



HAL
open science

Discoloration du hêtre *Fagus sylvatica* lors d'un séchage convectif basse température

Ruben Ananias, Jean-Pierre Haluk, Eric Mougel, André Zoulalian

► **To cite this version:**

Ruben Ananias, Jean-Pierre Haluk, Eric Mougel, André Zoulalian. Discoloration du hêtre *Fagus sylvatica* lors d'un séchage convectif basse température. 4. Journée Forêt-Bois, 2000, Epinal, France. hal-02764061

HAL Id: hal-02764061

<https://hal.inrae.fr/hal-02764061>

Submitted on 4 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Discoloration du hêtre *Fagus sylvatica* lors d'un séchage convectif basse température

Rubén A. Ananías** - Jean-Pierre Haluk* - Eric Mougel*
André Zoulalian*

* Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur le Matériau Bois LERMAB, Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois ENSTIB, Université Henri Poincaré.

27 rue du Merle Blanc, BP 1041, 88051 Epinal cedex

eric.mougel@enstib.uhp-nancy.fr

** Departement d'Ingénierie du Bois, Université du Bío-Bío

1202 Avenida Collao, Concepción, Chili.

Ananias@pegasus.dci.ubiobio.cl

RÉSUMÉ : La discoloration du hêtre au cours du séchage serait due à une réaction chimique d'oxydation des certains constituants extractibles (tanins). Cette étude a pour objectif de vérifier les conditions de séchage dans lesquelles ces discolorations se développent et de contribuer à l'identification des constituants du bois et des mécanismes à l'origine de celles-ci. Des essais effectués sous atmosphère désoxygénée confirment que l'absence d'oxygène permet d'obtenir un bois de couleur claire. Il est également montré que des échantillons de bois dont on élimine une partie des extractibles ne présentent pas de discoloration au séchage. Il est mis en évidence que les tanins condensés présents dans le bois de hêtre peuvent, dans certaines conditions de température et d'humidité, être transformés par oxydation en composés colorés.

ABSTRACT : For beech, the phenomena of kiln drying discoloration during wood drying at low temperature could be a chemical decomposition of extractives in the presence of oxygen; it is conditioned by the wood moisture content and the kiln drying parameters. The aim of this study is to determine the role of extractives and oxygen in the kiln drying discoloration of beech. The condensed tannins are precursor of kiln drying discoloration of beech. The oxygen susceptibility of condensed tannins, indicate that oxygen is involved in the kiln drying discoloration of beech. The postulated mechanism of kiln drying discoloration at low temperature of beech is that during the drying the catechin is transformed in quinona and polymerised in colored compounds by a chemical oxidation reaction controlled by the drying conditions.

MOTS-CLÉS : séchage, discoloration, hêtre, *Fagus sylvatica*

KEY WORDS : wood drying, discoloration, beech, *Fagus sylvatica*

1. Introduction.

Le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) est une des essences les plus importantes pour l'industrie du bois française. Depuis que la mode des bois clairs est apparue, l'industrie recherche des sciages clairs et de couleur homogène. Les sciages de hêtre présentent souvent des traces colorées qui apparaissent au cours du séchage. Ces discolorations hétérogènes sont parfois localisées sur les faces des pièces de bois ou seulement à l'emplacement des lattes d'empilage (taches des baguettes).

Il semble que ces discolorations au cours du séchage du hêtre sont dûes à la transformation chimique des extractibles en présence d'oxygène. La réaction est conditionnée par l'humidité initiale du bois, la température de séchage et la présence d'oxygène dans l'atmosphère de séchage. Irmouli [IRM 98] montre le rôle précurseur des extractibles, notamment des tanins condensés sur la discoloration rose du hêtre lors de l'étuvage. Il a mis en évidence la conversion par hydrolyse acide des proanthocyanidines du hêtre en cyanidine qui est un pigment anthocyanique de couleur rouge.

Le processus de discoloration par oxydation chimique au cours du séchage du hêtre serait semblable à celui observé dans le cas du chêne *Quercus* sp [CHA 95], [CHA 92] et de l'érable *Acer* sp. [MIL 90], mais différent du celui conduisant au brunissement du pin *Pinus* sp [McD 00].

Pour le chêne, il a été montré que la discoloration est d'origine oxydative et que les tanins hydrolysables sont les précurseurs du brunissement [CHA 95], [CHA 92]. Après des analyses d'échantillons de chêne prélevés sur des zones colorées et non colorées, un mécanisme de dégradation hydrolytique des tanins hydrolysables (ellagitanins) en castalagine et en un résidu de la castalagine facilement oxydable et capable de produire des composés jaunes et bruns a été proposé. En complément, des essais de séchage sous vide en vapeur surchauffée ont montré l'absence de brunissement, ce qui signifie pour ces auteurs la participation d'un mécanisme oxydatif [CHA 92], [CHA 92].

Par contre, la discoloration du pin est due à une réaction thermochimique entre les sucres et des composés azotés du bois (réactions de Maillard), laquelle se développe au dessous de la surface. Le brunissement provient de la formation d'un gradient de concentration en sucres réducteurs (fructose) et composés azotés (acides aminés tels que l'acide glutamique). Celui ci est produit par la migration de l'eau au cours du séchage sous certaines conditions de température. Les sucres dissous dans l'eau peuvent réagir avec des acides aminés pour produire une coloration brune au-dessous de la surface du bois [McD 00]. Il a été montré que le brunissement au cours du séchage du pin apparaît 0.5 mm au-dessous de la surface du bois et peut pénétrer jusqu'à 2 mm à l'intérieur des sciages [KRE 98], [TER 95].

Une autre forme de discoloration souvent observée au cours du séchage du hêtre se traduit par des taches sous les baguettes. Ce type de discoloration semble être aussi d'origine oxydatif. Pour l'érable, il a été observé une faible quantité

d'extractibles phénoliques dans les zones tachées sous les baguettes ; ceci conforte l'hypothèse d'une oxydation de composé phénoliques insolubles [MIL 90].

| Essence | Mécanisme |
|----------------|--|
| Hêtre | Hydrolyse et oxydation chimique des proanthocyanidines (Irmouli, 1998) |
| Chêne | Hydrolyse et oxydation chimique des ellagitanins (Charrier , 1992) |
| Érable | Oxydation chimique des composés phénoliques (Miller et al. 1990) |
| Pin | Réactions de Maillard avec les sucres réducteurs (McDonald et al.2000) |

Tableau 1. Mécanismes à l'origine des discolorations au cours du séchage ou étuvage du bois.

Plusieurs méthodes permettent de réduire les discolorations du bois au cours du séchage, mais la plupart restent encore du domaine de la recherche. Les traitements chimiques peuvent permettre de réduire les discolorations, et leur association à des traitements biologiques devrait vraisemblablement donner des solutions plus performantes [KRE 99]. A l'heure actuelle, à l'échelle industrielle, seule la maîtrise des conditions de séchage permet de limiter les problèmes de discoloration du hêtre au cours du séchage.

Ainsi, la discoloration de hêtre au cours de séchage à basse température (température maximale du séchoir : 60 °C), n'a pas été suffisamment étudiée. L'hypothèse de l'oxydation des tanins condensés proposée par Irmouli [IRM 98] est vérifiée à des températures d'étuvage proches de 100 °C. Le présent travail porte sur le séchage du hêtre à basse température, et vise à vérifier si des mécanismes identiques sont à l'origine des discolorations.

2. Matériels et méthodes

2.1. Dispositif de séchage

Les cycles de séchage sont réalisés dans la cellule de séchage expérimentale permettant de modifier la nature du gaz circulant. Le système permet de travailler sous vide ou sous pression. Il permet également de travailler sous atmosphère spécifique (azote, oxygène, etc.).

2.2. Mesure de la discoloration

La coloration est caractérisée par spectrophotométrie effectuée selon la méthode CIEL*a*b* que d'autres auteurs ont déjà utilisée lors d'études similaires [CHA 92], [SMI 96]. Les coordonnées chromatiques sont mesurées avant et après séchage. Comme le montre Klumpers [KLU 94], la luminance L* et l'angle de la couleur h sont les coordonnées chromatiques les plus sensibles pour décrire la couleur du bois solide. Ainsi, nous avons choisi pour comparer les cycles de séchage la luminance L* et l'angle de la couleur h. Les mesures colorimétriques sont réalisées sur la surface des éprouvettes entre les lattes et à l'emplacement des lattes. Un chromamètre Minolta cr200b est utilisé pour les mesures expérimentales. Les conditions d'éclairage sont celles du laboratoire.

2.3. Echantillons

Les échantillons de hêtre sont prélevés sur des sciages frais sur la ligne de production d'une scierie de la Région Lorraine (Scierie Clerc, Deyvillers). Après rabotage à dimensions, ils sont stockés à l'abri de la lumière à -20°C pendant la période précédant leur utilisation. Aucune précaution particulière n'a été prise lors de l'échantillonnage quant à l'origine du bois ou à son histoire depuis l'abattage de l'arbre. Nous verrons par la suite que cela peut être à l'origine de difficultés d'interprétation.

Dans le réacteur, deux échantillons de 20 mm d'épaisseur, 42 mm de largeur et 130 mm de longueur sont disposés sur deux niveaux et sont séparés par des baguettes de sapin de 5 mm d'épaisseur et 20 mm de largeur.

2.4. Dosage des tanins condensés du hêtre.

Les tanins condensés sont extraits au méthanol en l'absence d'oxygène sur des échantillons de sciure de hêtre [CHA 92]. La méthodologie proposée, consiste à placer 2 g de sciure de hêtre dans 300 ml de méthanol. Le tout est agité et maintenu à 20°C pendant 24 heures. Afin de limiter les réactions d'oxydation des extraits au cours de l'extraction, l'ensemble est placé sous vide. La solution est filtrée et diluée 6 fois (1 ml d'extrait dans 5 ml de méthanol). A 10 ml d'extrait sont ajoutés 5 ml de méthanol et 2,5 ml de solution 4- diméthylaminocinnamaldéhyde (DMACA). Le mélange est incubé 20 minutes à température ambiante. L'absorbance est ensuite mesurée à 643 nm au spectrophotomètre. La teneur en tanins condensés est déterminée par rapport à une courbe étalon préparée à partir de concentrations connues en D catéchine. Le réactif DMACA est préparé fraîchement en solubilisant 0.3 % (p/v) de DMACA dans un mélange de méthanol- HCl 6N (1/1; v/v)

Des éprouvettes de hêtre (42 x 20 x 130 mm) sont placées sous agitation dans du méthanol à la température ambiante. Des prélèvements sont régulièrement effectués dans la solution. Des dosages réguliers (6, 12, 24 et 48 heures) sont effectués sur la solution au cours de l'extraction. La teneur en extractibles de la solution méthanolique est déterminée selon la méthode décrite auparavant.

2.5. Test de l'oxydabilité des tanins condensés.

Le test consiste à faire barboter de l'oxygène dans la solution d'extrait maintenue à 60°C. Lors des essais d'oxydabilité des tanins condensés, des dosages successifs ont été réalisés au cours de la réaction d'oxydation.

2.6. Caractérisation chromatographique sur couches minces.

L'identification des extraits est réalisée par chromatographie sur couches mince (CCM) de silice à l'aide des solvants acétone/toluène/acide formique (60:60:10, v/v). La révélation des plaques (60 F-254, 20 x 20 x 0.25 mm) est réalisée par pulvérisation de DMACA, qui se traduit par une coloration bleu-vert en présence de proanthocyanidine. Le témoin utilisé est la D(+) catéchine. L'analyse chromatographique des extraits du hêtre a été réalisée avant et après oxydation.

La cyanidine a été caractérisée par CCM sur cellulose en présence du solvant de Forestal (HCl-CH₃COOH-H₂O, 3 :1 :20, v/v), d'un mélange composé de 10 ml d'extrait, 5 ml de butanol et 0,5 ml de HCl 2N

3. Résultats et discussions

3.1. Séchage sous azote, oxygène ou air

Cette série d'essais vise à comparer les résultats obtenus sous différentes atmosphères de séchage (tableau 2).

| cycle | ambiante | T (°C) | t (h) |
|--------------|-----------------|---------------|--------------|
| 1 | oxygène | 50 | 72 |
| 2 | air | 50 | 96 |
| 3 | azote | 50 | 48 |
| 4 | azote | 50 | 48 |
| 5 | azote | 60 | 48 |
| 6 | azote | 70 | 24 |

Tableau 2: Cycles de séchage sous différentes atmosphères

Dans cette série d'essais, nous avons comparé les cycles à partir d'une mesure des coordonnées chromatiques effectuée à la surface des échantillons sous les lattes et entre les lattes. Trois cycles de séchage à 50°C permettent de vérifier l'influence d'atmosphères différentes : oxygène, air et azote. Trois cycles sous atmosphère d'azote à 50, 60 et 70°C sont également effectués.

Les figures 1a à 1d montrent clairement une augmentation de la luminance et de l'angle de la couleur lors du cycle réalisé sous azote. Les variations de la luminance montrent qu'il y a un blanchissement de la surface entre les lattes (figure 1a) et sous les lattes (figure 1c). L'angle de la couleur montre un jaunissement de la surface entre les lattes (figure 1b) et sous les lattes (figure 1d).

Les séchages sous oxygène ou à l'air induisent un rougissement notable entre les lattes et sous les lattes. Une coloration moins intense est observée entre les lattes lors du séchage à l'air (figure 1a), mais un assombrissement comparable sous les lattes est noté dans les deux cas. Ces écarts faibles peuvent également s'expliquer par des humidités initiales différentes pour les deux cycles.

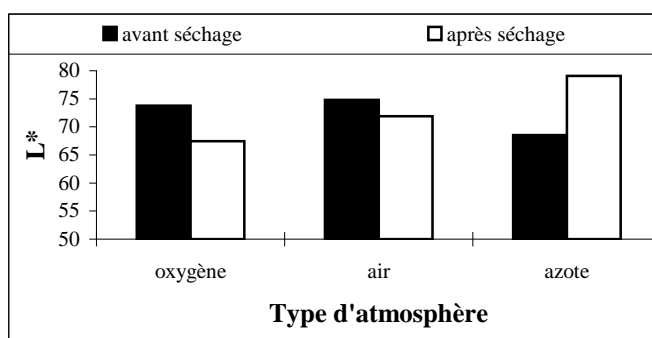


Figure 1a. *luminance entre les lattes*

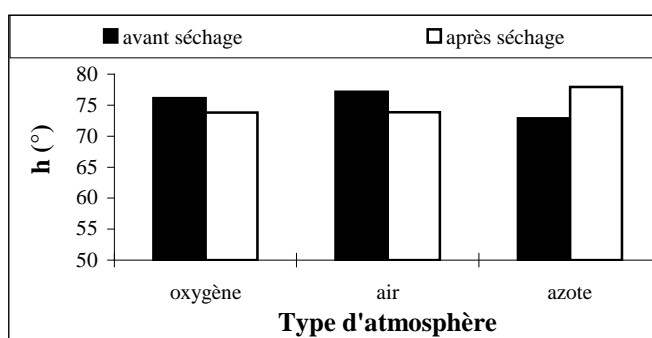


Figure 1b. *angle de couleur entre les lattes*

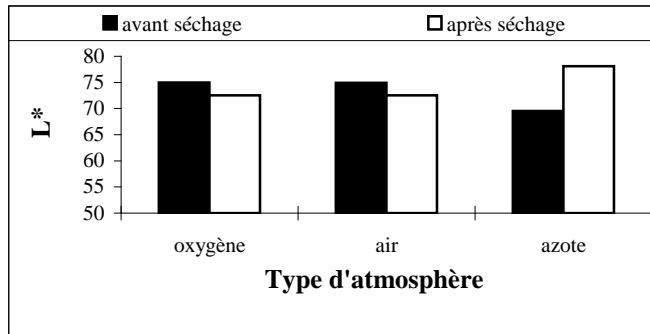


Figure 1c. luminance sous les lattes

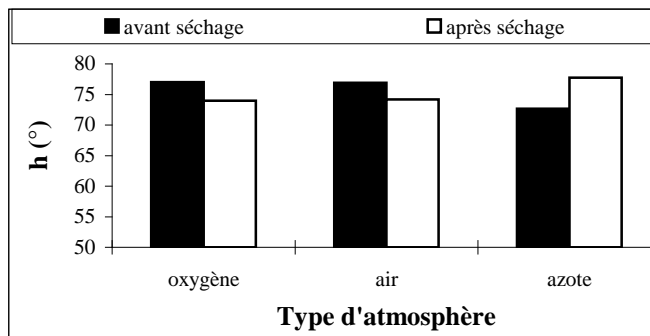


Figure 1d. angle de couleur sous les lattes

3.2. Cycles de séchage sous azote à 50, 60 et 70°C

Les trois cycles de cette série sont réalisés sous azote afin de confirmer les précédents résultats pour différentes températures. Ici, nous avons utilisé trois niveaux de températures: 50, 60 et 70°C.

La plus faible chute de luminance est obtenue à 50°C, près de 4 %. La luminance sous les lattes chute de 2%, ce qui signifie qu'il y a un assombrissement de la surface entre les lattes perceptible par l'œil humain. L'assombrissement sous les lattes n'est pas visible à cette température. A 60°C, le séchage sous atmosphère azotée produit l'assombrissement le plus important, avec une chute de luminance entre lattes de 8.5 %. Lors de ces trois cycles de séchage, la chute de la luminance a été plus importante à la surface entre lattes. Une part de l'assombrissement observé à 50°C peut être dû à la faible vitesse de séchage obtenue dans l'autoclave de séchage, ce qui a imité la

réduction de l'humidité des échantillons de bois. Lors des essais précédents effectués avec des vitesses de gaz (azote) plus élevées, on observe un éclaircissement du bois à 50°C.

L'angle de la couleur entre lattes et sous les lattes est également moins affecté à 50°C. Le cycle à 60°C présente le rougissement le plus notable avec une chute de l'angle de la couleur de près de 9°. Il semble que le cycle à 70 °C induit de plus faibles discolorations par rapport au cycle à 60 °C parce que la vitesse de séchage est plus élevée. Les deux coordonnées chromatiques mesurées montrent que le séchage à 50 °C sous azote conduit à la discoloration la plus faible.

3.3. Le rôle de l'oxygène sur la discoloration du hêtre au cours du séchage

Les cycles effectués sous azote à 50°C confirment que l'absence d'oxygène permet d'obtenir un bois clair. Lorsque la température de séchage augmente jusqu'à 60 ou 70°C, une coloration est de nouveau visible même en l'absence d'oxygène.

Ces résultats montrent que le mécanisme de discoloration du hêtre au cours du séchage à basse température est de nature oxydative. Le processus de discoloration est surtout favorisé par l'élévation de la température mais peut également être plus marqué lors d'un ralentissement du séchage (humidité d'équilibre plus élevée). Les essais réalisés lors de cette étude ne sont pas suffisants pour déterminer la part respective de chacun des paramètres, mais montrent des tendances qu'il sera nécessaire de confirmer.

On peut également observer que lorsque la température de séchage augmente au-delà de 60°C, la désoxygénation ne réduit pas systématiquement la discoloration, ce qui impliquerait la participation d'autres éléments de nature différente sur le mécanisme de discoloration au cours du séchage du hêtre. Ce dernier type de discoloration à plus haute température peut être semblable au brunissement du pin par les réactions de Maillard (réaction de sucres réducteurs avec des aminoacides, [McD 00], [KRE 99]).

3.4. Mise en évidence de l'implication des extractibles (tanins condensés).

3.4.1. Séchage après extraction.

Cette série de cycles de séchage a été effectuée sur du bois dont les tanins ont été partiellement extraits au méthanol. Les échantillons de hêtre sont placés sous agitation dans du méthanol à la température ambiante pendant 6, 12, 24 ou 48 heures. Chaque échantillon est ensuite séché dans le réacteur au côté d'un échantillon témoin sous oxygène à 50°C ou 60°C (tableau 3).

| Cycle | Durée de l'extraction (h) | T (°C) | t (h) |
|-------|---------------------------|--------|-------|
| 7 | 6 | 50 | 48 |
| 8 | 12 | 50 | 48 |
| 9 | 24 | 50 | 48 |
| 10 | 48 | 50 | 48 |
| 11 | 6 | 50 | 48 |
| 12 | 12 | 50 | 48 |
| 13 | 24 | 50 | 48 |
| 14 | 48 | 50 | 48 |
| 15 | 6 | 60 | 24 |
| 16 | 12 | 60 | 24 |
| 17 | 24 | 60 | 24 |
| 18 | 48 | 60 | 24 |

(T : température de séchage. t : temps de séchage)

Tableau 3. Caractéristiques des cycles de séchage après extraction.

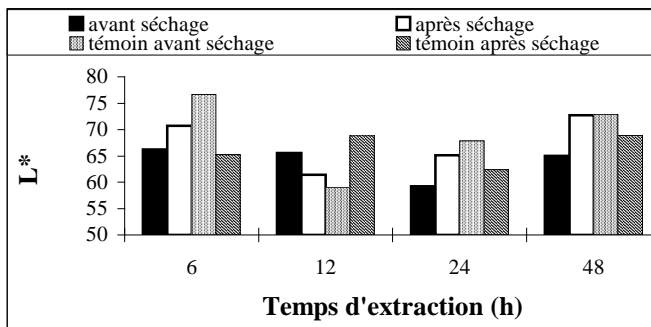


Fig. 2a luminance entre les lattes

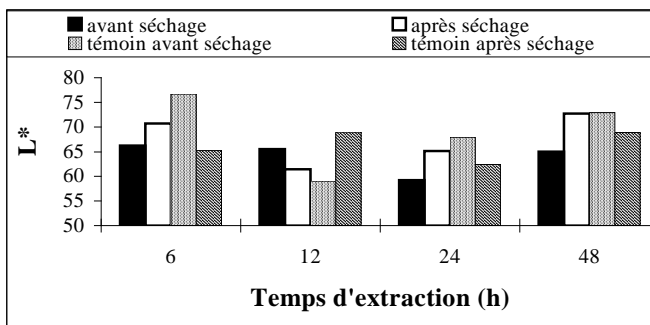


Fig. 2b luminance sous les lattes

Les figures 2a et 2b montrent les coordonnées chromatiques des quatre premiers cycles de séchage à 50°C. La figure 2a montre d'abord que la chute de luminance entre les lattes est toujours plus importante dans le cas des échantillons témoins et ensuite qu'après 24 heures d'extraction le bois est plus clair après séchage (augmentation de la luminance). Les mêmes tendances sont observées sous les lattes (figure 2b).

Les mesures de l'angle de couleur effectuées entre les lattes ou sous les lattes ne font pas apparaître de différences notables entre les échantillons extraits et les échantillons témoins.

Des essais identiques sont réalisés à une température de 60°C. Les écarts sont faibles, mais on observe toutefois une élévation de la luminance sous les lattes, ainsi qu'un rougissement entre lattes dans le cas des échantillons extraits. Il est intéressant de noter que dans cette série de cycles à 60°C le séchage a été assez rapide. Cette vitesse de séchage élevée semble participer à la réduction de la discoloration du bois extrait ou non.

3.4.2. *Le rôle des extractibles sur la discoloration du hêtre au cours du séchage*

Nous avons montré par des mesures des coordonnées chromatiques, que lors des cycles de séchage à 50°C en atmosphère oxygénée, les échantillons dont on a extrait tout ou partie des extractibles au méthanol, présentent moins de discoloration et même un éclaircissement de la surface entre les lattes et sous les lattes.

Par contre, lors des cycles de séchage à 60°C l'effet de l'extraction est assez bien visible sous les lattes mais pas entre les lattes. Ces résultats montrent bien que la cinétique de séchage joue un rôle très important dans le développement de la discoloration du hêtre.

Toutefois, ces résultats montrent que l'extraction au méthanol conduit à une réduction de la discoloration à la surface du bois, ce qui confirme la participation des extractibles tels que les tanins condensés au mécanisme de discoloration du hêtre au cours du séchage à basse température.

3.5. Identification et quantification de tanins condensés.

La figure 3 montre l'augmentation de la teneur en tanins condensés de la solution méthanolique au cours de l'extraction. La teneur en tanins condensés passe de 19 ug/ml (0.03 %/MS) après 6 heures d'extraction à 59 ug/ml (0.06 %/MS) après 48 heures. Une extraction réalisée sur un échantillon de sciure a permis de déterminer la teneur en tanins condensés de 0.28 % par rapport à la masse anhydre (figure 5).

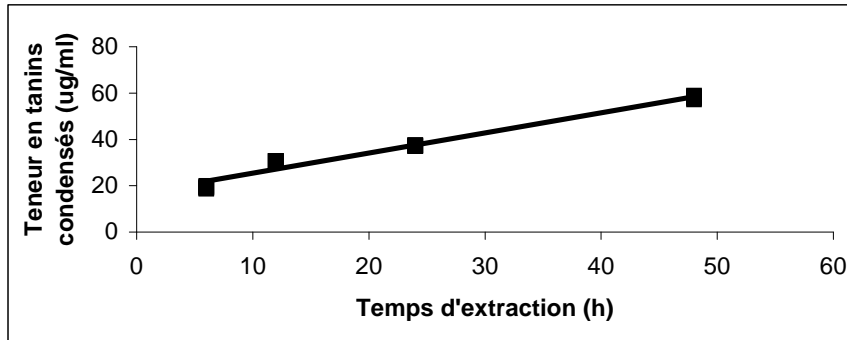


Figure 3. Evolution de la teneur en tanins condensés de la solution méthanolique au cours de l'extraction des éprouvettes de hêtre.

La figure 4 montre les spectres UV visible réalisés sur les solutions d'extraits. On observe la présence de la bande caractéristique de l'absorbance des noyaux aromatiques à 210 nm et de la bande caractéristique de l'absorbance des polyphénols à 280 nm. Les analyses réalisées au cours de l'extraction montrent également une augmentation de la concentration.

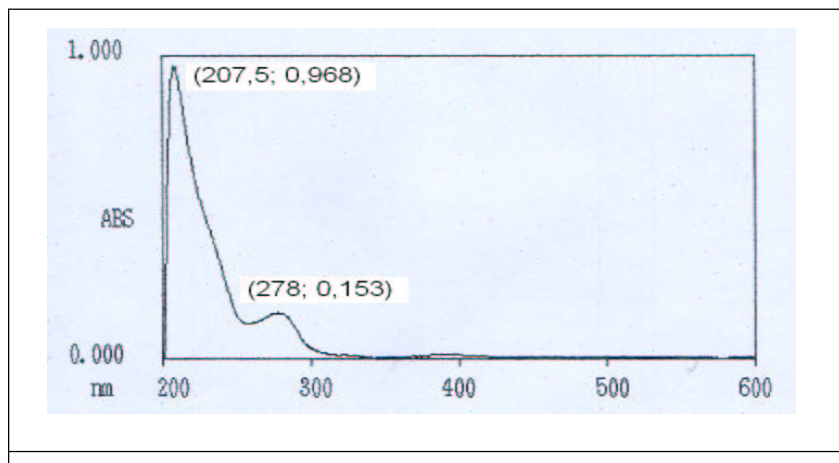


Figure 4. Spectre d'absorption UV-visible à 12 h d'extraction

La figure 4 montre les résultats obtenus en CCM sur silice. Après révélation au DMACA, on observe que les polymères proanthocyanidines du hêtre ne migrent pratiquement pas dans ce système de solvant. Par ailleurs, les présences de catéchine et de très peu d'oligomères (dimères, trimères) sont visualisées.

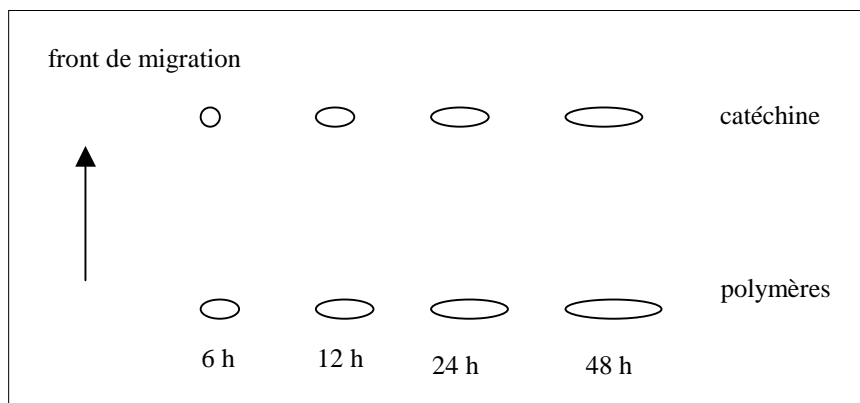


Figure 4. CCM des extraits de hêtre au cours de l'extraction

3.6. Oxydabilité des tanins condensés

La figure 5 montre que la teneur en tanins condensés de la solution d'extraits décroît au cours du temps. La teneur initiale en tanins condensés du hêtre est de 0,28 (%/MS). Après 40 minutes de barbotage, la teneur en tanins condensés est de 0,24 (%MS) et à la fin du test (320 mn), la teneur en tanins condensés est de 0,18 (%MS). Cette baisse de concentration peut-être attribuée à une oxydation chimique des tanins condensés sous l'effet de l'oxygène

La figure 6 montre les spectres UV visible (entre 200 et 600 nm) des extraits de hêtre avant et après chauffage à 60 °C sous atmosphère oxygénée. Les spectres sont caractérisés par un maximum d'absorption vers 210 nm qui est caractéristique des noyaux aromatiques. Puis une autre bande aux environs de 280 nm qui peut caractériser les composés polyphénoliques (tanins et phénols solubles). Au cours du barbotage, on observe une diminution du maximum d'absorption à 280, et l'apparition d'un léger pic dans le visible qui correspond à l'apparition de composés colorés.

Des caractérisations chromatographiques sur CCM (figure 7) ont également été réalisées sur des extraits et sur une solution de catéchine avant et après barbotage sous oxygène à 60 °C. Dans les deux cas, on observe la disparition de la catéchine et d'une partie des proanthocyanidines ce qui permet de penser à un phénomène oxydatif, plus net sur les monomères (catéchine) que sur les polymères (proanthocyanidines).

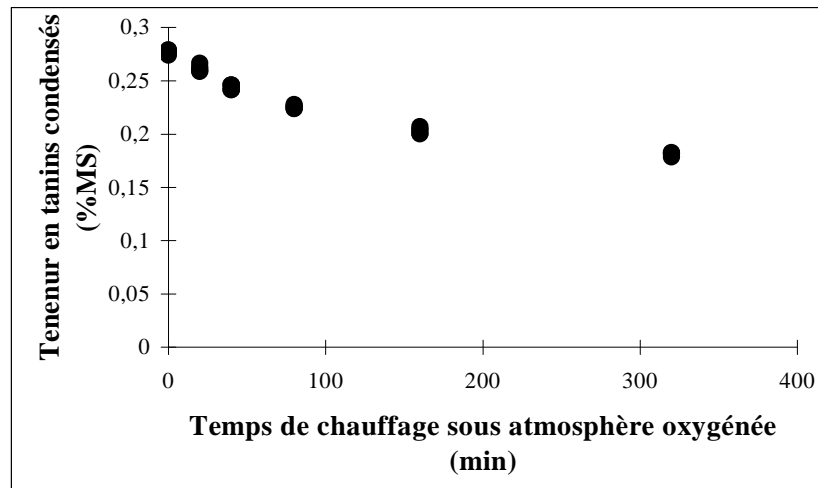


Figure 5 : Effet du barbotage à l'oxygène sur la teneur en proanthocyanidines des extraits de hêtre chauffés à 60 °C.

Par ailleurs, par CCM sur cellulose de l'extrait coloré, on identifie un pigment anthocyanique, la cyanidine, et très peu de delphinidine. Ce résultat confirme la présence de tanins condensés dans le hêtre, du type proanthocyanidines.

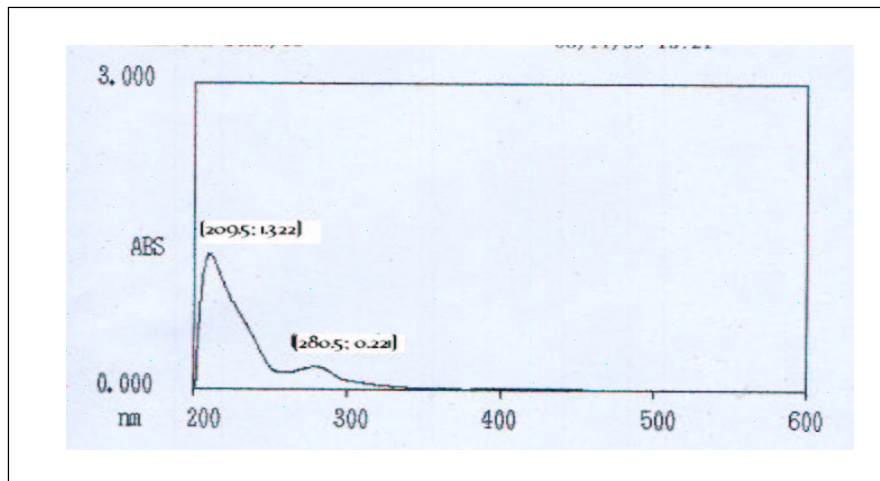


Figure 6a. Spectre UV-visible des extraits de sciure de hêtre avant oxydation

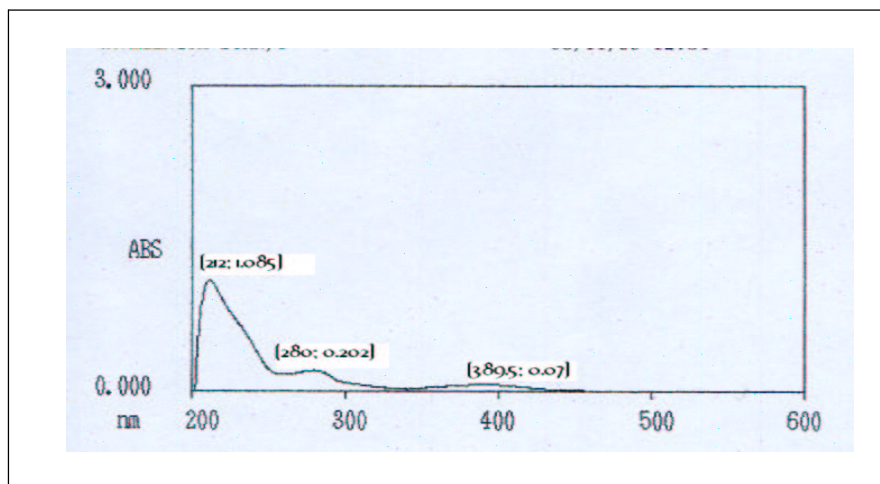


Figure 6b. Spectre UV-visible des extraits de hêtre après oxydation à 60 °C pendant 320 mn.

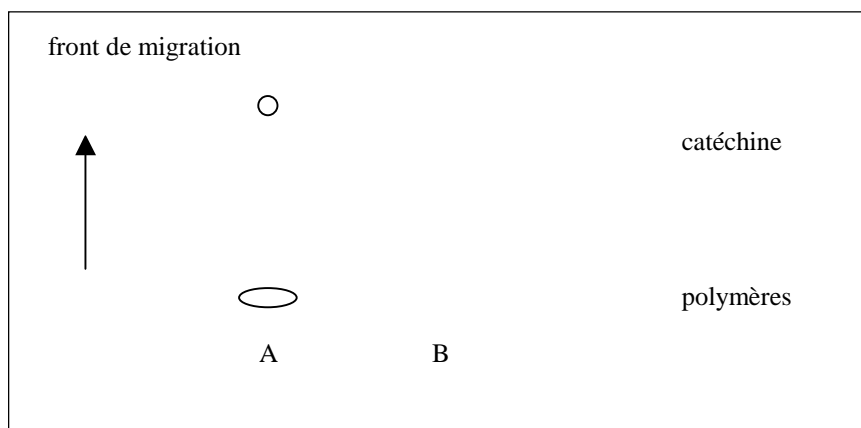


Figure 7. CCM des extraits de hêtre avant (A) et après oxydation (B)

3.7. Le mécanisme à l'origine de la discoloration du hêtre au cours du séchage

Ces résultats sont en accord avec les discolorations observées au cours du séchage du hêtre. Ainsi la présence des tanins condensés semble être à l'origine de la discoloration du hêtre au cours du séchage.

Bibliographie

- [CHA 95] CHARRIER B., HALUK J.P., METCHE M. Characterization of European oakwood constituents acting in the brown discolouration during kiln drying. *Holzforschung*, vol. 49, n° 2, 1995, p. 168-172.
- [CHA 92] CHARRIER B., HALUK J.P., JANIN J. Prevention of brown discoloration in European oakwood occurring during kiln drying by a vacuum process: Colorimetric comparative study with a traditional process. *Holz als Roh und Werkstoff*, vol. 50, 1992, p. 433-437.
- [CHA 92] CHARRIER B. Les discoloration brunes du chêne apparaissant pendant le séchage artificiel : Etude fondamentale et mise en place de techniques de prévention. Thèse de doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1992.
- [IRM 98] IRMOULI M. Contribution à la caractérisation chimique des eaux d'étuvage du bois de hêtre et de leur charge de pollution : Elaboration d'un traitement d'épuration par ozone, et par coagulation-floculation et décantation. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I. 1998.
- [KLU 94] KLUMPERS, J. Le déterminisme de la couleur du bois de chêne. Etude sur les relations entre la couleur et des propriétés physiques, chimiques et anatomiques ainsi que des caractéristiques de croissance. Thèse, ENGREF, Nancy , 1994.
- [KRE 99] KREBER B., HASLETT A.N., McDONALD A.G. Kiln brown stain in radiata pine: A short review on cause and methods for prevention. *Forest Prod. J.* , vol. 49, n° 4, 1999, p. 566-570.
- [KRE 98] KREBER B., FERNANDEZ M., McDONALD A.G. Migration of kiln brown stain precursors the drying of radiata pine sapwood. *Holzforschung* , vol. 52, n° 4, 1998, p. 441-446.
- [McD 00] McDONALD A.G., FERNANDEZ M., KREBER B., LAYTNER F. The chemical nature of kiln brown stain in radiata pine. *Holzforschung*, vol. 54, n° 1, 2000, p. 12-22.
- [MIL 90] MILLER D., SUTCLIFFE R., THAUVETTE J. Sticker stain formation in hardwoods: Isolation of scopoletin from sugar maple (*Acer saccharum*). *Wood Sci. Technol.*, vol. 24, 1990, p. 339-344.
- [SMI 96] SMITH, W.B.; HERDMAN, D.J. An investigation of board color and sticker stain in hard maple. 5th International IUFRO Wood Drying Conference 1:325-334. Quebec, Canada, 1996.
- [TER 95] TERZIEV N. Migration of low-molecular sugars and nitrogenous compounds in *Pinus sylvestris L.* during kiln and air drying. *Holzforschung*, vol. 49, n° 6, 1995, p.565-574.