Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 1994, **28**, N°3, 227-245

SIMULATION EXPÉRIMENTALE DE "L'INTERFACE TONNEAU": MESURE DES CINÉTIQUES D'IMPRÉGNATION DU LIQUIDE DANS LE BOIS ET D'ÉVAPORATION DE SURFACE

F. FEUILLAT*, JR. PERRIN** et R. KELLER*
avec l'aide technique de Daniele AUBERT**, P. GELHAYE**,
C. HOUSSEMENT**, J. PERRIN** et M. PIERRE**

*ENGREF, Laboratoire de Recherches en Sciences Forestières,
14, rue Girardet, 54042 Nancy cedex (France)
**INRA, Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois, 54280 Champenoux (France)

Résumé : *Un modèle expérimental miniaturisé a été conçu dans le but de simuler "l'interface tonneau". Les cinétiques de l'imprégnation du liquide dans le bois et de l'évaporation de surface ont été mesurées en conditions de cave (15°C ; 90 p. cent HR) pendant 200 jours sur des petits disques à orientation tangentielle (∅ 63 mm ; épaisseur 9 mm) à l'aide d'une méthodologie spécifique. Ces résultats expérimentaux ont été obtenus sur 4 espèces traditionnellement employées en tonnellerie (Quercus robur* L., *Q. petraea* Liebl., *Castanea sativa* Mill., *Robinia pseudacacia* L.*).*

L'analyse des cinétiques d'imprégnation et d'évaporation a permis de caractériser les régimes transitoire et permanent (état d'équilibre). Le régime transitoire est dominé par une forte imprégnation pendant les 40 premiers jours environ, qui décroît ensuite de façon asymptotique. Parallèlement, après un temps de latence appelé "retard à l'évaporation", le flux massique devient progressivement une fonction linéaire du temps. Le régime d'équilibre est atteint lorsque le niveau d'imprégnation de la pièce de bois est maximal et constant soit après 140 jours environ (profil d'humidité d'équilibre). Le fonctionnement en régime stationnaire se caractérise alors par un flux d'imprégnation à la face interne équivalent au flux d'évaporation à la face externe.

Les variations quantitatives des phénomènes sont apparues liées aux conditions de transfert externe (HR de l'air ambiant) et aux conditions de transfert interne (propriétés de la pièce de bois). La comparaison d'échantillons toutes conditions égales par ailleurs a ainsi montré des différences significatives de comportements vraisemblablement liées à la variabilité anatomique du bois (interspécifique, interindividuelle et intraarbre).

Cette variabilité pourrait avoir des conséquences sur les phénomènes oxydatifs et sur l'extraction des constituants du bois au cours de l'élevage des vins et des eaux-de-vie en fûts.

INTRODUCTION

Le tonneau peut être considéré comme une "interface active" entre un milieu liquide (vin ou eau-de-vie) et un milieu gazeux (air ambiant de la cave). Ainsi de par les propriétés

physiques (porosité, perméabilité) et chimiques (substances extractibles) particulières du bois de chêne qui le constitue, il est le siège de phénomènes de transferts fort complexes entre les différents compartiments : liquide, bois et gaz.

Parmi ces phénomènes d'échanges, le plus apparent est la perte de liquide désignée par le terme de "consume"* par les professionnels et traduite par l'expression populaire : "le tonneau boit". Dans des conditions d'environnement très variées (chais plus ou moins humides, plus ou moins chauds) et sur de nombreux fûts, RIBÉREAU-GAYON (1933) a relevé des différences de "consume" de 1 à 9 p. cent par barrique de 225 l et par an, soit de 3 à 27 bouteilles.

Outre l'aspect purement économique de cette perte, le "consume" est susceptible de se répercuter sur la qualité des produits entonnés. Ainsi que l'a montré RIBÉREAU-GAYON (op.cit.), le "creux", qui se forme dans la barrique entre chaque ouillage, a pour effet de faire pénétrer de l'air par la bonde qui génère une oxydation du vin au niveau de l'interface "ciel gazeux" - liquide. Selon ce même auteur, cette voie d'oxydation par la surface serait largement prépondérante eu égard à la diffusion d'oxygène au travers des douelles.

Dans un récent travail, MOUTOUNET et *al.* (1993) ont étudié l'incidence du système d'obturation des fûts sur les pertes de liquide et sur les phénomènes oxydatifs. Ces auteurs ont mesuré dans le cas d'un fût fermé hermétiquement ("bonde silicone"), une dépression qui a pour effet de diminuer sensiblement le volume de "consume" et de "forcer" le passage de l'air au travers des parois.

Au vu de ces travaux, il apparaît que dans les deux systèmes d'obturation des fûts envisagés (bouchage "traditionnel" ou bouchage étanche), le "consume" est le phénomène moteur des transferts d'oxygène liés à l'élevage sous bois. L'imprégnation du liquide dans le bois a, comme deuxième conséquence œnologique majeure, la libération des substances extractibles du bois dans la phase liquide.

Dans le but de mesurer avec précision les cinétiques de l'imprégnation du liquide dans le bois et de l'évaporation de surface, un dispositif expérimental spécifique a été mis au point. Après avoir décrit la méthodologie développée, nous présentons dans cet article des courbes expérimentales obtenues sur 4 espèces traditionnellement employées en tonnellerie (chênes rouvre et pédonculé, châtaignier, robinier faux-acacia).

L'analyse des résultats est envisagée sous deux aspects :

- dans une première partie, nous décrivons les cinétiques de l'imprégnation et de l'évaporation au cours du régime transitoire et permanent (état d'équilibre) ;

- dans une seconde partie, nous montrons des exemples de la variabilité de ces deux phénomènes en relation avec l'origine du bois (espèce, arbre, intraarbre).

* le terme de "consume" sera employé ici pour désigner les pertes de liquide liées à l'imprégnation du bois et à l'évaporation de surface au cours de l'élevage en fût.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

I — DESCRIPTION TECHNOLOGIQUE DU MODÈLE EXPÉRIMENTAL (figure 1)

Le corps du dispositif se compose d'une structure en P.V.C. (té) vendu dans le commerce qui comprend :

- deux sorties latérales d'un diamètre de 63 mm où sont placées les pièces de bois ;

- une sortie d'un diamètre de 32 mm orientée perpendiculairement aux deux autres sur laquelle est collée un tube de verre qui constitue une réserve de liquide.

La forte épaisseur du type de "té" choisi (haute pression 8,5 mm) garantit une relativement bonne étanchéité aux gaz.

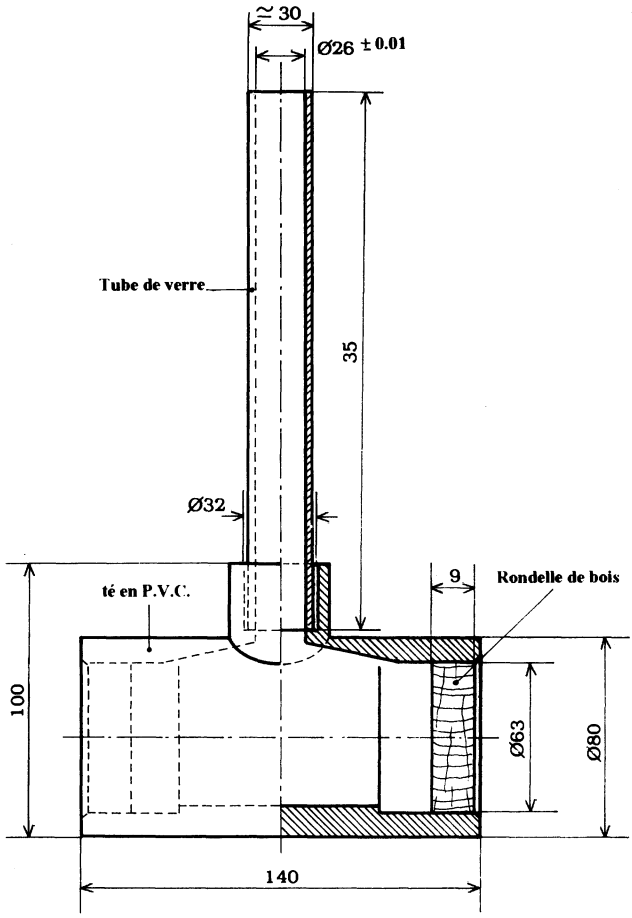


Fig. 1 — Schéma technologique du modéle expérimental
pour simuler le comportement de "l'interface tonneau" vis-à-vis des liquides

Les pièces de bois utilisées sont des petits disques de 63 mm de diamètre et de 9 mm d'épaisseur orientés tangentiellement par rapport aux cernes. Les deux disques d'un même dispositif sont des éprouvettes jumelles découpées dans l'épaisseur d'un merrain (débit longitudinal radial). L'usinage des disques est réalisé à l'aide d'un tour d'ajusteur outillé pour le travail du bois. On obtient ainsi une très grande précision sur les cotes des pièces (± 0,05 mm sur l'épaisseur) et un excellent état de surface. Les échantillons mis en œuvre sont dits "secs à l'air" (environ 15 p. cent d'humidité).

L'étanchéité latérale entre le bois et le plastique est réalisée par une mince couche de résine époxy (Araldite) appliquée à la spatule sur la tranche des éprouvettes. De plus, le disque de bois est ajusté avec une légère surcote par rapport au diamètre du tube en P.V.C. afin d' assurer une compression du "joint" de colle au montage.

La rigidité de cet assemblage ne permet pas au disque de bois de se déformer librement sous l'effet du gradient d'humidité sur l'épaisseur de la pièce. On retrouve là une analogie avec le cas des douelles dont la déformation est précontrainte sous l'effet du cerclage du tonneau. Ce facteur est important à considérer car il est reconnue que l'état de contrainte mécanique de la pièce de bois influe sur la diffusion de l'humidité (COMSTOCK, 1963).

Le fil du bois est systématiquement orienté dans une direction perpendiculaire à l'axe du tube de verre. Cette orientation du fil est identique à celle des douelles formant la coque d'un tonneau.

Le liquide de remplissage est une solution hydroalcoolique modèle à 12 p. cent vol. ajustée à pH 3,4 avec de l'acide tartrique. Une couche d'huile de vaseline (25 cm^3) déposée à la surface de la solution hydroalcoolique empêche l'évaporation par l'extrémité supérieure du tube de verre. Le dispositif est donc en permanence à pression atmosphérique, ce qui nous place dans le cas de figure d'une barrique à système d'obturation non étanche (bonde bois ou verre).

Le dispositif a une contenance totale de 480 cm^3 qui se répartit comme suit :

- 350 cm^3 pour le volume de la "chambre" bois - P.V.C. ;

- 100 cm^3 pour le volume "utile" du tube de verre qui sert de réservoir de liquide ;

- 30 cm^3 pour le volume restant (huile de vaseline et volume de garde).

La pression exercée par le liquide sur les disques de bois (hauteur de la colonne de liquide) est approximativement comparable à celle qui s'applique au centre des pièces de fonds d'un tonneau de petite capacité (230 l environ).

Au remplissage, le rapport surface de bois / volume de liquide est de : 62 cm^2/0,450 l soit 138 cm^2/l. Ce rapport augmente légèrement au cours du temps du fait de l'imprégnation et de l'évaporation (en moyenne 151 cm^2/l après 200 jours). A titre de comparaison, le rapport surface de bois/volume de liquide pour une "pièce" bourguignonne de 228 l est sensiblement du même ordre de grandeur soit : 27 000 cm^2/228 l = 118 cm^2/l.

En revanche, l'épaisseur des disques utilisés dans les dispositifs est environ le tiers de celle d'une douelle de tonneau bourguignon (9 contre 25 à 27 mm). On a ainsi cherché à accélérer les phénomènes de transfert dont les cinétiques pour atteindre l'équilibre sont particulièrement lentes. La perméabilité du bois de chêne dans la direction considérée (tangentielle) est en effet extrêmement faible (CHOONG et *al.*, 1974).

II — MESURE DES PERTES DE LIQUIDE PAR IMPRÉGNATION ET PAR ÉVAPORATION

Le but est de mesurer les cinétiques de l'imprégnation du liquide dans le bois et de l'évaporation à sa surface dans l'air ambiant.

1°) Principe de la mesure

- la mesure du déplacement de liquide dans le tube en verre permet de déterminer le volume total des pertes de liquide par imprégnation et par évaporation (1).

- la mesure de la perte de masse du dispositif correspond à l'évaporation à la surface du bois dans l'air ambiant (2).

- le volume de liquide imprégné dans le bois est calculé par différence entre les volumes (1) et (2).

2°) Appareils de mesure

Les variations de masse au cours du temps (2) sont mesurées avec une balance de type Sartorius BA 2100S donnant une précision de ± 0,01 g.

La mesure du déplacement de liquide dans le tube de verre (1) est effectuée avec un trusquin sur lequel nous avons adapté une lunette de visée munie d'un réticule. La précision de l'appareil permet une mesure à ± 0,01 mm.

3°) Mode opératoire pour la mesure des pertes totales de liquide (imprégnation et évaporation)

- le dispositif est fixé sur un support rigide afin de réaliser les mesures dans des conditions toujours identiques ;

- on commence par viser l'extrémité supérieure du tube de verre qui sert de point origine (remise à 0 du trusquin) ;

- puis on vient viser le bas du ménisque formé par la zone de contact entre les deux liquides non miscibles. Afin d'augmenter le contraste, on éclaire le ménisque par le bas avec une lampe à fibre. Le faible pouvoir calorifique de la lampe utilisée évite la dilatation du liquide pendant la mesure. Le cadran du trusquin affiche alors la valeur de la distance à l'origine en mm.

Les données (poids en g et distance à l'origine en mm) sont saisies directement sur un micro-ordinateur portable grâce à des programmes spécifiques mis au point à la Station de Recherches sur la Qualité des Bois.

Les pertes mesurées sont exprimées en volume (cm^3). Pour les pertes de masse, on admettra que c'est uniquement de l'eau qui s'évapore soit 1 g = 1 cm^3.

4°) Conditions environnementales

Afin de se placer en situation œnologique, les dispositifs ont été installés dans une cave avec les conditions hygrothermiques suivantes pour la période considérée (6 avril au 25 octobre) : 15°C ±1 et 90 p. cent ± 3,5 (humidité relative). La figure 2 montre que les variations de température ont été progressives dans le temps alors que les variations de l'humidité relative se sont révélées beaucoup plus fluctuantes.

Une illustration du dispositif expérimental en cave est donnée dans la figure 3.

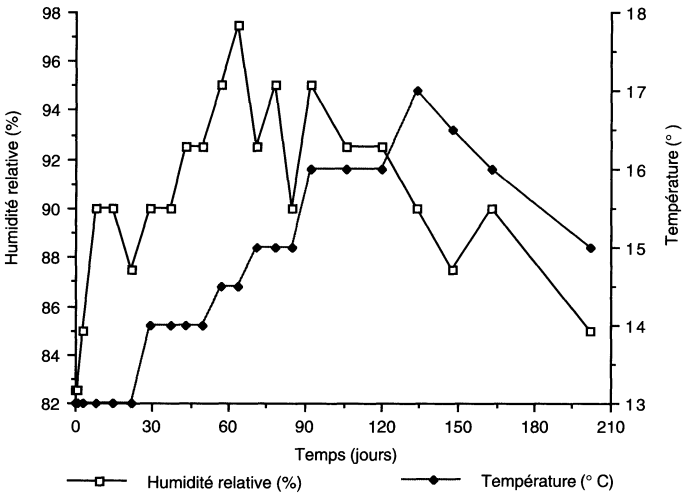


Fig.2 — Courbes de température et d'humidité relative de l'air pendant l'expérience (du 6 avril au 25 octobre 1993)

5°) Fréquence des mesures

Il convient de mentionner que les dispositifs ont été entreposés dans la cave pendant 8 jours avant remplissage. Les premières mesures ont été effectuées après 24 heures pour les pertes totales pour suivre l'imbibition du liquide qui est très rapide au départ et après 72 heures pour les pertes par évaporation. Puis, celles-ci ont été de plus en plus espacées au fur et à mesure de l'avancement dans le temps : 8 jours, 15 jours et 39 jours. L'expérience a été conduite sur une durée totale de 202 jours.

6°) Précision de la mesure des pertes

En remarque préliminaire, il convient de mentionner que toutes les mesures ont été effectuées par la même personne ce qui dans notre cas élimine un biais possible du aux différences d'appréciations selon l'observateur.

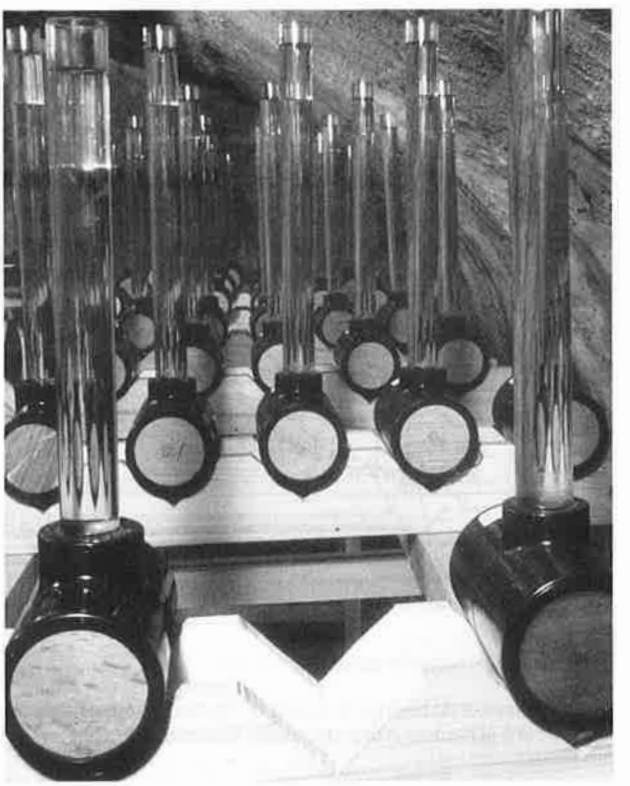


Fig. 3 — Présentation du dispositif expérimental en cave

Les variations de masse et de hauteur du liquide mesurées sur un modèle témoin "étanche" (disques en bois remplacés par des rondelles en P.V.C.) montrent une lente dérive dans le temps par rapport aux valeurs de départ (figure 4). On remarque que les variations de masse et de hauteur présentent grosso modo la même évolution dans le temps. Cette "dérive" peut être imputée à un ensemble de facteurs non contrôlés : effets de la température et de la pression atmosphérique sur la forme des ménisques, "micro échanges" au travers de l'huile de vaseline, dépôts de poussières... Afin de s'affranchir de ces biais expérimentaux, les mesures de masse et de niveau ont donc été systématiquement corrigées à partir des valeurs obtenues avec ce témoin. La précision des mesures de masse est ainsi égale à celle de la balance soit, ± 0,01 g. Cette valeur représente une erreur moyenne de ± 0,6 p. cent par rapport aux pertes de masse cumulées sur 200 jours. L'erreur maximale égale à ± 11,2 p. cent est observée sur la première mesure (lorsque le flux d'évaporation est minimum).

Des essais de répétabilité de mesure de la hauteur de liquide effectués systématiquement sur 10 dispositifs choisis au hasard donnent une valeur moyenne de ± 0,018 mm avec un écart type du même ordre de grandeur. Les autres sources d'imprécision sur le calcul du volume des pertes totales de liquides sont liées à la sensibilité du trusquin (± 0,01 mm) et à la précision du diamètre du tube de verre (± 0,01 mm).

Si on tient compte de ces différentes imprécisions, on obtient une erreur moyenne de ± 1,6 p. cent par rapport aux pertes totales observées sur 200 jours. L'erreur maximale observée sur les pertes totales est voisine de 4 p. cent.

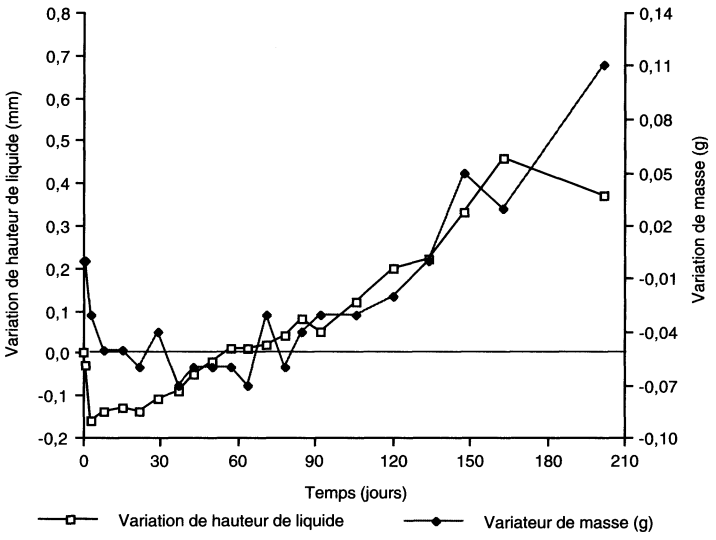


Fig. 4 — Variation de masse et de hauteur de liquide en fonction du temps rapportée à la masse et à la hauteur initiale du modèle témoin en P.V.C.

7°) Répétabilité entre modèles "jumeaux"

Des paires de modèles "jumeaux" ont été fabriqués à partir d'échantillons provenant de deux arbres différents. On a pris soin de croiser les quatre disques découpés par paire dans l'épaisseur de deux éprouvettes prises côte à côte dans un même merrain. En outre, les échantillons ont été soigneusement choisis de façon à éliminer tous risques de défauts tels que noeuds, fentes...

La "proximité" des courbes d'évaporation et d'imprégnation entre les échantillons appariés montre une répétabilité satisfaisante en regard de la variabilité des phénomènes étudiés (figure 5).

IIII — MATÉRIEL D'ÉTUDE

Les échantillons de chêne provenaient de 11 arbres bien identifiés (8 chênes rouvres et 3 chênes pédonculés) dans 4 forêts traditionnellement réputées pour la qualité de leurs chênes à merrains (CITEAUX, BERTRANGES, DARNEY et TRONÇAIS). Les échantillons de châtaignier et de robinier faux-acacia ont été collectés en usine dans des billons de provenance inconnue. Au total, on disposait de 66 éprouvettes de chêne (6 par arbres) présentant une large gamme de structures anatomiques et de 3 éprouvettes respectivement pour les 2 autres espèces. Tous les échantillons ont été séchés dans un local tempéré (15°C) pendant 12 mois.

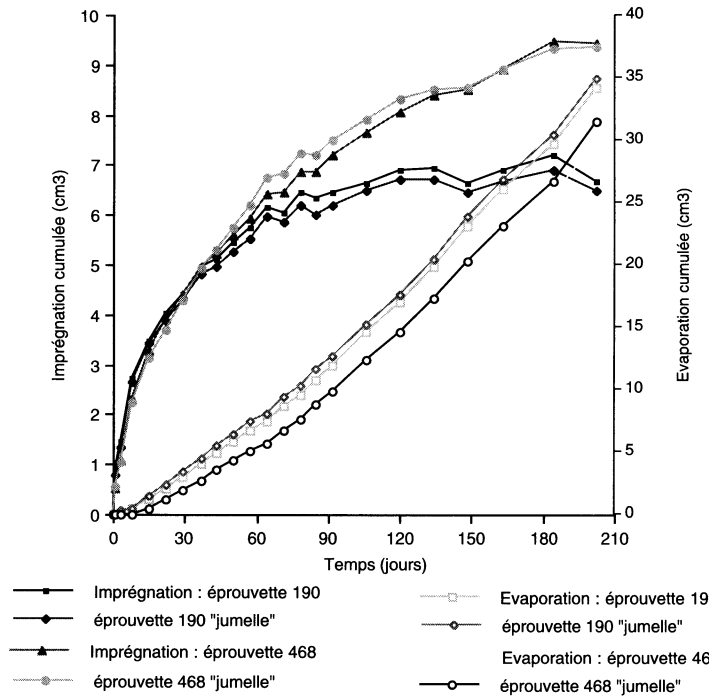


Fig. 5 — Cinétique des pertes cumulées par imprégnation
et par évaporation montrant la répétabilité entre dispositifs "jumeaux"

Dans les figures, les échantillons sont identifiés selon le code suivant : nom d'espèce en français, provenance, numéro d'arbre et numéro d'éprouvette.

Compte tenu des objectifs du présent article, il ne sera présenté ici qu'un nombre restreint de résultats expérimentaux.

RÉSULTATS

I — ANALYSE DES CINÉTIQUES D'IMPRÉGNATION ET D'ÉVAPORATION

Nous raisonnerons dans ce qui suit sur les courbes moyennes établies sur 66 échantillons de bois de chêne (rouvre et pédonculé). Elles peuvent donc être considérées comme caractéristiques du comportement moyen de ces deux espèces dans les conditions expérimentales précisées.

La figure 6 montre que la perte totale cumulée de liquide présente une allure quasi linéaire en fonction du temps. La figure 7 révèle que cette perte totale recouvre en fait deux phénomènes physiques caractérisés par des cinétiques très différentes :

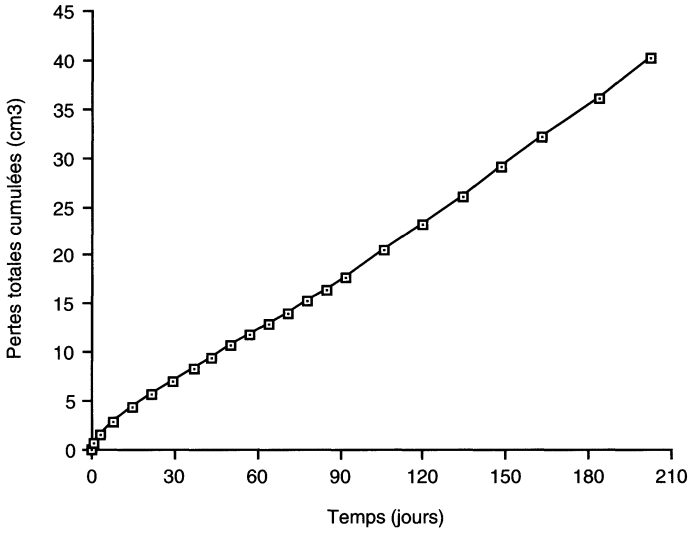


Fig. 6 — Cinétique des pertes totales cumulées pour le bois de chêne (moyenne établie sur 66 éprouvettes)

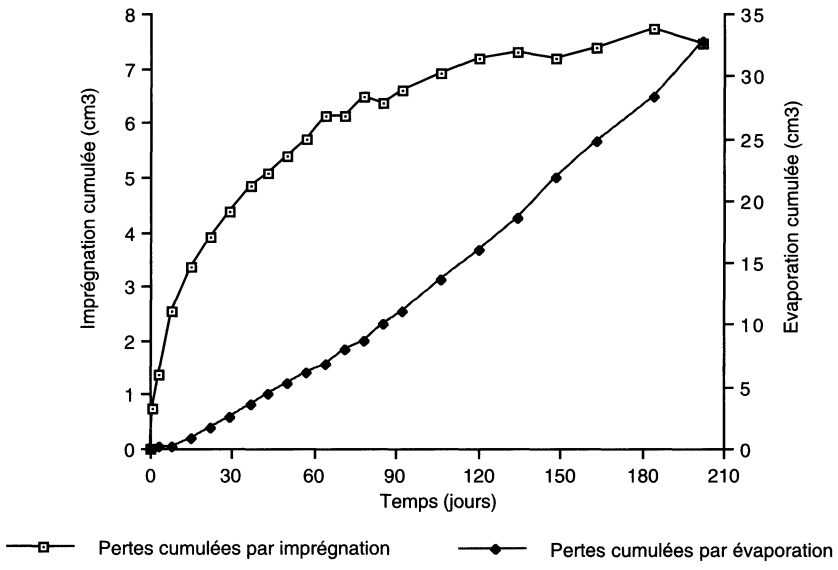


Fig. 7 — Cinétiques des pertes cumulées par imprégnation et par évaporation pour le bois de chêne (moyennes établies sur 66 éprouvettes)

- l'imprégnation, ou l'imbibition du liquide dans le bois, qui est très rapide pendant les premiers jours, puis décroît de façon asymptotique ;

- l'évaporation par la face "sèche" du bois qui intervient après un retard, puis devient progressivement une fonction quasi linéaire du temps aux variations près des conditions ambiantes (humidité relative de l'air notamment).

Il est usuel de représenter l'imprégnation de liquide dans le bois en fonction de la racine carrée du temps (STAMM, 1973 ; PETTY, 1975). L'examen de la figure 8 montre ainsi les trois phases caractéristiques du phénomène :

- une première phase où l'imprégnation est très rapide (40 premiers jours environ) ;

- une deuxième phase où l'imprégnation se ralentie sensiblement (40^{ième} au 140^{ième} jour environ) ;

- une troisième phase où l'imprégnation est stabilisée (140^{ième} au 202^{ième} jour environ).

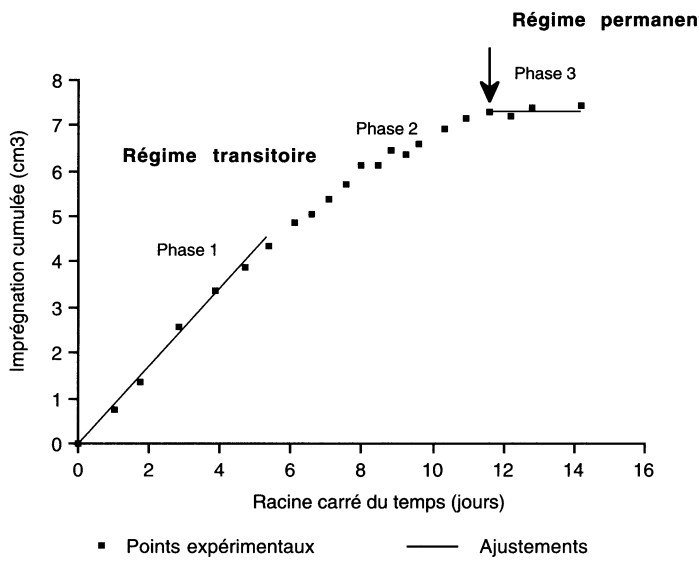


Fig. 8 — Cinétique des pertes cumulées par imprégnation en fonction de la racine carrée du temps pour le bois de chêne (moyenne établie sur 66 éprouvettes)

En ce qui concerne l'évaporation, le retard observé résulte de deux phénomènes dont les effets propres ne peuvent être clairement différenciés dans nos conditions expérimentales :

- temps de migration de l'humidité de la face humide à la face "sèche" ;

- sorption de vapeur d'eau contenue dans l'air humide par le bois pour atteindre l'humidité d'équilibre déterminée par les conditions hygrothermiques ambiantes (SKAAR, 1988).

Le phénomène de sorption est ici mis en évidence par la reprise de masse observée sur plusieurs échantillons dans les premières campagnes de mesures (figures 10 et 12).

Les conditions ambiantes moyennes de la cave (15°C et 90 p . cent d'humidité relative) correspondent à une humidité d'équilibre du bois de 22 p. cent. On se rappelle que l'humidité initiale des pièces de bois était à 15 p. cent.

On observe d'autre part dans la figure 7 une rupture de pente de l'évaporation à 80, 90 jours que l'on peut interpréter par un changement des conditions de transfert externe. La figure 2 montre en effet une augmentation de la température et surtout une diminution de l'humidité relative de l'air à partir de 90 jours et jusqu'à 202 jours.

Il est à noter cependant, que la rupture de pente de l'évaporation coïncide également avec la phase de ralentissement sensible de l'imprégnation de liquide dans le bois (figure 7). D'une façon générale, la diffusion de l'humidité dans le bois augmente avec sa teneur en humidité dans les trois directions principales d'étude du plan ligneux (SIAU, 1984). L'hypothèse d'une modification des conditions de transfert interne (augmentation de l'humidité de la pièce de bois) ne peut donc pas être écartée dans l'interprétation du phénomène.

En résumé, l'analyse des cinétiques a permis de caractériser le fonctionnement en régime transitoire et permanent (état d'équilibre). Dans la première phase du régime transitoire, la vitesse de l'imprégnation est maximale puis diminue de façon asymptotique. Parallèlement, après un temps de latence de quelques jours, appelé "retard à l'évaporation" le flux massique tend a devenir une fonction linéaire du temps (aux variations près des conditions ambiantes).

Le système tend vers un état d'équilibre lorsque l'imprégnation a atteint l'asymptote (ou une valeur proche). Le régime permanent (figure 8) se caractérise alors par un flux sortant (évaporation à la face externe) équivalent au flux entrant (imprégnation à la face interne). Durant cette phase, le profil d'humidité sur l'épaisseur est en équilibre avec les conditions ambiantes. Le flux mesuré est alors seulement dépendant de l'évaporation, fonction linéaire du temps. Il y a rupture de l'état d'équilibre chaque fois que les conditions de transferts externes sont modifiées. Dans notre cas, les variations d'humidité relative de l'air (figure 2) rendent ainsi compte du "bruit" observé sur les courbes d'imprégnation et d'évaporation (figure 7).

II — EXEMPLES DE LA VARIABILITÉ DES PHÉNOMENES D'IMPRÉGNATION ET D'ÉVAPORATION EN RELATION AVEC L'ORIGINE DU BOIS

1°) Variabilité interspécifique

La figure 9 permet de comparer les courbes moyennes d'imprégnation et d'évaporation du bois de chêne (rouvre et pédonculé) avec celles de deux autres espèces jadis employées en tonnellerie (châtaignier et robinier faux-acacia). On observe que le robinier faux-acacia a des pertes significativement plus faibles que celles du chêne et du châtaignier avec un facteur de :

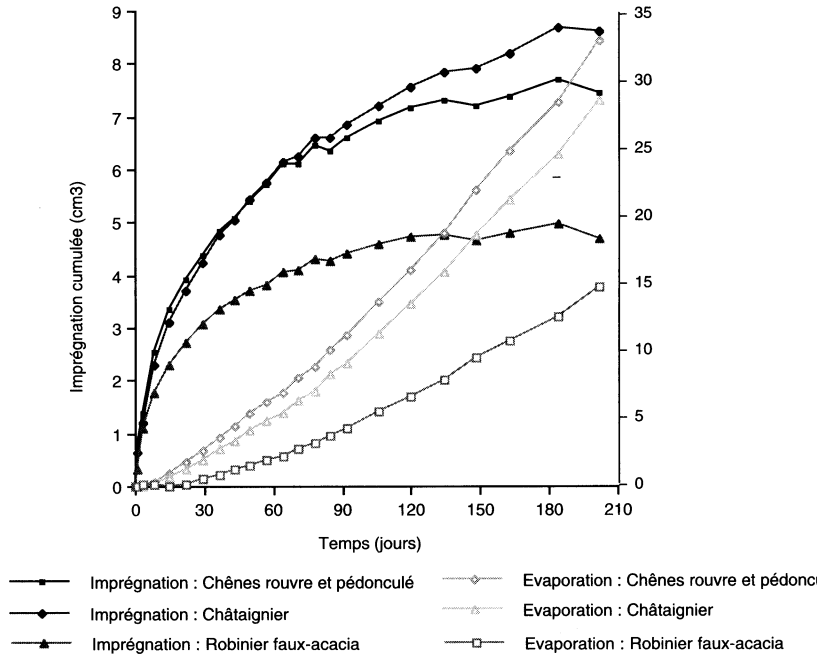


Fig. 9 — Variabilité interspécifique de la cinétique des pertes cumulées par imprégnation et par évaporation (moyennes établies sur 66 éprouvettes pour le chêne et sur 3 éprouvettes respectivement pour le chataîgnier et le robinier faux-acacia)

- 1 à 1,8 (châtaignier) sur l'imprégnation cumulée à 202 jours ;
- 1 à 2,2 (chêne) sur l'évaporation cumulée à 202 jours ;
- 1 à 2 sur les pertes totales cumulées à 202 jours.

Cette même espèce présente corrélativement un "retard à l'évaporation" de 15 jours alors que pour le chêne et le châtaignier les premières pertes de masse ont été mesurées en moyenne après 72 heures (figure 10).

La comparaison des courbes d'imprégnation du chêne et du châtaignier ne montre pas de différences significatives jusqu'à environ 100-110 jours. Puis, on observe une stabilisation de l'imprégnation plus rapide chez le chêne que chez le châtaignier. Ce dernier ne semble pas avoir atteint l'asymptote après 200 jours. En outre, et malgré un niveau d'imprégnation plus élevé en fin d'expérience, le châtaignier présente des pertes par évaporation plus faibles que celles du chêne.

Ces résultats semblent contradictoires avec les observations de RIBÉREAU-GAYON et PEYNAUD (1961) qui signalent que le "consume est beaucoup plus important avec le châtaignier qu'avec le chêne". L'explication de cette contradiction (au moins apparente) tient peut être précisément à la variabilité intraspécifique telle qu'elle sera illustrée dans ce qui suit. Enfin, les observations rapportées par ces auteurs portaient sur des futailles ce qui est assez éloigné de nos conditions expérimentales (épaisseur du bois notamment).

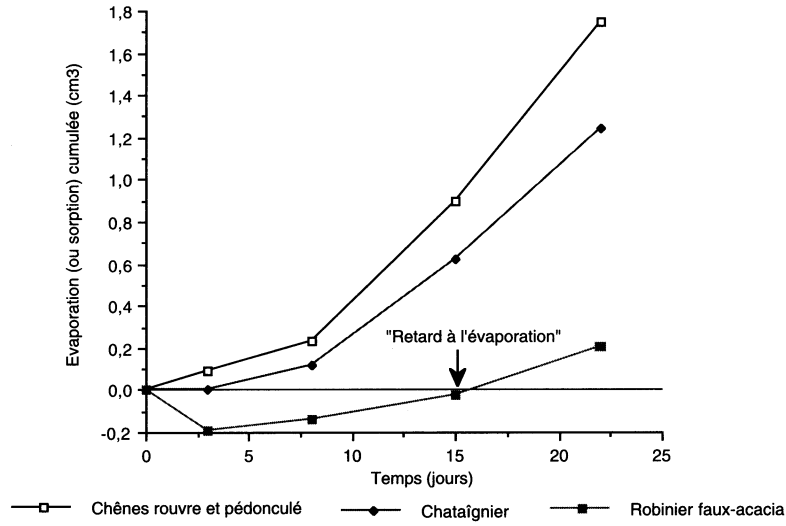


Fig. 10 — Variabilité interspécifique du "retard à l'évaporation" (moyennes établies sur 66 éprouvettes pour le chêne et sur 3 éprouvettes respectivement pour le chataîgnier et le robinier faux-acacia)

2°) Variabilité intraspécifique chez les chêne rouvre et pédonculé

a) Variabilité interindividuelle

La figure 11 illustre la variabilité observée entre les moyennes d'arbres extrêmes de la même espèce botanique (chêne rouvre). On relève ainsi entre les extrêmes un facteur de :

- 1 à 1,3 sur l'imprégnation cumulée à 202 jours ;
- 1 à 1,4 sur l'évaporation cumulée à 202 jours.

Il est à noter que ce ne sont pas les mêmes arbres qui présentent les valeurs extrêmes pour l'imprégnation et l'évaporation. Des différences significatives d'imprégnation et d'évaporation ont été également observées entre arbres de la même forêt.

b) Variabilité entre les échantillons extrêmes

La figure 12 présente les valeurs extrêmes de "retard à l'évaporation" relevées pour tous les échantillons de chêne. On note que le départ de l'évaporation s'échelonne de 0 à 11 jours entre les extrêmes. Cette dernière valeur est comparable aux résultats obtenus avec le robinier faux-acacia. Il convient de rappeler ici que les dispositifs ont séjourné dans la cave pendant 8 jours à "vide". En outre, la première mesure d'évaporation a été effectuée 72 heures après remplissage. Ceci peut expliquer l'absence de "retard à l'évaporation" pour les échantillons qui avaient déjà atteint l'humidité d'équilibre et pour lesquels la migration de l'humidité de la face interne à la face externe a été plus rapide.

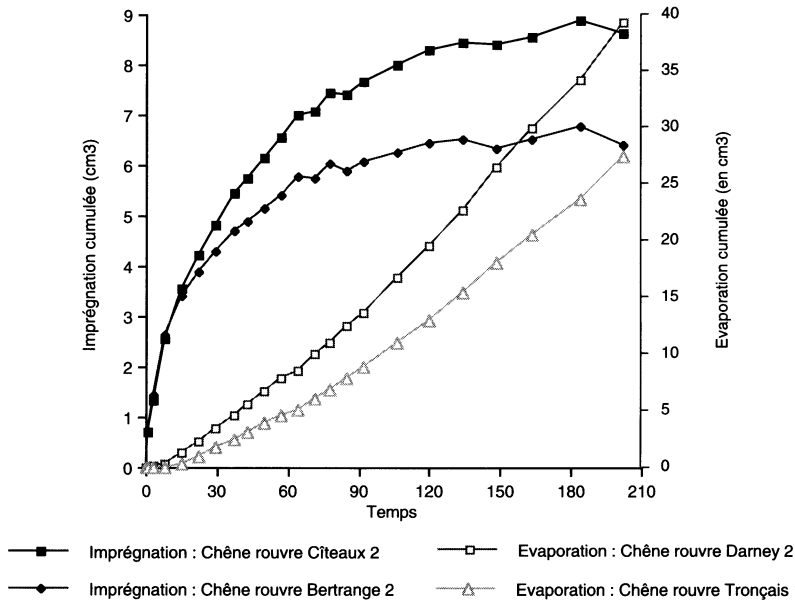


Fig. 11 — Variabilité interindividuelle de la cinétique des pertes cumulées par imprégnation et par évaporation pour le chêne rouvre (moyennes établies sur 6 éprouvettes)

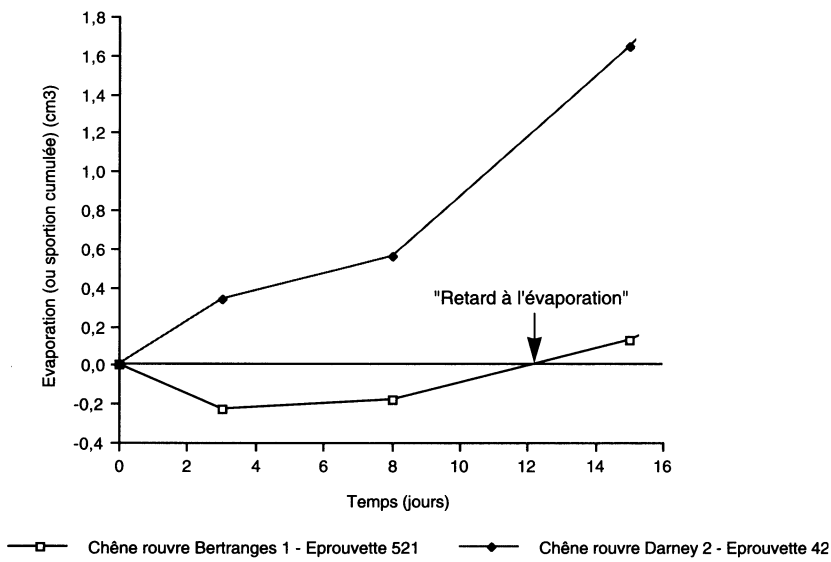


Fig. 12 — Variabilité intraspécifique du "retard à l'évaporation" pour le bois de chêne (éprouvettes extrêmes parmi les 66)

c) Variabilité intraarbre

La figure 13 présente un exemple singulier où l'on a pu observer une variabilité avec un facteur de 1 à 2 pour l'imprégnation et de 1 à 1,7 pour l'évaporation entre éprouvettes du même arbre !

La présence de bois de tension qui est nettement plus hygroscopique que le bois normal (abondance de cellulose) est supputée pour expliquer une telle variation.

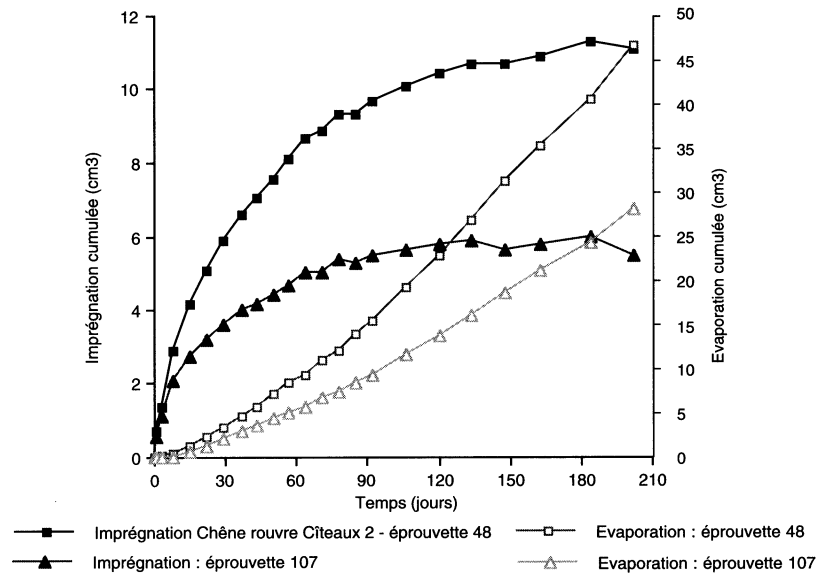


Fig. 13 — Variabilité intraarbre (chêne rouvre) de la cinétique des pertes par imprégnation et par évaporation (éprouvettes extrêmes parmi les 6)

DISCUSSION - CONCLUSION

Au plan méthodologique, le modèle mis au point nous a permis de simuler le comportement de "l'interface tonneau" vis-à-vis des liquides. La précision et la répétabilité de la mesure des pertes par imprégnation et par évaporation est apparue satisfaisante en regard des flux observés.

La miniaturisation des phénomènes a permis de comparer un grand nombre d'éprouvettes tout en ayant une certaine maîtrise des conditions expérimentales. Il y a là un intérêt incontestable eu égard à l'énorme variabilité du bois des chênes rouvre et pédonculé (POLGE et KELLER, 1973 ; FEUILLAT et *al.*, 1993).

Au plan des connaissances, nous avons montré que le "consume" des tonneaux en cave met en jeux deux phénomènes physiques qui sont :

- l'imprégnation de liquide dans la structure du bois;

- l'évaporation à sa surface dans l'air ambiant.

L'analyse des cinétiques de ces phénomènes a permis de décrire le régime transitoire et permanent. Les évènements caractéristiques du régime transitoire sont :

- une phase d'imprégnation très rapide pendant les 40 premiers jours qui décroît ensuite de façon asymptotique;

- une phase de latence appelée "retard à l'évaporation", suivi d'un flux massique qui tend à devenir une fonction linéaire du temps.

Le système est à l'équilibre lorsque l'imprégnation a atteint l'asymptote (profil d'humidité en équilibre avec les conditions ambiantes). Le fonctionnement à l'équilibre se caractérise alors par un flux entrant (imprégnation à la face interne) de même grandeur que le flux sortant (évaporation à la face interne).

Ces résultats concordent assez bien avec les observations en cave qui indiquent que le volume de "consume" est plus important la première année d'utilisation des futailles (bois neuf), et notamment pendant les premières semaines qui suivent l'entonnage (PONTALLIER, 1987). Le régime des pertes minimales serait atteint lorsque le bois est totalement imprégné, par exemple en deuxième année d'utilisation du fût. L'analogie avec le tonneau ne peut pas être poussée plus loin, faute de données plus précises dans la littérature. Il faudrait aussi considérer l'incidence de la chauffe, de l'épaisseur du bois, des joints interdouelles, et du système d'obturation du fût ("bonde") sur les phénomènes physiques envisagés.

Le deuxième point notable de l'étude concerne les variations quantitatives des phénomènes. Ces variations sont apparues dépendantes des conditions de transfert externe (humidité relative de l'air notamment), mais aussi des conditions de transfert interne (propriétés de la pièce de bois). Si on fait une analogie avec le séchage du bois, les facteurs internes seront d'autant moins déterminants au fur et à mesure de la resaturation de la pièce en humidité (VILLERS, 1966). En conséquence, à l'équilibre, les pertes seront principalement régulées par les facteurs externes.

L'effet des conditions ambiantes (humidité relative de l'air et température) sur le "consume" au cours de l'élaboration des vins et des eaux-de-vie en fûts est bien connu des praticiens (RIBÉREAU-GAYON, 1933 ; CAUMEIL, 1983 ; PONTALLIER, 1987).

Une étude fine en conditions contrôlées (chambre climatisée) permettrait cependant de préciser l'influence de ces différents facteurs de transfert interne et externe et de leurs interactions au cours des différentes phases précédemment décrites.

Toutes conditions étant égales par ailleurs, nous avons observé une variabilité significative de comportement entre les échantillons. Ces différences sont vraisemblablement imputables à la variabilité anatomique du bois aux niveaux interspécifique mais aussi intraspécifique (individuel et intraarbre), caractère particulièrement manifeste pour les deux chênes indigènes employés en tonnellerie. Ce point fait l'objet d'une étude en cours.

Eu égard à ce qui a été exposé en introduction et sous réserve d'une validation en vraie grandeur, cette variabilité pourrait avoir des conséquences sur les phénomènes oxydatifs lents qui caractérisent la maturation des vins et des eaux-de-vie sous bois. L'incidence de l'imprégnation sur l'extraction des composés du bois est une deuxième piste qu'il conviendrait d'explorer.

L'approche originale présentée ici devrait contribuer à l'étude de ces phénomènes en relation avec les propriétés intrinsèques du bois des merrains et les modifications induites par les effets technologiques (séchage, brûlage).

Remerciements :

La présente étude s'inscrit dans le cadre des travaux actuellement conduits par le G.I.S.T. Vignes et Vins de BOURGOGNE sur le thème des relations "Qualité du Bois - Qualité du Vin".

Les auteurs remercient :

- le Conseil Régional de Bourgogne, la Direction Générale de l'Office National des Forêts en la personne de Monsieur l'Ingénieur Général LACROIX J.P. et la Direction Régionale de Bourgogne qui financent et participent à cette étude sur les propriétés du chêne de tonnellerie.

- les Dr F. MOTHE, T. CONSTANT ET J. KLUMPERS qui ont accepté de relire ce manuscrit.

Manuscrit reçu le 10 mars 1994; accepté pour publication le 1er septembre 1994

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAUMEIL M., 1983. Le Cognac. *Pour la Science*, décembre 1983, 48-57.

CHOONG E. T., TESORO F.O., and MANVILLER F. G., 1974. Permeability of twenty-two small diameter hardwoods growing on southern pine sites. *Wood Fiber*, **6**, n°1, 91-101.

COMSTOCK G.L., 1963. Moisture diffusion coefficient in wood as calculated from adsorption desorption, and steady-state data. *For. Prod. J.*, **13**, 97-103.

FEUILLAT F., HUBER F., et KELLER R., 1993. La porosité du bois de chêne (*Quercus robur L., Quercus petraea Liebl.)* utilisé en tonnellerie. Relation avec la variabilité de quelques caractéristiques physique et anatomique du bois. *R. F. Œ.*, **142**, 5-19.

MOUTOUNET M., MAZAURIC J.P., SAINT PIERRE B., MICALEFF J.P.et SARRIS J., 1993. Causes et conséquences de microdéformations des barriques au cours de l'élevage des vins. In "*Aquisitions récentes sur le bois de chêne destiné à l'élevage des vins et des eaux-de-vie*". SITEVI Montpellier, 23 novembre 1993.

PETTY JA., 1975. Relation between immersion time and absorption of petroleum distillate in a vacuum- pressure process. *Holzforschung*, **29**, 113-118.

POLGE H. et KELLER R., 1973. Qualité du bois et largeur d'accroissement en forêt de Tronçais. *Ann. Sci. For.*, **30**, 2, 91-125.

PONTALLIER P., 1987. Pratiques actuelles de l'élevage en barrique des grands vins rouges. N°spécial Conn. Vigne et Vin, "*Le bois et la qualité des vins et des eaux-de-vie*", 143-149.

RIBÉREAU-GAYON J., 1933. Contribution à l'étude des oxydations et réductions dans les vins. Application à l'étude du vieillissement et des casses. *Thèse Sc. Phys.*, Bordeaux, 2ième Edition DELMAS, BORDEAUX, 213 pp.

RIBÉREAU-GAYON J. et PEYNAUD E., 1961. *Traité d'oenologie II. Composition, transformations et traitements des vins*. Edition BERANGER, BAYEUX, 1065 pp.

SKAAR C., 1988. *Wood. Water Relations*. SPRINGER-VERLAG, BERLIN, HEIDELBERG, NEW YORK, LONDON, PARIS, TOKYO, 283 pp.

SIAU J.F., 1984. *Transport Processes in Wood*. SPRINGER - VERLAG, BERLIN, HEIDELBERG, NEW YORK, LONDON, PARIS, TOKYO, 245 pp.

STAMM A., 1973. Penetration of hardwoods by liquids. *Wood Sci.Technol.*, **7**, 285 - 296.

VILLIERE A., 1966. *Séchage des bois*. Edition DUNOD, PARIS, 409 pp.