciser les conditions optimales de maturation du bois et de formuler un ensemble de règles technologiques qui laissera le moins de place possible au hasard, tout en conservant, au mieux, ses aspects traditionnels.

Les grandes étapes de l'affinage du bois

• Le séchage du bois

A l'état frais, le chêne possède 65 à 75 % d'humidité. Lorsqu'il perd son eau libre, ses dimensions changent, c'est ce que l'on appelle le retrait volumique. Il est obtenu en mesurant la différence entre la dimension du bois à l'état saturé et à l'état sec à l'air (poids constant). Généralement le retrait, estimé en pourcentage, représente la somme du retrait tangentiel et du retrait radial. En moyenne il est de 15 % (± 3 %), avec une anisotropie (retrait tangentiel / retrait radial) de 3 ($\pm 0,5$). Le séchage s'impose donc, d'abord, pour stabiliser les dimensions du bois. Généralement, en France, le bois sec à un taux d'humidité relative (Hr %) de 12 % en été, de 15-18 % en automne, printemps et hiver. Lorsque la barrique est pleine de vin, l'humidité relative est voisine de 30 % ; le gonflement des pièces de bois en contact avec le vin assure alors l'étanchéité de la barrique. Les barriques doivent être utilisées le plus rapidement possible après la livraison. Il est en effet possible que, durant des étapes d'équilibrage de l'humidité du bois avec l'hygrométrie ambiante, la perte d'eau provoque l'apparition de fuites sur les barriques. Pour illustrer cela : des barriques, produites en hiver ou au printemps (Hr = 15-18 %) et utilisées l'été (Hr = 12 %), perdent 3 à 6 % d'eau ; de la même façon, des barriques produites en hiver en France et utilisées en

Australie présentent le même risque. Dans ces conditions, le séchage du bois revêt une grande importance ; il ne doit pas être négligé.

Sur plusieurs années d'observations, indépendamment des conditions climatiques et de l'épaisseur du bois (22 à 30 mm), le séchage prend de 10 à 12 mois. Les couches inférieures du bois sèchent progressivement, mais de façon régulière. La surface peut être humectée par l'eau de pluie, mais la réhydratation est très faible et ne concerne ni les couches internes des douelles ni même l'intérieur des piles. L'origine géographique n'influence pas significativement la vitesse de séchage. La comparaison entre grains fins et grains grossiers conduit aux mêmes résultats. Il s'agit donc d'un phénomène physique spontané. Le volume des précipitations et leur répartition annuelle conditionnent la faisabilité du séchage. Dans certains pays, trop peu pluvieux, le séchage est déconseillé, il serait trop rapide entraînant des pertes importantes de bois (ruptures des fibres, décollement au niveau des rayons ligneux) et la grande majorité des extractibles resterait emprisonnée dans la masse du bois. Les conditions climatiques optimales pour un séchage progressif sont : un volume de précipitations annuel compris entre 900 et 1200 mm, réparti au mieux sur l'année, avec des températures moyennes de 15 à 20 °C (moyenne sur 12 mois) et une amplitude thermique de 12 à 15 °C ($\Delta t_{max}, t_{min}$). Ces conditions idéales sont remplies pour les climats océaniques tempérés et les climats continentaux de marges océaniques. Un bon indice des conditions climatiques optimales pour le séchage du bois est donné par le rapport entre les précipitations annuelles (mm d'eau) et la température moyenne (°C). Quelques résultats sont rassemblés sur le tableau 1. Dans les climats trop secs et chauds, ce rapport S est relativement faible ; en revanche, pour les climats pluvieux et doux S est compris entre 75 et 100.

Tableau 1- Valeurs de l'indice S pour différentes zones géographiques.

S = précipitations totales (mm) / températures moyennes annuelles (°C) (Météorologie nationale, moyenne sur 30 ans)

Zones géographiques	Précipitation (mm)	Température moyenne (°C)	Indice S
France			
Bordeaux	950	12,5	76*
Cognac	783	12,4	63*
Montpellier	610	14,5	42
Tours	670	11,2	59
Dijon	732	10,5	69,5*
Brest	1130	11	103*
Strasbourg	750	10,3	73*
Allemagne			
Berlin	580	8,5	68*
Russie			
Kiev	540	6,8	79,5*
Etats-Unis			
Virginie (Jefferson)	952	12,8	74*
Missouri (Richmond)	1044	14,4	72,5*
Californie (San Francisco)	459	12,3	37

*Zones adaptées au séchage naturel

• Le lessivage du bois

Lors des pluies, les piles de bois sont soumises au ruissellement de l'eau qui peut entraîner une partie des substances hydrosolubles. On sait, par ailleurs, que les ellagitannins du bois de chêne sont très solubles dans l'eau, ils sont donc susceptibles d'être soumis au phénomène de lessivage lors des pluies. Pour montrer ce mécanisme, nous avons constitué une pile expérimentale (douelles courtes de 10 x 3 x 30 cm montées en claire-voie sur liteau de 2,5 x 2,5 cm) de bois de l'Allier de 170 kg, fendu en douelles de 27 mm et disposé dans le parc à bois. Les eaux de pluies sont collectées au bas de la pile grâce à un bac peu profond muni d'un robinet de vidange à sa partie inférieure. Sur un an, nous avons collecté les eaux de ruissellement de cette pile pour peser après évaporation l'extrait sec. Ces résultats sont rassemblés sur la figure 1. Il convient de préciser, avant de commenter les chiffres obtenus, que les conditions climatiques et plus particulièrement les précipitations totales et leur répartition, influencent fortement les phénomènes de lessivage.

Les résultats présentés nous montrent que l'élimination d'une partie des substances hydrosolubles du bois se situe, pour l'essentiel, dans les six premiers mois du séchage, lorsque le bois est vert et encore riche en eau. Puis au cours du séchage, la diminution progressive du taux d'humidité relative et le resserrement des fibres du bois emprisonnent les extractibles dans la masse. Des pluies, même abondantes, survenant après 8 à 10 mois de séchage, contiennent peu ou pas d'extractibles. Rapportée au 170 kg de bois, la perte annuelle d'extrait sec est de 6,14 mg/kg de bois, ce qui est peu. D'autre part, au cours de cette même période, la teneur en extrait sec totale du bois (évaluée par extraction à l'acétone-eau, 8/3 v:v, sur de la sciure de bois) a diminué de 17 g/kg de bois. Ce résultat indique que seulement 0,035 % des extractibles du bois ont été entraînés par lessivage. Dans une autre expérience, nous avons atteint un maximum de 0,07 %. Ceci suggère l'intervention d'autres facteurs à la diminution du taux d'extractibles du bois.

La fraction entraînée par lessivage est de faible importance, mais il apparaît lors de la dégustation, que cet extrait est plus amer que l'extrait de chêne non entraîné par le lessivage. La nature des substances éliminées est probablement différente de celles qui restent dans la masse du bois.

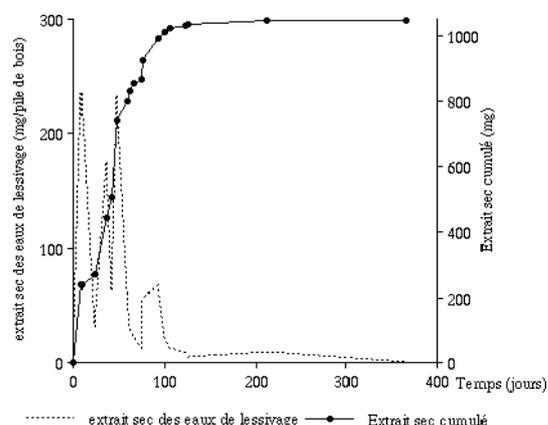


Figure 1 - Lessivage de la pile de bois au cours du séchage naturel (Bordeaux, 1992, bois de l'Allier, pile expérimentale comportant 170 kg de bois)

Oxydation chimique des composés phénoliques dans le bois

Les ellagitannins sont des molécules facilement oxydables en solution par l'oxygène moléculaire ou le peroxyde d'hydrogène. Cette propriété a conduit certains auteurs à interpréter la diminution de la concentration en composés phénoliques, et en particulier en ellagitannins, par une oxydation chimique de ces composés dans la masse du bois (CHATONNET *et al.*, 1995). Il est bien entendu que sous forme soluble ces constituants sont rapidement oxydés et disparaissent du milieu. Leurs produits de transformation sont des polymères d'oxydation de couleur foncée (KLUMPERS *et al.*, 1994). Cependant, sous forme de poudre, dans des conditions d'humidité proche des bois verts, la teneur en ellagitannins est peu affectée au cours d'une conservation d'un an. En outre, dans le tronc d'arbre resté sur pied, malgré une humidité relative de 65 à 75 %, les ellagitannins sont dosables dans les différentes parties du bois, quel que soit son âge. Par ailleurs, on note une diminution progressive de la teneur en ellagitannins solubles au cours du vieillissement du bois, qui représente 15 à 20 mg/g de bois pour 100 ans, soit une diminution de 150 à 200 µg/g/an (0,3 à 0,5 % par an). Ces résultats sont en accord avec ceux de PENG *et al.* (1991) et de VIRIOT *et al.* (1994). Ces auteurs ont interprété ce phénomène comme une oxydation chimique ; mais, au vu des résultats, ce rôle au cours du séchage naturel semble être secondaire. Par ailleurs, de nombreux auteurs s'accordent à reconnaître que l'essentiel des phénomènes conduisant à une dégradation des composés phénoliques dans le bois de cœur de nombreuses espèces - dont le chêne - est lié à des actions d'ordre enzymatique. Une revue intéressante des différents travaux se rapportant à ce thème a été faite par HALUK *et al.* (1991).

L'hydrolyse des coumarines hétérosidiques, aesculine et scopoline, a également été interprétée comme une réaction chimique (CHATONNET *et al.*, 1994). Mais là encore, dans nos conditions expérimentales, nous n'avons pas pu produire d'aglycones (aesculétine et scopolétine) par hydrolyse acide en milieu aqueux à température ambiante (pH 1, 2 et 3), même après plusieurs mois. L'hydrolyse acide à chaud conduit à un faible rendement : la plus grande partie des coumarines hétérosidiques subit des modifications irréversibles de structure.

La lignine est un polymère tridimensionnel d'alcools phénylpropénoïques : l'alcool coumarylique, coniférylique et sinapylique. Il s'agit d'un polymère qui imprègne la paroi du bois duraminisé. Sur le plan chimique, la lignine est pratiquement insoluble dans l'eau et donc ne peut pas être lessivée ; elle est également particulièrement stable et nécessite pour être dégradée des techniques d'hydrolyse relativement lourdes (oxydation par le nitrobenzène, acidolyse à chaud dans le dioxane chlorhydrique, double oxydation par le permanganate de potassium puis par l'eau oxygénée...) (MONTIES, 1980). La dépolymérisation de la lignine est difficilement envisageable en milieu aqueux ou en milieu aqueux légèrement acidifié ; puisque dans ces deux conditions, le polymère est insoluble (NIMZ, 1978). Nos différents essais de conservation, en conditions stériles, de lignine ethanol et de lignine dioxane conservés dans l'eau à pH 4 (pH moyen des extraits à

l'eau de bois) pendant 12 mois n'ont pas permis de mettre en évidence de pertes de lignine.

Dans le bois, les conditions d'oxydations chimiques ne semblent pas permettre de dégradation appréciable des différents composés phénoliques majoritaires.

Influence de la flore fongique sur la composition chimique du bois de chêne

La surface des douelles se recouvre rapidement de très nombreux spores dont seulement un faible pourcentage germe et émet un mycelium. On estime en moyenne que 3 à 6 % des spores déposées sur le bois donnent un mycelium qui se développe normalement, même si une flore fongique très variée peut être déposée sur les douelles, en réalité peu sont capables de se développer sur un milieu contenant un extrait de bois de chêne. En outre, seulement trois champignons peuvent réellement s'implanter sur des coupes de bois et émettre, après un mois de culture, des mycéliums ainsi que des spores. Nous avons montré depuis fort longtemps (VIVAS *et al.*, 1991) qu'il s'agit de *Aureobasidium pullulans*, *Trichoderma harzianum* et *Koningii*. L'interprétation de ces observations a été formulée plus tard (VIVAS et GLORIES, 1993 et VIVAS *et al.*, 1996). Ceci est lié au manque d'adaptation de certains champignons à un milieu hostile tel que le bois. C'est ce qui a conduit certains auteurs à assimiler flore fongique en place et spores déposées. Nos résultats sont confirmés par de très nombreuses analyses réalisées en microscopie électronique à balayage. La taille et la forme bien caractéristiques des spores de *A. pullulans* de *T. harzianum* et *Koningii* nous ont permis de montrer que les spores germant appartiennent, très majoritairement, à ces espèces. Ces champignons pénètrent par des microfissures réparties sur toute la surface des douelles et colonisent les couches internes du bois. Cependant la biomasse mycélienne totale est trop faible pour induire des modifications sensibles de composition et de structure du bois ; d'autant que le séchage ne dure que 24 à 36 mois. Mais, l'observation par microscopie électronique en transmission, sur des coupes fines de bois convenablement traité, révèle qu'une partie très importante de la flore du bois de chêne se développe à l'intérieur des parois des cellules du bois. Cette biomasse est beaucoup plus importante que la précédente et se retrouve, après 12 mois de séchage jusqu'à 10 mm de profondeur. Le développement du champignon se prolonge alors durant tout le séchage dans les tissus du bois. On observe que le champignon digère littéralement la paroi et libère, dans les tissus, des enzymes qui sont fortement contrastés sous le faisceau d'électrons, caractéristiques de ce phénomène (SREBOTNIK et MESSNER, 1991). Certaines zones fortement altérées présentent en plus de ces accumulations d'enzymes exocellulaires des taches plus opaques correspondant probablement aux produits de l'hydrolyse enzymatique des constituants pariétaux. Si ce type d'observation a été souvent rapporté dans les études portant sur la biodégradation de nombreuses espèces d'arbres, en revanche, dans le bois de cœur de chêne en cours de séchage naturel, aucun travail ne l'avait signalé.

On peut, dès lors, suggérer raisonnablement le rôle des enzymes exocellulaires des champignons isolés, dans le processus du séchage naturel. A partir d'une culture pure d'*A. pullulans* en milieu Czapeck-Dox, nous avons

collecté les enzymes exocellulaires solubles par précipitation au sulfate d'ammonium à 80 % de saturation. Le culot dessalé est utilisé dans différents tests. Il convient de montrer la capacité de ces enzymes à libérer, à partir d'un extrait aqueux de chêne, du glucose de structure hétérosidique et des phénols simples dont certains acides phénols. Sur un extrait de chêne supplémenté en enzymes exocellulaires, on observe une acidification du milieu mesuré par la diminution du pH. Ce phénomène est la conséquence de la libération d'acide phénols provenant d'hétérosides phénoliques (VIVAS, 1993a). L'apparition et l'accumulation de glucose confirment cette interprétation. Les mycelia des diverses espèces isolées sont capables de se développer en milieu liquide en utilisant comme source de carbone les ellagitanins en solution. Ce qui constitue la démonstration des aptitudes particulière de ce champignon.

Les champignons isolés de douelles en cours de séchage possèdent le matériel enzymatique adapté à la dégradation de nombreux polyphénols. Nous avons montré par ailleurs (VIVAS et GLORIES, 1993) que des enzymes permettent également une croissance de ces champignons à partir de polysaccharides.

Les différentes bactéries isolées ne se sont pas révélées capables de dégrader la lignine. De plus, les divers champignons n'ont pas d'effet sensible sur la lignine, ce qui va à l'encontre des premières interprétations (VIVAS, 1993) et confirme les travaux plus récents (CHATONNET *et al.*, 1994).

Comparaison du séchage naturel et du séchage artificiel

Le séchage naturel permet, par rapport au séchage artificiel, l'élimination d'une partie de la fraction fixe hydrosoluble du bois. Il s'agit surtout de l'élimination des composés phénoliques (tableau 2). Le rôle du lessivage et de l'oxydation chimique des composés phénoliques, bien que de faible intensité, participe à ce résultat final. L'insolubilisation d'une partie des ellagitanins au cours du vieillissement du bois sur pied (PENG *et al.*, 1991), ainsi que les dégradations d'origines microbiennes, au cours du séchage naturel, constituent les deux principaux facteurs influençant la composition du bois. Cependant, les écarts d'extraits secs entre séchage naturel et artificiel sont réduits (37 mg/g pour l'extrait sec et 17 mg/g pour les ellagitanins). La différence la plus importante réside dans la modification des caractères gustatifs des extraits aqueux de bois, en relation avec des modifications des structures en présence. On observe que le seuil de perception (à 50 %) de l'astringence et de l'amertume de l'extrait de chêne

Tableau 2 - Incidence du mode de séchage sur la composition du bois de chêne

Séchage naturel : 24 mois ; séchage artificiel : 6 mois
(résultats en mg/g équivalent castalagine)

	Séchage naturel	Séchage artificiel
Extrait sec (mg/g)	97 ±10	134 ±5
Phénols totaux (IFC)*	19,6 ±1	22,5 ±1,5
Acide ellagique (mg/g)	17 ±3	24 ±3
Ellagitanins totaux (mg/g)**	52 ±11	69 ±15

*Indice de Folin Ciocalteu

**dosage par réaction de Bate-Smith à l'acide nitreux

Tableau 3 - Seuil de perception gustative des extraits à l'eau de bois de chêne. Influence du mode de séchage.

(dégustation réalisée avec 26 personnes, seuil à 50 % donné en mg/l d'extrait à l'eau)

	Chêne vert	Chêne séché artificiellement	Chêne séché naturellement
Amertume	115a	138b	287c
Astringence	122a	164b	300c

Les lettres différentes indiquent que les chiffres sont significativement différents entre eux pour un seuil de 5 %

séché naturellement est plus important que ceux mesurés sur l'extrait de chêne séché artificiellement ; respectivement de 45 % et de 52 % (tableau 3). Cela signifie qu'après séchage naturel, l'extrait de chêne est moins perceptible à la dégustation. En outre, les extraits sont jugés peu amers et moins astringents. L'analyse plus détaillée de la concentration en certaines molécules montre que le séchage naturel provoque une augmentation de la teneur en aldéhydes phénols et en scopolétine. Il a été clairement démontré que la scopolétine dérive de son hétéroside, la scopoline (VIVAS, 1993a ; VIVAS, 1993b), jugée par JOSEPH et MARCHE (1972) comme particulièrement amère. Nous avons déterminé le seuil de perception de l'aesculine qui est voisin de 1 µg/l en solution hydroalcoolique (12 % vol., 5 g/l d'acide tartrique et pH 3,5) et jugé très amère. Le seuil est donné pour 100 % des dégustateurs (n = 12). Dans un vin rouge jeune, en cuve, il est de 3 µg/l pour 90 % des dégustateurs. L'origine des aldéhydes phénols n'a toujours pas d'explication satisfaisante.

Au travers de cet exemple, on comprend facilement la complexité des phénomènes intervenant dans le séchage naturel. Ainsi, toute tentative de raisonnement et d'optimisation doit passer par le respect du facteur temps, du lessivage et de l'action des microorganismes.

Conclusion

Comme de nombreuses autres opérations du travail et du traitement des bois à la tonnellerie, le séchage naturel n'avait pas fait l'objet d'une étude systématique. Depuis 1990, nous avons regroupé une première somme de données, qui est utile à la visualisation globale des phénomènes de séchage et que nous préférons appeler aujourd'hui maturation ou affinage du bois. La complexité des mécanismes mis en jeu justifie le changement de nom. Mais plus qu'une dissection patiente et attentive des grandes étapes caractérisant le processus, nous avons optimisé et raisonné la maturation du bois grâce à un meilleur choix des conditions de lessivage des piles.

Références bibliographiques

- CHATONNET P., BOIDRON J.-N. et DUBOURDIEU D., 1994. Nature et évolution de la microflore du bois de chêne au cours de son séchage et de son vieillissement à l'air libre. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **28**, 185-201.
- CHATONNET P., BOIDRON J.-N. et DUBOURDIEU D., 1994. Evolution des composés phénoliques du bois de chêne au cours de son séchage. Premiers résultats. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **28**, 337-357.
- CHATONNET P., BOIDRON J.-N. et DUBOURDIEU D., 1994. Evolution de certains composés volatils du bois de chêne au cours de son séchage. Premiers résultats. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, **28**, 359-380.
- HALUK J.P., SCHOEGEL F. et METCHE M. 1991. Chimie de la couleur du bois. Etude comparative des constituants polyphénoliques dans le chêne sain et le chêne coloré. *Holzforschung*, **45**, 6, 437-444.

- JOSEPH E. et MARCHE M., 1972. Contribution à l'étude du vieillissement du Cognac. *Connaissance Vigne Vin*, **6**, 273-330.
- KLUMPERS J., SCALBERT A. et JANIN G., 1994. Ellagitannins in European oak wood : Polymerization during wood ageing. *Phytochemistry*, **36**, 1249-1252.
- LARIGNON P., CANTAGREL R., ROULLAND C. et VIDAL J.P., 1994. Incidence des pratiques de tonnellerie en Charentes sur la microflore des mer rains en fin de maturation. *Rev. Œnol.*, **74**, 9-13.
- MONTIES B. 1980. Les lignines, in : *Les polymères végétaux. Polymères pariétaux et alimentaires non azotés*. Monties B. (Ed.), Bordas, Paris, 122-155.
- NIMZ H.H., 1978. 13C NMR spectra of lignins. *C.R. JIEP, Bulletin liaison n°8*, 185-206.
- PENG S., SCALBERT A. et MONTIES B. 1991. Insoluble ellagitannins in *Castanea sativa* and *Quercus petraea* woods. *Phytochemistry*, **30**, 3, 775-778.
- PONTALLIER P., SALAGOITY-AUGUSTE, M.H., RIBÉREAU-GAYON P. 1982. Intervention du bois de chêne dans l'évolution des vins rouges élevés en barriques. *Connaissance Vigne Vin*, **16**, 45-61.
- SREBOTNIK E. et MESSNER K. 1991. Immunoelectron microscopical study of the porosity of brown-rot degraded pine wood. *Holzforschung*, **45**, 95-101.
- TARANSAUD J. 1976. *Le livre de la tonnellerie*. La roue aux livres (eds.), Paris.
- VIRIOT C., SCALBERT A., HERVE DU PENHOAT C.L.M. et MOUTOUNET M., 1994. Ellagitannins in woods of sessile oak and sweet chestnut. Dimerization and hydrolysis during wood ageing. *Phytochemistry*, **36**, 5, 1253-1260.
- VIVAS N., GLORIES Y., DONÈCHE B. et GUEHO E., 1991. Observation sur la flore fongique du bois de chêne (*Quercus* sp.) au cours de son séchage naturel. *Ann. Sc. Nat. Bot. (Paris)*, **13**, 11, 4, 149-153;
- VIVAS N., 1993a. Le séchage naturel du bois de chêne destiné à la fabrication de barriques. Tonnellerie Demptos (éd.), collection avenir œnologie diffusion, Château de Chaintré, France.
- VIVAS N., 1993b. Les phénomènes liés à la maturation du bois de chêne pendant son séchage. *Rev. Œnol.*, **70**, 17-20.
- VIVAS N. et GLORIES Y., 1993. Etude de la flore fongique du chêne (*Quercus* sp.) caractéristique du séchage naturel des bois destinés à la tonnellerie. *Crypto. Mycol.*, **14**, 2, 127-148
- VIVAS N., DONÈCHE B. et GLORIES Y., 1997. Incidence de la durée du séchage naturel de *Quercus petraea* Liebl. et de *Quercus robur* L. sur la diversité de la flore fongique en place et sur quelques aspects de son écologie. *J. Sci. Tech. Tonnellerie*, **3**, 27-36.