



INSTITUT TECHNOLOGIQUE

Effet barrière des finitions utilisées en menuiserie aux émissions de COV

Rapport final

Juin 2016

Avec le soutien de :



Rédacteurs : Laurence PODGORSKI, Christophe YRIEIX, Gilles LABAT

FCBA

Allée de Boutaut
BP 227, 33028
Bordeaux Cedex
Tél. 05 56 43 63 66
E-mail : laurence.podgorski@fcba.fr

Sommaire

1	Objectif.....	3
2	Etude bibliographique.....	3
2.1	Les produits de finition pour bois.....	3
2.1.1	Les différentes familles de produits.....	3
2.1.1.1	Les vernis.....	3
2.1.1.2	Les lasures.....	4
2.1.1.3	Les peintures.....	4
2.1.2	Les différentes technologies de produits de peinture.....	4
2.1.2.1	Les revêtements en phase solvant.....	5
2.1.2.2	Les revêtements en phase aqueuse.....	5
2.1.3	Les différentes techniques d'application.....	6
2.1.4	La constitution des produits de peinture.....	9
2.1.4.1	Les liants.....	9
2.1.4.2	Les solvants.....	16
1.	Les pigments et colorants.....	17
2.	Les charges.....	18
3.	Les additifs.....	18
2.2	Les émissions de COV des finitions et produits bois finis.....	19
2.3	Limiter les émissions de COV.....	22
2.3.1	Revêtements à effets barrière.....	22
2.3.2	Abaissement du niveau d'émission par addition d'absorbants ou réactifs de formaldéhyde dans les revêtements.....	37
2.3.3	Dégradation chimique du formaldéhyde et de COV par photocatalyse.....	39
2.4	Synthèse de la partie bibliographique et orientation de la partie expérimentale: ...	39
3	Partie expérimentale.....	41
3.1	Objectifs.....	41
3.2	Sélection des systèmes à étudier : enquête auprès des menuisiers.....	41
3.3	Etude de la perméabilité à la vapeur d'eau de finitions utilisées en menuiserie (Phase 1).....	41
3.3.1	Principe de la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau.....	41
3.3.2	Cas de la Menuiserie 1.....	43
3.3.3	Cas de la Menuiserie 2.....	45
3.3.4	Conclusion.....	47
3.4	Etude de l'effet barrière des finitions aux émissions de COV et à la vapeur d'eau (Phase 2).....	48
3.4.1	Configurations étudiées.....	48
3.4.1.1	Cas de la Menuiserie 1.....	48
3.4.1.2	Cas de la Menuiserie 2.....	48
3.4.2	Mesures de perméabilité à la vapeur d'eau.....	48
3.4.3	Mesures d'émissions de COV.....	48
3.4.3.1	Objectif.....	48
3.4.3.2	Principe de l'essai.....	50
3.4.3.3	Echantillonnage et préparation des éprouvettes.....	50
3.4.3.4	Déroulement de l'essai.....	53
3.4.4	Résultats.....	55
3.4.4.1	Cas de la Menuiserie 1.....	55
3.4.4.2	Cas de la Menuiserie 2.....	59
3.4.4.3	Comparaison des émissions - effets barrière des finitions.....	61
3.4.4.4	Relation Sd et émissions de COV.....	70
4	Conclusions générales.....	72
5	Remerciements.....	76
6	Références.....	77

1 Objectif

La parution du décret pour l'étiquetage obligatoire des produits de construction afin d'informer le grand public de leurs émissions de COV et formaldéhyde incite les industriels à s'orienter vers de nouvelles solutions techniques innovantes pour viser le niveau d'émission le plus faible (classe A+).

Les menuiseries extérieures peuvent contribuer à la pollution de l'air intérieur (émissions de substances volatiles, en particulier le formaldéhyde), selon la composition des produits mis en jeu (bois massifs, carrelés, traitement de préservation, finition). L'étude bibliographique menée dans le cadre du projet FORMABIBLIO a conclu que, dans le domaine des panneaux, l'application de revêtements pouvait conduire à un réel effet barrière au formaldéhyde¹. En parallèle, des études récentes ont confirmé que certaines finitions pouvaient entraîner un effet barrière aux substances volatiles.

L'objectif de cette étude sera donc d'étudier et de hiérarchiser l'effet barrière au formaldéhyde des différents types de finitions rencontrées dans le secteur de la menuiserie extérieure (porte d'entrée, fenêtre). Des préconisations ou des pistes de solutions techniques pourront ensuite être proposées aux industriels.

2 Etude bibliographique

L'application d'un revêtement confère une protection de surface au bois en le protégeant du rayonnement UV-visible et en limitant les échanges avec l'atmosphère environnante. Différents types de revêtements existent et sont décrits dans ce paragraphe.

2.1 *Les produits de finition pour bois*

2.1.1 Les différentes familles de produits

Trois grandes familles de finition se distinguent : les vernis, les lasures et les peintures.

2.1.1.1 Les vernis

Les vernis sont avant tout transparents et généralement incolores. L'absence de pigments les rend particulièrement vulnérables au rayonnement solaire. Ils présentent donc en général une durabilité réduite. Ils ne sont pas utilisés pour la protection des menuiseries industrielles en bois.

2.1.1.2 Les lasures

Selon la norme EN 927-1², une lasure est définie comme un produit de peinture, en phase solvant ou aqueuse, contenant de petites quantités d'un pigment approprié et/ou de matière de charge, utilisé pour former un feuil transparent ou semi-transparent pour la décoration et/ou la protection de subjectile. Une lasure se dégrade uniformément par farinage et se rénove facilement après un simple brossage ou lavage du support. Différentes lasures sont distinguées:

- **Les lasures d'imprégnation** qui pénètrent légèrement dans le bois sans former de film visible en surface. Elles se dégradent assez vite, c'est pourquoi elles sont le plus souvent utilisées comme primaire.
- **Les lasures à haut extrait sec** (supérieur à 40%) : elles forment dès l'application de la deuxième couche un film limitant mieux les variations dimensionnelles.
- **Les lasures dites normales** qui ont des qualités intermédiaires.

Les lasures sont fréquemment mises en œuvre lors de la fabrication des menuiseries en bois.

2.1.1.3 Les peintures

Les peintures masquent totalement l'aspect du bois. La norme NF EN 927-1² définit une peinture comme un produit pigmenté qui, appliqué sur un subjectile, forme un feuil opaque ayant des qualités protectrices, décoratives ou techniques particulières. Les peintures présentent des durabilités importantes notamment pour des peintures blanches (pouvant aller jusqu'à 10 ans sous certaine condition d'exposition). Comme pour toute finition, les performances des produits dépendent cependant fortement de la formulation, et une trop forte pigmentation n'est pas synonyme de durabilité accrue. On peut donc trouver sur le marché des peintures qui soient moins performantes que des lasures semi-transparentes. Parmi les peintures, les peintures microporeuses favorisent les échanges de vapeur et évitent la rétention d'eau à l'intérieur du bois. Les peintures brillantes sont, elles, plus durables.

2.1.2 Les différentes technologies de produits de peinture

Selon la norme NF EN 927-1², un produit de peinture est un produit liquide, en pâte ou en poudre qui, appliqué sur un subjectile, forme un feuil doué de qualités protectrices, décoratives et/ou autres qualités spécifiques. L'expression « produit de peinture » recouvre

donc les lasures, les vernis, les peintures. Les systèmes à faible extrait sec et extrait sec moyen sont distingués des systèmes à fort extrait sec. Il est généralement admis que la quantité de solvants émise par les produits à haut extrait sec, lors de l'application, n'est que la moitié de celle émise par les produits à faible extrait sec³.

2.1.2.1 Les revêtements en phase solvant

Les solvants employés sont des substances organiques liquides à bas poids moléculaire, tels que des hydrocarbures, des alcools ou des esters, souvent aussi des mélanges avec des points d'ébullition et des pouvoirs solvants différents.

2.1.2.2 Les revêtements en phase aqueuse

Les peintures en phase aqueuse contiennent un mélange d'eau et de co-solvants. Deux types de revêtements en phase aqueuse se distinguent :

- **les systèmes hydrosolubles** qui sont composés de liants en solution dans le mélange eau/solvant. Lors de la formulation, les pigments et charges sont préalablement dispersés en présence d'une faible quantité de liant et de dispersant. Ils sont ensuite passés dans un broyeur pour atteindre la granulométrie voulue. Lorsque la dispersion est suffisante, le produit obtenu est transféré dans une cuve où le reste du liant est incorporé sous agitation avec les autres constituants de la formulation.
- **les systèmes hydrodiluable**s (dispersions colloïdales, émulsions) lorsque le liant est en émulsion dans le mélange eau/solvant. Ce sont des dispersions de liquides non miscibles entre eux (avec une apparence opaque avant application) aussi appelées « latex » ou des suspensions de particules polymères dans l'eau (translucide)⁴. (Voir Tableau 1). Lors de la fabrication du produit de peinture, les pigments et charges sont préalablement dispersés dans un minimum d'eau avec les additifs. La pâte obtenue est ensuite transférée dans une cuve, le liant en émulsion est ensuite incorporé sous faible agitation⁵.

Tableau 1 : Comparaison des propriétés de peinture en phase solvant et phase aqueuse⁵

Nature / Propriétés	Peintures en phase aqueuse			Peintures en phase solvant
	Hydrodiluable		Hydro-solubles	
	Emulsions	Dispersion colloïdales		
Propriétés physiques du liant				
Aspect	Opaque blanc	Translucide	Limpide	
Diamètre des particules	0.1 à 1 µm	0.01 à 0.1 µm	< 0.001 µm	
Masse moléculaire (g)	10 ⁵ à 10 ⁶	2*10 ⁴ à 2*10 ⁵	5*10 ³ à 5*10 ⁴	
Viscosité	Indépendante de la masse moléculaire	Partiellement dépendante de la masse moléculaire	Directement dépendante de la masse moléculaire	
Formulation				
Contrôle de la viscosité	Nécessité d'épaississant	Epaississement par tiers solvants	Viscosité fonction de la masse moléculaire	
Dispersion des pigments	Difficile	Bonne	Excellente	
Extrait sec pondéral	Elevé	Moyen	Moyen à faible	
Formulation	Complexe	Intermédiaire	Aisée	
Application				
Difficultés d'application	Nombreuses	Moyennement importantes	Peu importantes	
Formation du film	Coalescence	Coalescence et séchage physique	Séchage physique	

Les constituants communs à tous les produits de peintures sont : les liants, les solvants, les pigments, les charges et les additifs. Pour des revêtements en phase aqueuse, sont ajoutés : des agents de coalescence (hydrodiluable), des agents de neutralisation (hydrodiluable et hydrosoluble), des agents de conservation en pot (hydrodiluable).

2.1.3 Les différentes techniques d'application

Il existe différents types d'application et le Tableau 2 récapitule les différents produits et emplois liés pour chaque type d'application.

Tableau 2 : Les couples procédés-produits et leurs emplois

Technique d'application	Produits	Ouvrages
Badigeonnage	Lasure, vernis et peintures	Tous ouvrages unitaires ou en petites séries
Pulvérisation pneumatique	Tous produits	Tous ouvrages unitaires ou en petites séries
Pulvérisation haute pression Airless	Tous produits (réservés pour phase aqueuse)	Tous ouvrages
Pulvérisation moyenne pression Airmix	Tous produits (réservés pour phase aqueuse)	Tous ouvrages
Pulvérisation électrostatique	Phase solvant, phase aqueuse, bi composant	Tous ouvrages
Trempage	Egalisateurs de teinte, Impressions et lasures d'imprégnation	Fenêtres, portes fenêtres, volets, barrières, éléments en rondins et lames
Filière à dépression	Phase aqueuse, Produits UV	Profils de menuiserie Moulures, bardages

a. Application par badigeonnage

Le badigeonnage par application à la brosse reste la technique d'application la plus rudimentaire. C'est la technique généralement employée par le grand public. La forme de la brosse, la constitution des poils et le matériau du manche doivent être adaptés aux solvants et à la viscosité de la peinture ainsi qu'à la forme de la pièce à peindre. Il en est de même pour le rouleau qui est l'autre instrument permettant une application par badigeonnage. Au niveau industriel, l'utilisation est limitée du fait de la faible productivité, et de la faible qualité d'application.

b. Application par pulvérisation

Il existe deux types de pulvérisation : pneumatique et électrostatique.

Pour la pulvérisation pneumatique, le produit est pulvérisé dans une buse par un flux d'air comprimé. Le débit et la forme du jet peuvent être ajustés. Pour augmenter le débit, améliorer le rendement à l'application, la pulvérisation haute pression sans air Airless® est utilisée. Le produit est alors comprimé par une pompe à piston à haute pression et toute la pression s'exerce sur le produit. Sur certaines lignes de production, la pulvérisation moyenne pression avec appoint d'air (type Airmix®) est utilisée. Ce procédé combine la pulvérisation pneumatique avec la pulvérisation Airless® permettant l'obtention d'un faible brouillard et un grand débit tout en conservant la finesse d'application.

Il est possible d'ajouter un système d'ionisation à tous ces systèmes afin d'obtenir une pulvérisation électrostatique. Lors de ce procédé, les particules de produit sont mises en mouvement par centrifugation puis ionisées ce qui va créer des particules chargées négativement qui vont se repousser entre elles et former un brouillard très fin qui sera attiré par l'élément à peindre relié électriquement à un pôle positif. L'avantage de ce procédé par rapport à la pulvérisation pneumatique, est la réduction importante des mouvements de pistolet et la diminution de la consommation de produits.

c. Application par trempage

Cette application se fait par immersion des pièces à peindre dans le produit. Les pièces sont ensuite retirées, égouttées puis séchées. La difficulté à ne pas créer d'écarts d'épaisseurs entre le haut et le bas de la pièce ainsi que la quantité de produit nécessaire sont des inconvénients majeurs. Ce procédé est surtout utilisé pour l'application de primaires.

d. Application par filière à dépression

Une filière (Figure 1) est une tête avec un gabarit à l'intérieur. Un système de pompe à membrane permet l'approvisionnement en produit du réservoir à la tête de la filière. Dans une filière, le grammage dépend de la vitesse d'avance, de la viscosité du produit et de la dépression dans la pompe. Une des contraintes concernant la filière provient du fait que le produit est malaxé et matraqué. Il peut même y avoir un phénomène de moussage à cause du cisaillement qui est pourtant nécessaire pour une application homogène. L'avantage de la filière est la bonne imprégnation et la bonne accroche de la première couche qu'elle induit grâce à l'absence d'air (en comparaison avec une pulvérisation au pistolet). De plus, elle autorise des cadences élevées et la totalité du produit consommé est déposée.

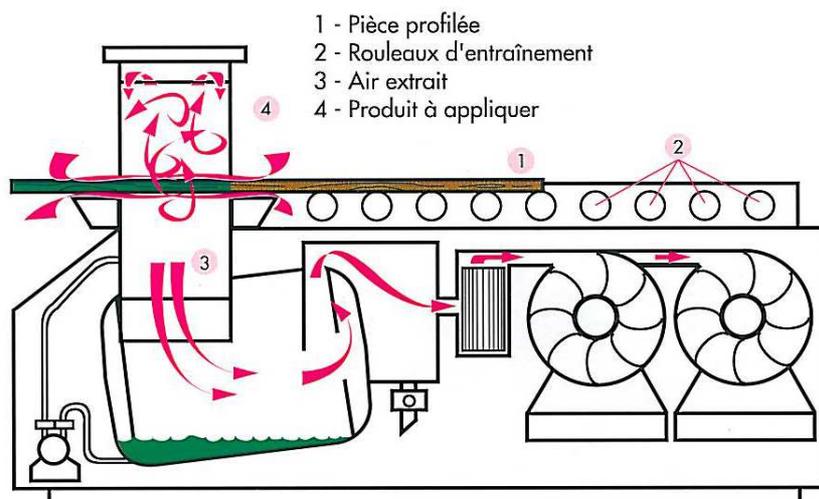


Figure 1 : Vue en coupe d'une filière à dépression

2.1.4 La constitution des produits de peinture

Les produits de peinture sont toujours des mélanges de différents constituants ayant chacun un rôle. Une finition est constituée de liants, de solvants, de pigments, de charges, d'additifs⁶. Au total, un produit de peinture contient en général 15 à 20 composants.

2.1.4.1 Les liants

Les liants sont des macromolécules qui ont pour but de donner de la cohésion et de permettre à la matière de former un film solide et durable par leur grand pouvoir d'étalement. Ce sont les liants qui apportent ses principales propriétés au revêtement.

On distingue différentes familles de liants :

a. Les huiles

Les huiles sont des triglycérides d'acides gras.

La finition huilée donne un aspect satiné de bois naturel car le produit pénètre dans le matériau et bouche les pores en profondeur.

Les huiles de lin et de noix sont les huiles les plus anciennes. Un solvant (essence de térébenthine ou white spirit) est additionné à l'huile afin de permettre sa fluidification, facilitant ainsi son application et sa pénétration dans les pores du bois. Un siccatif qui joue le rôle de catalyseur est également incorporé au mélange de manière à permettre un séchage

plus rapide et éviter un toucher "poisseux". Trois catégories d'huiles se distinguent selon le niveau d'oxydation : huiles siccatives, semi-siccatives et non-siccatives (non oxydables).

Ce genre de finition possède des avantages tels que sa pénétration qui ne contraint pas à appliquer un bouche-pores au préalable. Cependant elle a un faible rôle protecteur notamment au niveau de l'abrasion et aussi vis-à-vis des agressions atmosphériques. Ce dernier inconvénient demande un entretien régulier de ces finitions. Elles sont peu utilisées, aujourd'hui, à cause de leur séchage lent.

b. Les résines alkydes

Les résines thermodurcissables alkydes ou glycérophtaliques sont des polyesters tridimensionnels modifiés. Ils sont obtenus par estérification de la fonction alcool secondaire du glycérol par un acide gras provenant d'une huile végétale et estérification des deux fonctions alcool primaire par de l'anhydride phtalique (voir Figure 2). Le séchage plus ou moins rapide de ces résines est assujéti à la nature plus ou moins siccative de l'huile dont l'acide gras est issu. La structure d'une résine alkyde peut être composée d'huile, de glycérine et d'acide ortho-phtalique comme représenté sur la Figure 3.

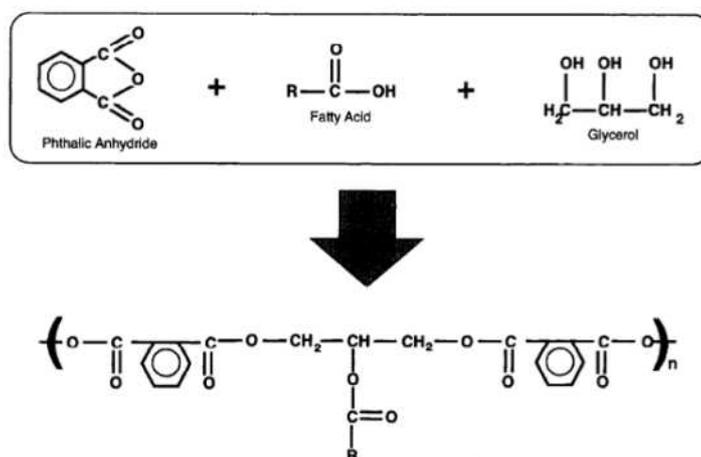


Figure 2 : Synthèse d'une résine alkyde ⁷

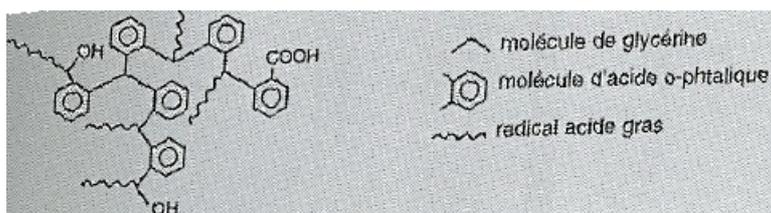


Figure 3 : Représentation schématique d'une résine alkyde ³

Contrairement aux résines acryliques, les liants alkydes sont en partie d'origine naturelle.

Pendant plusieurs décennies, ces résines ont été utilisées en solution dans un solvant pétrochimique. Elles étaient notamment appréciées pour leur souplesse (apportée par la partie huile), leur séchage physique et leur tenue aux intempéries (apportée par la partie polyester). Elles présentent cependant un problème de jaunissement qui est lié à la teneur en huile : en effet, plus le pourcentage d'huile est élevé, plus le jaunissement est important. Malgré cela, les résines alkydes continuent à être utilisées comme liant de par leurs bonnes propriétés³. (Exemple de formulation d'une lasure alkyde dans Tableau 3). La formation des films de résines alkydes résulte d'un séchage physique (évaporation de solvants) et d'un séchage chimique (oxydation par l'air) comme on peut le voir sur la Figure 4.

Tableau 3 : Exemple de formulation d'une lasure alkyde : Exemple du PCI = Produit de Comparaison Interne de la norme NF EN 927-3⁸

Composé	Nom	Fournisseur	Remarques	Quantité (% en masse)
Alkyde	Synolac™ 6005 WDA	Cray Valley	Teneur en matières non volatiles 70%	49,05
Solvant	Varsol™40	ExxonMobil Chemical		3,77
Pigment rouge	Sicoflush™ L2817	BASF	40% pigment en pâte	4,63
Pigment jaune	Sicoflush™ L1916	BASF	40% pigment en pâte	2,30
Agent rhéologique	Bentone™ 34	Elementis Specialties	10% dans un pré mélange white spirit (85%) et éthanol (5%)	0,60
Siccatif Ca	Nuodex™ Ca 5%	Rockwood Pigments	5% calcium, teneur en matières non volatiles environ 55%	2,77
Siccatif Co	Nuodex™ Co 10%	Rockwood Pigments	10% cobalt, teneur en matières non volatiles environ 75%	0,37
Siccatif Zr	Nuodex™ Zr 12%	Rockwood Pigments	12% zirconium, teneur en matières non volatiles environ 45%	0,30
Biocide	Preventol™ A5S	Lanxess	Poudre (96% matières actives)	0,72
HALS	Tinuvin™ 292	BASF		0,45
Anti-peau	Exkin™ 2	Rockwood Pigments	Méthyl éthyl cétoxime	0,20
Solvant	Varsol™ 40	Exxon Mobil		34,84

Mécanisme de durcissement:

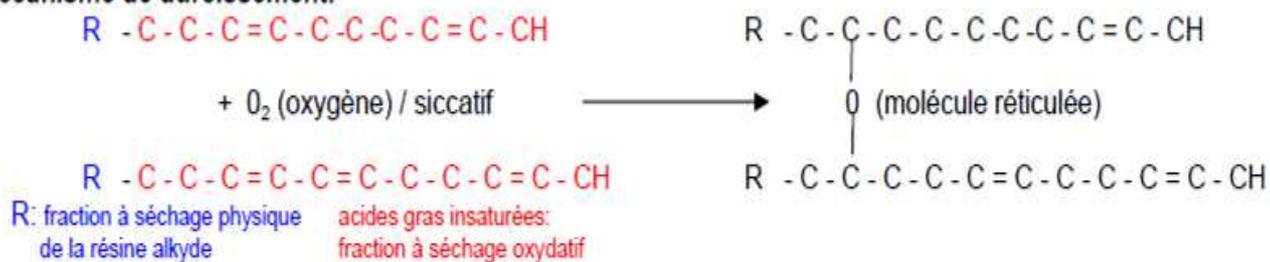


Figure 4 : Méthode de formation d'un film de résine alkyde ⁹

Toutefois, la réglementation COV de la directive 2004/42/CE a considérablement réduit leur utilisation pour la protection du bois. Dans ce contexte, elles sont donc de plus en plus associées à l'eau et formulées en émulsion¹⁰. Ces dernières présentent un bon étalement, un temps limite de reprise correct qui est le temps pendant lequel on peut retoucher le revêtement et une bonne brillance par rapport aux peintures acryliques. Cependant, elles ont tendance à jaunir et les données scientifiques ne sont pas assez importantes pour prouver leur durabilité extérieure¹¹. La formation du film d'une émulsion alkyde commence par l'évaporation de l'eau suivie par une inversion de phase dans l'émulsion eau/huile et en dernier lieu, une réticulation par oxydation avec l'air pour former un réseau polymérique ¹².

c. Les résines alkydes-uréthanes

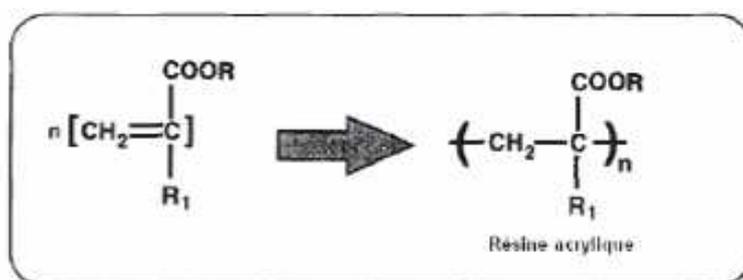
Ce sont des mélanges de résines alkydes et d'huiles uréthanes. Ces dernières accélèrent le séchage par rapport à une huile alkyde pure. Ce type de résine a une meilleure résistance à l'eau, une meilleure dureté et une meilleure résistance à la rayure par rapport à une résine alkyde pure mais conserve le problème de jaunissement. Elle est principalement employée dans le bâtiment ou en intérieur ⁹.

d. Les résines acryliques

Les résines acryliques sont issues de monomères acryliques et sont préparées, pour la plupart, sous forme liquide par polymérisation radicalaire en solution. Elles sont aussi obtenues sous forme solide par polymérisation en masse ou par co-polymérisation de différents polymères pour former des particules solides stabilisés dans l'eau (des latex)¹². Les monomères acryliques sont, soit des esters des acides acryliques ou méthacryliques, soit des dérivés de l'acide (méth) acrylique (voir Figure 5).

Dans le cas de dispersions d'acryliques (latex), la formation du film se fait par évaporation de l'eau, suivi de la coalescence et enfin de l'inter-diffusion des particules du polymère. Plus précisément, la première étape consiste en une étape d'évaporation de l'eau jusqu'à ce que

les particules soient presque en contact ce qui va provoquer des forces de répulsion. Une fois que les particules sont en contact, la deuxième phase commence : l'agglomération et la déformation. La température la plus basse à partir de laquelle cette déformation suivie de la coalescence se déroule s'appelle la température minimale de formation de film (MFFT). L'étape finale de formation de film implique la perte d'eau résiduelle qui permet une coalescence puis une inter-diffusion ¹³.



où,

- R = H; R₁ = H Poly(acrylate)**
- R = H; R₁ = CH₃ Poly(méthacrylate)**
- R = CH₃; R₁ = CH₃ Poly(méthyl-méthacrylate)**

Figure 5 : Résine acrylique typique

L'avantage de ces résines est d'être en phase aqueuse. Leur faible jaunissement, leur bonne élasticité, leur séchage rapide et leur résistance au vieillissement en font des résines de choix. Les émulsions d'acryliques purs sont, dans la plus grande majorité des cas, les liants utilisés pour des finitions destinées à des applications industrielles en extérieur (Exemple de formulation d'un revêtement pour bois à base de résine acrylique dans le Tableau 4).

Tableau 4 : Exemple de formulation d'un revêtement pour bois à base d'une résine acrylique ¹⁴

Ingrédient	Masse en grammes	Fonction
Eau	85	Milieu
Ammoniac, conc 25%	3.5	Neutralisation et stabilisation
Agent mouillant ; tensioactif silicone	1	Mouillage du substrat
Anti-moussant 100%	10	Anti-moussant
Additif glissant ; type silicone	4	Additif « anti-blocking » et glissant
Solvant / coalescent	30	Agent de formation de film
Absorbeur UV-A	10	Stabilisant UV
Modificateur de rhéologie	5	Modificateur de rhéologie 1
Agent matifiant organique : type résine polycondensation	10	Agent matifiant organique
Agent matifiant silice pyrogénée	5	Agent matifiant inorganique
Dispersion acrylique (45% solide)	790	Liant
Modificateur de rhéologie	2	Modificateur de rhéologie 2
Anti-moussant 100%	5	Anti-moussant
Eau	39.5	Milieu
Total	1000	

Les inconvénients sont leur plus faible niveau de brillance, d'étalement et d'adhérence ^{15, 11}.

De nombreux liants acryliques hybrides existent sur le marché pour les primaires d'imprégnation. Les résines alkydes-acryliques en phase aqueuse sont plus communes en imprégnation que les résines acryliques pures, pour un emploi extérieur, du fait de leur très bonne pénétration dans le bois conférée par la partie alkyde. Elles présentent une polymérisation rapide, une bonne brillance et une bonne durabilité extérieure ¹⁶.

Des résines silicones-acryliques ont aussi été synthétisées. Une bonne adhésion sur de nombreux supports a été relevée pour de telles résines. Les tests de vieillissement naturel ont montré que la brillance, la résistance au jaunissement et la conservation de la couleur étaient améliorées avec la teneur en silicone ¹⁶.

Pour des emplois en extérieur, une voie attractive est la création de particules acryliques multi phases ou structurées. Ces dispersions sont connues sous le nom de dispersions core-shell. Elles combinent un polymère dur et un polymère mou dans une particule acrylique. En effet, la phase « molle » possède une température de transition vitreuse Tg (c'est la température à laquelle la matière passe d'un état caoutchouteux à un état vitreux, solide) basse ce qui permet une bonne élasticité et une coalescence suffisante, alors que la phase dure avec une Tg élevée permettra une bonne résistance au « blocking » (adhérence non voulue d'une finition qui vient d'être appliquée) et une bonne dureté de surface. L'approche hybride organique/inorganique a aussi été étudiée en utilisant la chimie acrylique et la chimie de la silice pour remplacer la phase dure. Cette dernière montre de meilleurs résultats que les dispersions core-shell notamment grâce à une haute élasticité du film ainsi qu'une bonne

résistance au « blocking ». En effet, avec un core-shell, la partie dure va se ramollir à des températures supérieures à la Tg alors qu'avec l'approche hybride, la silice permet une augmentation du blocking avec la température. Il est cependant nécessaire d'appliquer une épaisseur assez importante, d'utiliser des absorbeurs d'UV ou des pigments pour une bonne résistance à l'exposition extérieure¹⁷.

e. Les résines vinyliques

Ces résines à base d'acétates de polyvinyle modifiés sont utilisées pour des peintures en émulsion. Elles peuvent aussi être à base de poly (chlorure de vinyle) ou poly (acétochlorure de vinyle).

f. Les résines polyuréthanes

Elles sont issues de la réaction chimique entre des hydroxyles libres (alcool bi-fonctionnel) et des di-isocyanates comme décrit sur la Figure 6. L'emploi d'isocyanate de fonctionnalité plus élevée et/ou polyols permet l'obtention de polyuréthanes ramifiés. Les propriétés générales des polyuréthanes sont la ténacité, l'adhérence et la résistance à l'eau et aux produits chimiques.

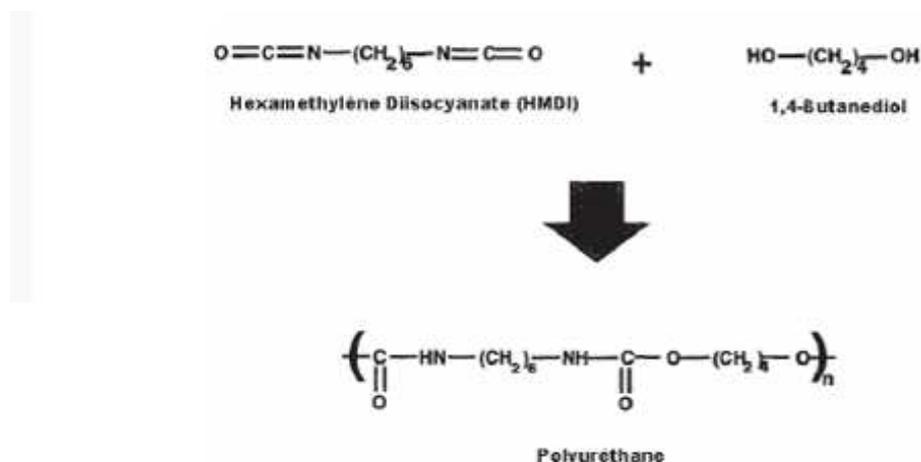


Figure 6 : Formation d'un polyuréthane ⁷

Deux types de systèmes polyuréthanes se distinguent : les polyuréthanes à un composant (1k) ou deux composants (2k). Les systèmes mono-composant sont composés de polyisocyanates et de polyols mais le polyisocyanate a la particularité d'être bloqué. La formulation sera appliquée sur le support puis chauffée ce qui va débloquent l'isocyanate pour qu'il réagisse avec le polyol afin de former un film de polyuréthane. Ces systèmes ne sont pas utilisés en extérieur à cause de leur trop grande dureté.

Les systèmes à deux composants ont pour composant de base, un liant polyhydroxylé tel que des résines de type polyester (pour une application sur du bois ⁴). La réticulation se fait par mélange avec des polyisocyanates à température ambiante ce qui rend possible son application sur le bois car celui-ci serait sensible à une augmentation de chaleur. Selon l'isocyanate utilisé, la résistance au jaunissement variera et par exemple, les isocyanates aliphatiques sont utilisés pour une meilleure résistance à la lumière ³.

Des dispersions de polyuréthane dans l'eau polymérisable par UV ont été développées. Pour un emploi extérieur, ces systèmes sont intéressants pour la couche supérieure (top coat) sur un bois qui sera préalablement imprégné avec une émulsion acrylique traditionnelle, par exemple. De tels systèmes permettent une meilleure résistance à la rayure et au blocking par rapport à une résine acrylique en phase aqueuse¹⁸.

L'inconvénient des dispersions de polyuréthane à base aqueuse polymérisable par UV provient de leur domaine d'application restreint. En effet, ceci est possible sur des petites surfaces planes car une surface profilée, par exemple, implique des zones non couvertes par les UV ce qui pourrait engendrer une réticulation incomplète. De plus, ces dispersions réticulées par UV possèdent souvent des défauts tels qu'une réticulation non uniforme. Une étude a été menée par Chang & Kun-Tsung ¹⁹ sur des dispersions de polyuréthane à base d'huile de lin. Ces dispersions ont été réticulées par un procédé double : réticulation par UV et séchage à l'air par oxydation. Ce procédé a montré de meilleures performances notamment en termes d'adhésion dans le domaine de l'ameublement intérieur.

2.1.4.2 Les solvants

Les solvants sont des substances chimiques qui font partie de la formulation de la finition et permettent au liant de rester en solution. Ils donnent sa fluidité à la peinture pour permettre la fabrication et l'application. Leur élimination permet la formation du film.

Lors de l'application, le solvant s'évapore libérant des COV que la directive européenne 2004/42/CE tend à limiter (voir Tableau 5). C'est pour cela, que les formulations actuelles recourent à l'utilisation de produits en phase aqueuse ou à taux d'extrait sec élevé et que les revêtements photopolymérisables peuvent présenter un intérêt.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des teneurs maximales en COV pour produits et vernis (les produits utilisés pour un emploi extérieur sont en gras)²⁰

	Sous-catégorie de produits	Type (PA = Phase aqueuse et PS = Phase Solvant)	Phase 1 (COV g/l de produit prêt à l'emploi) à partir du 1^{er} janvier 2007	Phase II (COV g/l de produit prêt à l'emploi) à partir du 1^{er} janvier 2010
a)	Intérieur mate murs et plafonds (brillant ≤ 25@60°)	PA PS	75 400	30 30
b)	Intérieur brillant murs et plafonds (brillant ≤ 25@60°)	PA PS	150 400	100 100
c)	Extérieurs murs support minéral	PA PS	75 450	40 430
d)	Peintures intérieur/extérieur pour finitions et bardages bois ou métal	PA PS	150 400	130 300
e)	Vernis et lasures intérieur/extérieur pour finitions, y compris lasures opaques	PA PS	150 500	130 400
f)	Lasures à épaisseur de film minimale intérieur/extérieur	PA PS	150 700	130 700
g)	Impressions	PA PS	50 450	30 350
h)	Impressions fixatrices	PA PS	50 750	30 750
i)	Revêtements mono composants à fonction spéciale	PA PS	140 600	140 500
j)	Revêtements bi composants à fonction spéciale pour utilisation finale spécifique, sur sols par exemple	PA PS	140 550	140 500
k)	Revêtements multicolores	PA PS	150 400	100 100
l)	Revêtements à effets décoratifs	PA PS	300 500	200 200

1. Les pigments et colorants

Selon la norme ISO 4618-1²¹, un pigment est « une substance généralement sous forme de fines particules, pratiquement insoluble dans les milieux de suspension, utilisée en raison de certaines de ses propriétés optiques, protectrices ou décoratives ».

Les pigments étant insolubles, ils sont déposés à la surface du support sur lequel est appliqué le mélange, contrairement aux teintures qui sont absorbées par le support. D'un point de vue chimique, les pigments sont séparés en deux catégories : de nature minérale ou organique.³ Un pigment minéral peut être d'origine naturelle (oxydes de fer, ocre...) ou synthétique : ce sont les plus courants et adaptés pour la fabrication de laques. Les

pigments peuvent aussi être organiques extraits à partir de plantes (garance, indigo...) de coquillage (pourpre), d'insectes (cochenille) ou peuvent provenir de la chimie de synthèse.

Les caractéristiques importantes des pigments sont la stabilité à la lumière et surtout aux rayons ultra-violets, le pouvoir colorant, le pouvoir couvrant ou opacifiant et la non-solubilité.

Les colorants sont des substances colorées et solubles à l'eau ou en solvants organiques. Ils sont plutôt utilisés en intérieur à cause de leur mauvaise stabilité à la lumière et à la chaleur.

2. Les charges

Ce sont généralement des poudres minérales qui jouent un rôle sur les caractéristiques mécaniques du film, sur l'imprégnabilité, le ponçage, la résistance aux agents extérieurs mais qui augmente aussi le coût du revêtement. En général, le baryte, les différents carbonates, le talc, le kaolin, le mica, la pierre ponce, la silice sont utilisés

Elles sont en plus ou moins grande quantité selon l'application. La CPV, la Concentration Pigmentaire Volumique est définie comme le rapport de matières pulvérulentes (c'est-à-dire l'ensemble pigments-matières de charge) contenu dans le produit à la valeur de l'extrait sec et conditionne le domaine d'utilisation. Ainsi, une CPV de 0% s'adresse à la fabrication de vernis, une CPV de 15 à 20% correspond au domaine des laques. Enfin, les peintures auront une CPV de 35 à 50 % pour des peintures brillantes et la CPV atteindra 50 à 60 % pour des peintures mates²².

3. Les additifs

Ce sont des substances chimiques qui sont utilisées afin d'améliorer certaines caractéristiques²². Ils modifient certaines propriétés de la peinture ou en apportent de nouvelles.

Les additifs comprennent :

- **des siccatifs** pour accélérer le durcissement du film. En effet, ils favorisent la fixation de l'oxygène de l'air sur les doubles liaisons des huiles ou acides gras des résines et assurent ainsi le séchage ou le durcissement.
- **des anti-peaux** qui sont en fait des antioxydants pour éviter la formation de peau dans le bidon. Ils sont principalement constitués d'oximes telles que la méthyléthylcétoxime et la butyraldoxime et sont utilisés uniquement dans la formulation des peintures et vernis alkydes dont le séchage est assuré par un phénomène d'oxydation.

- **des agents de tension** qui permettent d'assurer une surface lisse et tendue du feuil lors de l'application de la peinture.
- **des agents mouillants et dispersants** pour éviter la sédimentation des charges pendant le stockage. En effet, ces agents vont permettre de mouiller et de répartir de façon homogène les pigments dans le liant.
- **des inhibiteurs** pour empêcher la polymérisation pendant le stockage.
- **des agents épaississants** pour ajuster les propriétés rhéologiques des peintures. Ils doivent éviter la sédimentation des pigments et matières de charge pendant le stockage et le transport des produits de peinture. Ils sont principalement utilisés dans les peintures en émulsion.
- **des agents anti moussants** pour casser les mousses qui se forment pendant la dispersion des matières pulvérulentes lors de la fabrication de peintures. En effet, de très nombreux produits de peinture contiennent des tensio-actifs qui vont produire de la mousse. L'antimousse doit pénétrer dans les lamelles de mousse pour exercer son action. Il doit étaler la couche de tensioactif qui stabilise chaque lamelle. Il y a alors formation d'un film avec une élasticité nettement plus faible et la mousse s'effondre³.
- **des agents biocides** pour permettre la prévention du développement des micro-organismes pendant le stockage de la peinture mais aussi pendant sa durée d'usage sous forme de feuil. Leur utilisation devient restreinte du fait de la réglementation sur les produits biocides (RPB, règlement (UE) n° 528/2012)²³.
- **des agents matants ou matifiants** pour donner un aspect mat au revêtement
- **des absorbeurs UV** pour limiter la dégradation provoquée par le rayonnement UV

2.2 Les émissions de COV des finitions et produits bois finis

Depuis le 1er janvier 2012, les produits de construction et de décoration doivent indiquer leur niveau d'émission composés organiques volatils via l'utilisation d'une étiquette qui indique, de manière simple et lisible, leur niveau d'émission en polluants volatils.

Les produits concernés par cette nouvelle réglementation sont les produits de construction ou de revêtements de parois amenés à être utilisés à l'intérieur des locaux, ainsi que les produits utilisés pour leur incorporation ou leur application.

Le niveau d'émission du produit est indiqué par une classe allant de A+ (très faibles émissions) à C (fortes émissions).

Le Tableau 6 détaille, pour chaque classe, les valeurs d'émissions des différentes substances concernées.

Substances	Classes (valeurs d'émissions en µg/m ³)			
	C	B	A	A+
Formaldéhyde	> 120	< 120	< 60	< 10
Acétaldéhyde	> 400	< 400	< 300	< 200
Toluène	> 600	< 600	< 450	< 300
Tétrachloroéthylène	> 500	< 500	< 350	< 250
Xylène	> 400	< 400	< 300	< 200
1,2,4-Triméthylbenzène	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000
1,4-Dichlorobenzène	> 120	< 120	< 90	< 60
Ethylbenzène	> 1500	< 1500	< 1000	< 750
2-Butoxyéthanol	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000
Styrène	> 500	< 500	< 350	< 250
COVT	> 2000	< 2000	< 1500	< 1000

Tableau 6: Seuils limite d'émissions après 28 jours d'essais (NF EN ISO 16000-9) ²⁴

Les classes d'émission sont établies sur la base de mesures réalisées après vingt-huit jours en chambre ou en cellule d'essai d'émission selon la norme NF EN ISO 16000-9 ²⁵.

Cette méthode consiste en une chambre vide de volume déterminé avec des conditions internes similaires à celles normalement rencontrés dans des milieux de vie en terme de température, humidité relative, renouvellement d'air.

L'échantillon d'une surface représentative des conditions réelles est placé à l'intérieur de la chambre.

Les émissions de COV des produits en bois recouverts de finition peuvent provenir des produits de finition eux-mêmes mais aussi du bois qu'ils recouvrent.

Du point de vue de la finition, les principaux facteurs associés à l'émission sont ²⁶:

- ✓ la quantité et le type de solvants utilisés
- ✓ la présence de monomère dans le cas de revêtements polymérisés sous lumière
- ✓ la présence de coalescents dans le cas de finitions en phase aqueuse
- ✓ la quantité de produit appliquée
- ✓ les procédures utilisées pour le séchage : conditions (température, ventilation), vitesse de la ligne

- ✓ la formation de sous-produits issus des réactions chimiques impliquées dans la polymérisation de certaines finitions (par exemple benzaldéhyde ou alcool benzylique à partir des photoinitiateurs présents dans les formulations à séchage UV).

Les émissions de COV sont irréversibles et tendent donc à diminuer sur la durée selon les conditions de stockage, d'emploi.

Le relargage de substances organiques volatiles peut être très lent en particulier quand la température de transition vitreuse du film est inférieure à la température à laquelle le film a été formé²⁷.

Le bois et ses dérivés peuvent aussi contribuer aux émissions. Il est bien connu que différentes essences de bois contiennent des extractibles organiques dont certains sont caractérisés par une certaine volatilité tels que les terpènes, certains acides et aldéhydes. A noter que l'odeur de certains résineux, souvent considérée comme plaisante, est due à l'émission de telles substances caractérisées par un potentiel effet irritant.

De nombreuses données sont actuellement disponibles pour les substances volatiles dans l'air des lieux de travail, mais des données suffisantes pour permettre une évaluation complète des risques dans les lieux intérieurs existent seulement pour quelques substances.

L'une des principales caractéristique des lieux de travail est que la période de temps à laquelle la population est exposée à la pollution intérieure est beaucoup plus longue que les essais en laboratoire. De plus, les conditions de santé des personnes impliquées peuvent être totalement différentes: nourrissons, personnes âgées, personnes fragiles (asthmatiques, allergiques, convalescentes), et devraient être considérée dans la définition des limites d'exposition.

2.3 Limiter les émissions de COV

Les études relatives à la limitation des émissions de COV trouvent essentiellement leur place dans le domaine des panneaux avec une attention particulière à la limitation des émissions de formaldéhyde. Deux pistes de réduction se dégagent : utilisation de revêtements à effets barrière, addition d'absorbants ou réactifs dans les revêtements.

2.3.1 Revêtements à effets barrière

Les travaux de G.E. Myers illustrent des solutions permettant de réduire les émissions de formaldéhyde à savoir ^{28,29,30,31,32} :

- absorbants de formaldéhyde émis dans la résine au sein du matériau,
- exposition des matériaux à des gaz réduisant le formaldéhyde,
- applications de revêtements de finition,
- applications de feuilles de papier et décor.

Pour les deux derniers points, les systèmes les plus performants selon l'auteur sont les suivants :

- finitions les plus efficaces :
 - o Polyuréthane > nitrocellulose
 - o Dispersion Alkyde = peinture latex = finition vinylique à base solvant
 - o Epoxy > laque ou nitrocellulose
 - o Peinture Alkyde > peinture acrylique intérieure
 - o Base latex/surface Alkyde = base Alkyde/Alkyde surface
- revêtements papiers ou films :
 - o Film PET, PP, PS, PEVinylAcétate, PE, PVC, ...

Les travaux de Barry et Corneau³³ s'intéressent à l'efficacité de différents types de revêtement barrière pour minimiser les émissions de COV et de formaldéhyde.

Plusieurs types de revêtements ont été testés :

- peinture,
- topcoat UV
- topcoat acrylique,
- système à base de résine vinylique (éthyl-vinyl acétate),

- film de résine phénolique,
- papier mélaminé,
- topcoat multiple par procédé humide,
- feuille de résine à base de polyvinyl acetate,
- finition poudre.

L'efficacité des revêtements a été évaluée par comparaison avec un échantillon non revêtu. Cependant les auteurs n'indiquent pas les grammages, ceux-ci pouvant influencer le résultat.

Les résultats détaillés sont reportés respectivement dans le Tableau 7, pour les émissions de formaldéhyde, et dans le Tableau 8, pour les résultats de mesure de COV totaux. Il est indiqué, en colonne de droite, un pourcentage d'efficacité de réduction de l'émission.

Tableau 7 : Résultats d'émissions de formaldéhyde

CPA ID Set	Matched Sample Sets	ASTM D-6007 (ppm) / mg/m ² *hr)	ASTM D-6007 % Reduction
1st Set			
A	7.3 mm MDF unfinished	0.09 / 0.13	
B	painted UV Topcoat	0.01 / 0.02	89
C	Painted Acrylic topcoat	0.08 / 0.12	11
2nd Set			
D	4.76 mm MDF	0.18 / 0.29	
E	multiple (3) topcoat wet process	0.13 / 0.20	28
3rd Set			
F	3/4 inch MDF	0.14 / 0.21	
G	A: epoxy powder coating 3-5 mil	n.d.	> 99
H	B: epoxy powder coating 3-5 mil	n.d.	> 99
I	C: epoxy powder coating 3-6 mil	n.d.	> 99
4th Set			
J	3/4 inch particleboard	0.10 / 0.15	
K	MDO (phenolic 0.002 inch)	n.d.	> 99
5th Set			
L	3/4 inch particleboard	0.15 / 0.25	
M	melamine paper 80 grams	0.01 / 0.02	93
6th Set			
N	1/2 inch particleboard	0.11 / 0.17	
O	Vinyl (3.400 mil)	n.d.	> 99
7th Set			
P	5/8 inch particleboard	0.11 / 0.17	
Q	Foil - 60 gram	0.03 / 0.04	73

Tableau 8: Résultats d'émission de COVT

CPA ID Set	Matched Sample Sets	ASTM D-5116 (ug/m ² *hr)	ASTM D-5116 Percent Reduction
1st Set			
A	7.3 mm MDF unfinished	257.3	
B	painted UV Topcoat	39.4	85
C	painted Acrylic topcoat	326.8	{+27}
2nd Set			
D	4.76 mm MDF	53.4	
E	multiple (3) topcoat wet process	84.1	{+57}
3rd Set			
F	3/4 inch MDF	241.6	
G	A: epoxy powder coating 3-5 mil	14.7	94
H	B: epoxy powder coating 3-5 mil	24.9	90
I	C: epoxy powder coating 3-6 mil	17.2	93
4th Set			
J	3/4 inch particleboard	151.6	
K	MDO (phenolic 0.002 inch)	18.4	88
5th Set			
L	3/4 inch particleboard	223.8	
M	melamine paper 80 grams	33.8	85
6th Set			
N	1/2 inch particleboard	147.8	
O	Vinyl (3.400 mil)	50.6	66
7th Set			
P	5/8 inch particleboard	181.7	
Q	Foil - 60 gram	43.7	76

L'effet des revêtements barrières est illustré par la Figure 7 et la Figure 8.

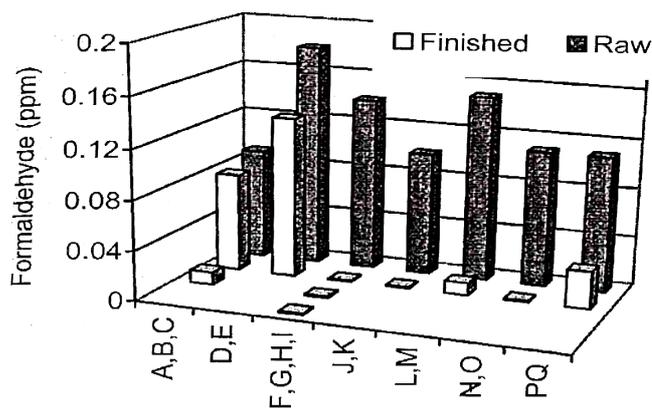


Figure 7: Emission de formaldéhyde des supports bruts (*raw*) comparés aux supports revêtus (*finished*)

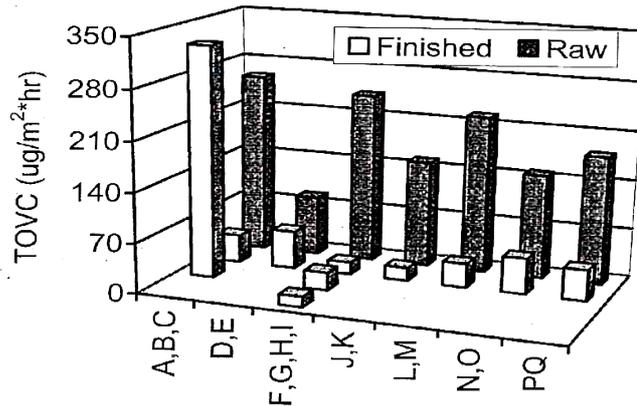


Figure 8: Emission de COVT des supports bruts (raw) comparés aux supports revêtus (finished)

Il est observé, pour chaque lot (set) :

- 1^{er} lot (1st set): **Application d'une seule couche de finition (« topcoat »)** :
 - o **produit de peinture à réticulation UV** appliqué sur un panneau MDF de 7.3 mm d'épaisseur. Une réduction de 89% de l'émission de formaldéhyde est observée et de 85% de l'émission de COVT.
 - o **La peinture acrylique** ne permet pas de bloquer de manière significative les émissions de formaldéhyde (11% de réduction) et génère + 27% de COVT.
- 2^{ème} lot (2nd set): **Application de plusieurs couches de finition (procédé humide)** sur MDF : il est observé 28% de réduction de formaldéhyde, ce qui est très faible, ainsi que +57% d'émission de COVT indiquant que ce type de finition contenait certainement un taux de solvants élevé.
- 3^{ème} lot (3rd set) : **Application d'une finition poudre époxy (épaisseur de 76 µm à 127 µm)** sur MDF : efficacité très importante observée avec un blocage total pour l'émission du formaldéhyde et de plus de 90% pour les COV totaux, pour les 3 types de formulations testées (A, B, C)
- 4^{ème} lot (4th set): **Application de papier Kraft imprégné de résine phénolique** (papier d'épaisseur de 50 µm appliqué sur un panneau de particules) : **blocage total** des émissions de formaldéhyde. Efficacité de blocage de 88% pour les émissions de COV totaux.
- 5^{ème} lot (5th set): **Application de papier imprégné de mélamine** (80 grammes) sur panneau de particules (19 mm) : efficacité de réduction de l'émission de formaldéhyde de 93%. Blocage de 85% pour les COV totaux. Ces résultats ont été confirmés par d'autres études mentionnées par les auteurs.
- 6^{ème} lot (6th set): **Application d'un papier décor (vinylique, 86 µm)** : **blocage total** des émissions de formaldéhyde et blocage de 66% des COV totaux.
- 7^{ème} lot (7th set) : **Application d'une feuille** (60 grammes) sur un panneau de particules (16 mm) : efficacité observée de 73% pour la réduction de l'émission de formaldéhyde et de 76% des COVT.

En synthèse, les auteurs concluent que l'application d'une finition poudre époxy permet d'obtenir une réduction totale de l'émission du formaldéhyde et de plus de 90% pour les COV totaux.

Une efficacité supérieure à 90% est observée pour la réduction de l'émission de formaldéhyde avec application d'un papier Kraft imprégné de résine phénolique, de résine vinylique et à base de papier imprégné de mélamine appliqué à la surface du panneau de particules.

Les auteurs indiquent que des investigations futures doivent être faites par des essais inter-laboratoires pour valider ces premiers résultats.

Une autre étude, également publiée A. Barry³⁴ en 2008, étend les investigations à d'autres type de revêtements (revêtement décor, placage, ...)

Les systèmes testés sont reportés dans le Tableau 9.

Mill #	Types of Finishing Materials
1	1FP: Paper finish, water base topcoat, Gas oven
	2FP: Paper finish, water base topcoat, Gas oven
2	1FP: Syn Decor laminated
	2FP: Vinyl laminated
3	1FP: Flooring (decor and aluminum oxide overlay)
	2FP: Flooring (decor and aluminum oxide overlay)
4	1FP: 30 g classic cherry recoatable paper
	2FP: Proprietary Laminator press, Toppan recoatable topcoat
4	3FP: Hymmen Laminator press, Toppan recoatable topcoat with 6 mils of proprietary UV cured topcoat
	4FP: Proprietary Laminator press, Toppan recoatable topcoat with 6 mils of proprietary UV cured topcoat
5	1FP: Thermofoil Ontario Match 10 mil
	2 FP: Thermofoil Blonde maple 12 mil
6	1FP: has a Birch face and a Vinyl back. They were not tested back to back.
	2FP: vinyl one side. They were tested back to back and the Vinyl faces were exposed
7	1FP: Maple C or I SPL
	2FP: Red Oak Cor I rotary Red Oak
8	1F: 2 mil Maple Toffe Vinyl - Both Surfaces
	2F: 2 mil MVNA (Vinyl) - Both Surfaces
	3F: 2 mil MVNA (RAW secondary surface) - Tested Back to Back
	4F: 2 mil Maple Natural Vinyl (RAW secondary surface) - Tested Back to Back
	5F: Maple Natural Vinyl on 2 sides
	6F: Maple Vinyl on 2 sides (5/8'')
7F: Maple Vinyl on 2 sides (1/4'')	
8F: White Vinyl on 2 sides	
9	1F: Melamine (Blanc. Colombe) 130 gram MP0065
	2F: Melamine (Blanc Moyen) 75 gram MB0021

Tableau 9 : liste des revêtements testés

Les résultats sont reportés dans le Tableau 10.

Mill #	Products	CH2O			TVOC	
		Types	(ppm)	(mg/m ² .hr)	% Reduction	µg/m ² .hr
					as alpha-Pinene	
1	1RB	0.37	0.53		84.87	
	2RB	0.18	0.27		76.38	
	1FP	0.22	0.32	41	151.53	-79
	2FP*	0.24	0.37	-33	115.74	-52
2	1RB	0.34	0.57		273.6	
	1FP	0.015	0.02	96	36.8	87
	2FP	0.02	0.03	94	24.7	91
3	1RB	0.08	0.11		107.5	
	1FP	0.000	0.000	100	4.8	96
	2FP	0.003	0.004	96	4.3	96
4	1RB	0.10	0.14		474.1	
	1FP	0.09	0.13	10	307.9	35
	2FP	0.01	0.01	93	187.9	60
	3FP	0.013	0.020	87	193.8	59
5	4FP	0.01	0.01	92	75.2	84
	1RB	0.16	0.25		284.9	
	1FP	0.02	0.03	88	15.3	95
	2FP	0.00	0.00	100	21.3	93
6	2RB	0.163	0.28		215.0	
	1RB	0.02	0.03		51.3	
	1FP	0.00	0.00	100	51.1	0
	2FP	0.01	0.01	96	69.19	68
7	1RB	0.13	0.19		93.79	
	1FP*	0.15	0.24	-19	72.15	23
8	1RB	0.45	0.55		770.4	
	2RB	0.46	0.56		1169.95	
	3RB	0.48	0.58		817.26	
	4RB	0.47	0.57		742.11	
	1FP	0.09	0.11	80	342.79	56
	2FP	0.03	0.04	93	247.61	79
	3FP	0.03	0.04	94	226.72	72
	4FP	0	0.00	100	47.57	94
	5RB	0.437	0.53		619.72	
	6RB	0.443	0.69		662.21	
	7RB	0.459	0.67		278.04	
	8RB	0.3	0.5		626.98	
	5FP	0.045	0.07	90	245.99	60
6FP	0	0	100	124.75	81	
7FP*	0.054	0.08	88	496.45	-79	
8FP	0.031	0.04	90	406.78	35	
9	1RB	0.073	0.11		422.99	
	1FP	0		100	41.99	90
	2FP	0		100	82.45	81

Tableau 10 : Identification des pourcentages de réduction des émissions de formaldéhyde et COV totaux par application de revêtements (les nombres négatifs indiquent une augmentation d'émission après finition)

Les 5 systèmes les plus efficaces permettant un blocage total des émissions de formaldéhyde des supports testés et réduisant de 81% les COV totaux sont, par ordre croissant d'efficacité :

- 1- revêtement décor, avec une couche d'oxyde d'aluminium,
- 2- revêtement type PVC,
- 3- revêtement type PVC post formable,
- 4- papier mélaminé de 130 g.
- 5- papier mélaminé de 75 g

Une étude publiée en 2003 par Composite Panel Association³⁵ s'intéresse à différents revêtements (stratifié, finitions) comme barrière aux émissions de COV. Elle précise que l'efficacité d'un revêtement barrière dépend de sa perméabilité ou de sa porosité et que l'intégrité du revêtement (absence de perçage, trous) permet aussi une meilleure efficacité, comme illustré dans la Figure 9.

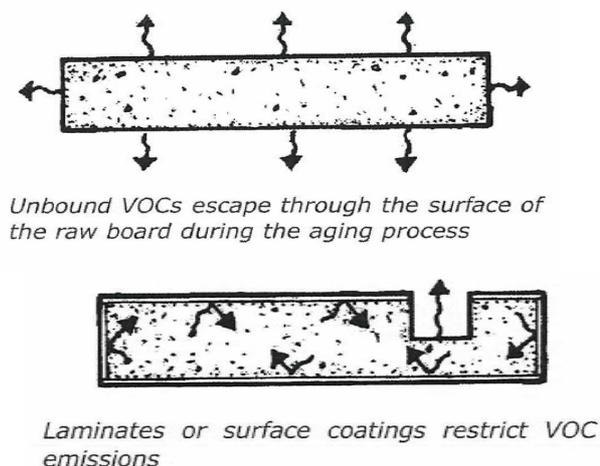


Figure 9: Illustration de l'effet du revêtement sur les émissions de COV (en haut : pas de revêtement, en bas un stratifié ou une finition limite les émissions)

Dans cette étude, les principales barrières considérées sont :

- Revêtements sous forme de feuille ou papier stratifié :
 - Stratifié haute pression (HPL),
 - Feuille papier Kraft imprégnée de résine phénolique d'épaisseur 0.5 mm,
 - Revêtement PVC (épaisseur de 0.15 mm),
 - Papier mélaminé (à 60-130 g/m²), imprégnée de mélamine ou feuille de papier décor (à 23-35 g/m²) imprégnée de résine,
 - Revêtement PVC d'épaisseur de 0.05 mm à 0.125 mm,
 - Feuille de papier de cellulose (40-200 g/m²), imprégnée de mélamine.

Les auteurs précisent que les stratifiés constituent des barrières efficaces, les stratifiés épais étant généralement plus efficaces que les fins.

- Finitions

- Finition UV acrylique
- Alkyde
- Polyuréthane bi-composant (phase aqueuse)
- Finitions poudre
- Finitions à haut extrait sec

Les auteurs précisent que :

- L'application de revêtement de finition induit une émission de COV liée à la finition elle-même. Cette émission se produit lors de l'application et atteint des niveaux relativement bas en quelques heures ou jours ;
- Une finition à base solvant présente une efficacité plus importante qu'une finition à base aqueuse. En particulier, l'application d'une finition polyuréthane ou alkyde en première couche minimise le relevé des fibres du bois (comparé à un produit en phase aqueuse) ce qui permet une barrière plus efficace aux émissions,
- L'application de deux couches de finition produit généralement une barrière plus efficace qu'une seule couche épaisse,
- L'application d'une finition en phase liquide sur le site de fabrication confère une meilleure efficacité par rapport à un produit appliqué sur chantier, car les systèmes d'aspiration industriels emportent les solvants. Lorsque le produit revêtu industriellement est installé, la finition est réticulée et la plupart des émissions ont déjà été émises.
- Les finitions poudre appliquées électro-statiquement ont montré leur efficacité comme barrière à l'émission de formaldéhyde.

- Placages de bois

Les auteurs s'intéressent également aux placages bois comme matériau barrière aux émissions de COV. Ils indiquent les placages peuvent être une barrière à l'émission de certains COV mais qu'ils présentent une efficacité modérée vis-à-vis du formaldéhyde.

Les bois non poreux tels que l'érable et le bouleau sont des barrières à la diffusion plus efficace que des bois poreux comme le frêne et le chêne. Des finitions à haut extrait sec et de faible perméabilité appliquées sur des placages de bois recouvrant des panneaux de bois ont le potentiel de réduire les émissions de COV comme de formaldéhyde.

Les auteurs publient le Tableau 11 issu d'évaluations de laboratoire ou d'expérience industrielle. Il montre que les finitions liquides ou poudres sont classés dans la catégorie de produits permettant de bloquer les émissions de formaldéhyde de 80% à plus de 95%.

EFFECTIVENESS	MATERIAL DESIGNATION	TYPE
Range - 80 thru 95+ %	Acrylate, UV cured	Coating
	Acrylic, electronic cured	Coating
	Alcohol sealer	Coating
	Alkyd	Coating
	Alkyd and latex	Coating
	High pressure laminates	Thick Laminate
	Melamine low pressure laminates (Thermally fused melamine)	Thin Laminate
	Phenol backer sheets	Thick Laminate
	Polyester low pressure laminates (Polyester saturated paper)	Thin Laminate
	Polyurethane, two component (water-based)	Coating
	Polyvinyl acetate	Coating
	Powder Coatings	Coating
	Vinyl laminates	Thin Laminate
Range - 70 thru 90+ %	Alkyd primer sealer	Coating
	Polyurethane	Coating
	Vinyl coated papers	Thin Laminate
Range - Above 50 %	Polyethylene films	Thin Laminate
	Foils	Thin Laminate
Laminates that can achieve 80% and greater effectiveness when used in combination with coatings	Paper laminates	Thin Laminate
	Paper, low basis weight	Thin Laminate
	Veneers	Wood Veneer
Materials that are effective in reducing emissions of VOCs or are low in VOC content (see note below)	High pressure laminates	Thick Laminate
	High solids liquid coatings	Coating
	Melamine low pressure laminates	Thin Laminate
	Vinyl, certain films	Thick/Thin Laminate
	Veneers	Wood Veneer

Tableau 11 : Efficacité des revêtements comme barrière à l'émission du formaldéhyde

Les résultats de Barry présentés précédemment sont certainement à modérer. Leurs résultats montraient qu'un topcoat photopolymérisé était plus efficace en termes de réduction de COV totaux qu'un topcoat acrylique classique (cf lot 1 de leur étude). **Une étude plus récente publiée en 2014 par le CATAS** ²⁶ montre que les émissions de COV totaux d'un revêtement photopolymérisé peuvent être importantes si le process n'est pas maîtrisé. Cette équipe a comparé les émissions de parquets revêtus de 5 finitions différentes, prélevés en industrie (mesures après 72h et 28 jours selon EN ISO 16000-9).

Les résultats figurent dans les tableaux suivants.

1. Parquet coated with a solvent based coating system (PU-1)

VOC	Concentration 72 hours ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration 28 days ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Toluene	12	9
Xylene	48	27
Ethyl benzene	5	4
Butoxy ethanol	16	14
n Butyl acetate	72	34
Methoxy propanol acetate	40	32
Ethoxy propanol acetate	116	87
Di propylen glycol mono propyl ether	27	6
Acetic acid	58	49
Others	19	5
Total	413	267

Tableau 12: Emissions d'un parquet revêtu d'un system de finition en phase solvant (PU-1)

2. Parquet coated with water based coatings (WB-1)

VOC	Concentration 72 hours ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration 28 days ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Aldehydes	38	18
Terpenes	28	7
Acetic acid	265	47
Propandiol	66	14
Acetone	53	17
Diethylene glycol monomethyl ether	309	242
Butoxy propanol	166	64
Diethylene glycol mono butyl ether	248	159
Dipropylene glycol mono methyl ether	28	14
N Methyl pyrrolidone	231	146
N Ethyl pyrrolidone	11	2
Benzophenon	196	140
Others	42	19
Total	1.681	889

Tableau 13 : Emissions d'un parquet revêtu d'un system de finition en phase aqueuse (WB-1)

3. Parquet coated with oils (Oil-1)

VOC	Concentration 72 hours ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration 28 days ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Aldehydes	85	72
Carboxylic acids	812	725
Acetamide	37	22
Acetone	41	32
Toluene	5	3
Others	7	4
Total	987	858

Tableau 14: Emissions d'un parquet revêtu d'huile (Oil-1)

4. Parquet coated with radiation curing coatings (UV-1)

VOC	Concentration 72 hours ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration 28 days ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Aldehydes	32	11
Acetic acid	84	57
Methyl acetate	37	10
Ethyl acetate	12	5
Toluene	17	8
Benzophenone	3	2
Benzaldehyde	3	2
Di methyl hydroxyl acetophenone	7	2
Aromatic hydrocarbons	27	13
Others	15	7
Total	220	117

Tableau 15: Emissions d'un parquet revêtu d'une finition photopolymérisée (UV-1)

5. Parquet coated with radiation curing coatings (UV-2)

VOC	Concentration 72 hours ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration 28 days ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Aldehydes	2	2
Acetic acid	99	70
i-Propanol	157	71
DPGDA	42	13
HDDA	1.120	594 (LCI = 380) *
Benzophenone	21	13
Benzaldehyde	8	2
Di methyl hydroxyl acetophenone	40	20
Hydroxyl cyclohexyl phenyl ketone	63	23
Others	88	34
Total	1.640	842

(*) Limit derived from the official German list of LCI

Tableau 16: Emissions d'un parquet revêtu d'une finition photopolymérisée (UV-2)

Ces tableaux montrent que parmi les parquets testés, c'est celui revêtu de la finition photopolymérisée UV-1 qui présente les émissions les plus faibles à 72 heures comme à 28 jours.

Par contre celui revêtu de la finition photopolymérisée UV-2 présente de fortes émissions liées à la présence de monomères acryliques tels que le 1,6 hexanediol diacrylate (HDDA) et le dipropylène glycol diacrylate (DPGDA). Dans les deux cas (UV-1 et UV-2), les auteurs soulignent une émission de benzaldéhyde résultant de réactions chimiques impliquant des photoinitiateurs (nécessaires au séchage de la finition). Les auteurs suggèrent que les fortes émissions de la finition UV-2 révèlent vraisemblablement une déficience des lampes UV utilisées pour la réticulation. Les émissions de bois revêtus sont donc aussi tributaires des conditions de séchage.

Le parquet fini avec la finition en phase solvant (Tableau 12) est le moins émissif après le parquet revêtu de la finition photopolymérisée UV-1. Il montre moins d'émission que celui fini avec la finition en phase aqueuse (Tableau 13). Pour ce dernier, les émissions d'éther de glycol sont importantes, ces substances étant utilisées comme agents de coalescence dans les finitions en phase aqueuse. Le parquet revêtu d'huile présente des niveaux d'émissions supérieurs au parquet revêtu de finition en phase solvant. Cet exemple amène les auteurs à conclure que les finitions dites « naturelles », telles que les huiles, ne sont pas exemptes d'émissions de COV.

Dans sa mise à jour sur le formaldéhyde (février 2016), la commission américaine de sécurité des produits de consommation liste quelques solutions pour réduire les niveaux existants de formaldéhyde. Parmi ces solutions figure l'application de peintures sur les surfaces émissives qui ne seraient pas déjà revêtues³⁶, précisant que l'application de finition conduit cependant à des émissions de COV nécessitant d'aérer les locaux durant et après le traitement.

Une solution qui permet de bloquer les émissions de formaldéhyde est de revêtir la surface par un placage bois. **Les travaux de W.J. Groah et al. (1992)**³⁷, présentent l'utilisation de placages d'érable de différentes épaisseurs (0.5 mm – 0.8 mm). L'augmentation des épaisseurs de plis induit une réduction de l'émission du formaldéhyde plus importante. Une épaisseur de 2 mm permet de réduire une émission d'un facteur 2.2 par rapport à une épaisseur de 0.46 mm.

D'autre part, **une étude menée par FCBA (« Banc de qualité sur les émissions de COV » à partir des composants de construction bois, C. Yriex, 2003)** a permis de mettre en évidence entre autre les effets barrières de revêtements mélaminé blanc et décor chêne sur panneaux de particules avec une efficacité de réduction à l'émission de 97%.

Les panneaux de particules bruts étaient de type E1 et E2. Deux panneaux de particules mélaminés blanc (MB) et décor chêne (MC) fabriqués à partir du même lot que le panneau de particules brut de type E1 ont été testés.

Les concentrations à 28 jours selon le protocole décrit dans le rapport pour les principaux composés identifiés sont regroupées dans le Tableau 17 (concentrations supérieures à 5 µg/m³ pour les panneaux bruts E1 et E2).

Il est observé une efficacité de réduction de l'émission de formaldéhyde à minima (pour le panneau E1) de :

- 97% pour un revêtement mélaminé blanc (MB),
- 94% pour un revêtement mélaminé décor chêne (MC).

Une efficacité de réduction est observée pour le revêtement mélaminé de 72% pour ce qui concerne les COV totaux. Une efficacité importante est observée pour la réduction des émissions d'aldéhyde avec une réduction respectivement de 92% pour le revêtement mélaminé blanc et de 80% pour le revêtement mélaminé décor chêne, concernant le panneau E1.

Composé	E1	E2	MB	MC
Formaldéhyde	210,2	464,0	7,0	12,1
Hexaldéhyde	64,3	47,6	4,2	14,8
Valéraldéhyde	19,0	16,5	1,2	4,1
Acide acétique	13,4	14,2	1,1	1,2
Isovaléraldéhyde	12,2	11,6	< 1	< 1
Acétaldéhyde	10,5	6,5	3,1	7,7
Acétone	34,5	36,5	10,3	30,3
Undécane	9,4	6,3	6,9	8,1
Alpha-pinène	7,3	1,7	ND	16,9
Nonanal	6,7	2,6	1,5	1,6
1-Pentanol	5,4	6,6	ND	ND
COVT (éq toluène)	157,7	124,3	44,5	83,9
Total Aldéhydes HPLC	366,6	595,5	29,3	75,5

Tableau 5 : Concentrations en chambre d'essai d'émission à 28 jours des principaux composés identifiés pour les panneaux de particules (unités : $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ - ND : non détecté)

Tableau 17: Niveau d'émission en Formaldéhyde et COVT/Aldéhydes de panneaux de particules bruts et revêtus mélaminés blanc (MB) et décor chêne (MC), Extrait Tableau 5 du rapport : Banc de qualité sur les émissions de COV à partir des composants de construction bois, C. Yrieix 2003.

Cette expérimentation confirme les résultats issus de la littérature.

Une autre étude, **Etude des émissions de COV et de formaldéhyde des parquets contrecollés** (Etude FCBA, Formacol 2, UFFEP, juillet 2009) a permis également de mettre en évidence un phénomène de blocage de l'émission de formaldéhyde par application d'un vernis acrylique UV et par application d'un parement sur parquet contrecollé.

Les éléments communs à tous les échantillons (paramètres fixés) étaient les suivants :

- parquet contrecollé 3 plis,
- parement en chêne,
- **dans le cas d'application d'une finition : application d'un vernis acrylique UV,**
- nature de l'âme : panneau HDF avec un collage aminoplaste de type UF (classement E1).

Les conditions opératoires sont décrites dans le rapport. Les conditions de l'essai ont été sélectionnées selon les recommandations de la norme NF EN ISO 16000-9. Le renouvellement d'air a été fixé pour obtenir un débit d'air spécifique par unité de surface dans la chambre d'essai d'émission de $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$.

Description des lames de parquets :

- Collage inter-plis UF1 / parement 2,5 mm / non verni
- **Collage inter-plis UF1 / parement 2,5 mm / vernis acrylique UV**

Les résultats sont reportés dans le Tableau 18.

Eprouvette d'essai	Concentration à 3 jours ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Facteur d'émission spécifique ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$)
UF2 / parement 2,5 mm / sans finition	151	60,3
UF3 / parement 3,4 mm / sans finition	31	10,4
UF3 / parement 2,5 mm / sans finition	50	19,9
Vinylique / parement 2,5 mm / sans finition	16	6,2
UF1 / parement 2,5 mm / sans finition	103	41,0
UF1 / parement 2,5 mm / vernis acrylique UV	9,9	4,0
EPI / parement 2,5 mm / sans finition	34	13,4

Tableau 18: Concentrations expérimentales et facteurs d'émission spécifiques en formaldéhyde émis par les parquets contrecollés dans la chambre d'essai d'émission

Influence de la finition / vernis acrylique UV :

Les facteurs d'émission spécifiques en formaldéhyde ont été comparés en fonction de la présence ou non d'une finition (acrylique UV) pour un même type de collage inter-plis (UF1) et pour une même épaisseur de parement (2,5 mm).

Les lames de parquet brut provenaient du même lot de fabrication. Les résultats d'essai selon la norme NF EN ISO 16000-9 sur les lames de parquet brut et verni sont donc directement comparables. Ils sont présentés sur la Figure 10.

Les résultats montrent un abattement d'un facteur 10 des facteurs d'émission spécifiques en formaldéhyde lorsqu'un vernis acrylique UV est appliqué sur la lame de parquet brut.

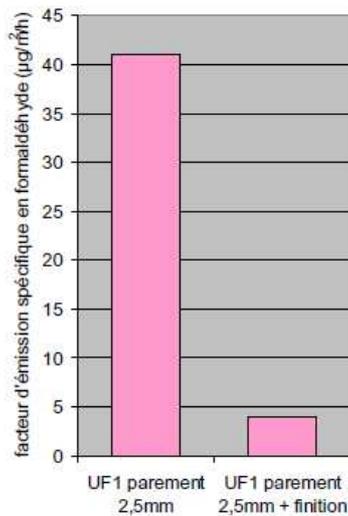


Figure 10: Influence de la finition sur les facteurs d'émission spécifiques en formaldéhyde des parquets contrecollés

En Synthèse de ces différentes études, les revêtements barrière les plus performants sont :

Efficacité de la réduction de l'émission de formaldéhyde	Types de traitement
> 90%	Finition poudre époxy Revêtement mélaminé Papier Kraft imprégné de résine phénolique Papier imprégné de mélamine Revêtement PVC
50 % - 90%	Vernis acrylique UV (à condition de vérifier l'efficacité des lampes UV) Papier vinylique
< 50%	Parement Placage Peinture acrylique

2.3.2 Abaissement du niveau d'émission par addition d'absorbeurs ou réactifs de formaldéhyde dans les revêtements

Cas rencontrés dans le domaine des panneaux.

Un des moyens de réduire les émissions est de faire réagir le formaldéhyde faiblement lié ou généré par hydrolyse dans la résine par l'addition d'absorbeurs permettant de le piéger. A titre d'exemples, il est ici mentionné ci-dessous l'effet de l'addition d'absorbeurs principalement de type azotés dans le secteur des panneaux mais aussi dans

d'autres secteurs (informations issues de brevets). Certains faits marquants sont reportés ci-dessous à titre d'illustration :

- **Réduction de 50%** d'émissions de formaldéhyde d'un mélange phénol/formaldéhyde par une **addition d'un absorbeur à base de bisulfite de sodium ou d'ammonium à 4 et 6% dans la résine** imprégnant les fibres de verre (Brevet EP1419038B1 - Method for reducing formaldehyde content and formaldehyde emission from particleboard (US5578371, 1996. Taylor Thoams (US)),
- Une étude portugaise de 201338 examine la performance des trois piègeurs de formaldéhyde dans les panneaux à base de bois : métabisulfite de sodium, bisulfite d'ammonium et urée. Selon les auteurs le métabisulfite de sodium s'est montré excellent fixateur et a permis la production de panneaux de particules avec zéro émission de formaldéhyde (méthode du perforateur).
- Réduction de l'émission de formaldéhyde grâce à l'application de composés contenant de l'azote. Le procédé se caractérise en ce que : (i) sur le matériau est appliqué un mélange qui contient au moins **une polyamine** et éventuellement jusqu'à **20% en poids**, rapportés au mélange d'urée ; (ii) de polyamine appliquée dans ou sur un panneau de particules ou de fibres ; (iii) de polyamine est appliquée sur le substrat de revêtement employé pour la finition de surface ; et/ou (iv) de la polyamine est appliquée sur les emplacements ouverts. Selon l'invention, les polyamines ont une masse molaire d'au moins 500 g/mol et comprennent au moins 6 groupes amino primaires ou secondaires. (Brevet EP1979139A1 - Procédé pour limiter l'émission de formaldéhyde dans des matériaux de construction en bois),
- L'invention concerne **l'addition de carbodihydrazide**, en imprégnation et polymérisation au sein du matériau ou en spray sur les fibres (Brevet EP1905560B1 - Fiber board capable of capturing and decomposing aldehyde),
- L'addition de pentaborate d'ammonium $\text{NH}_4\text{B}_5\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, composé additionné en tant qu'ignifugeant et permettant de réduire les émissions de formaldéhyde (Gao W. et al., Wood Research, vol. 55, N°3, 2010, pp.61-72).
- L'addition de dérivé de **type « pozzolan », aluminosilicates**, à une colle UF permet une réduction des émissions de formaldéhyde dans les panneaux de part une forte

porosité et capacité d'absorption (Kim, S., Construction and Building Materials, vol. 23, N°6, 2009, pp.2319-2323).

Il serait peut-être imaginable d'ajouter dans des films de finitions ou revêtements des réactifs du formaldéhyde à base azotés (type polyamine, ammonium, ...). L'addition de telles substances risquent cependant de modifier les performances de la finition. La capacité de piégeage et de réactivité de l'absorbeur vis-à-vis du COV ciblé (ici le cas du formaldéhyde) reste également à vérifier.

2.3.3 Dégradation chimique du formaldéhyde et de COV par photocatalyse.

Les COV peuvent être oxydés à température ambiante et sous pression atmosphérique par le biais d'un catalyseur activé par un rayonnement lumineux. C'est le principe de la photocatalyse. Cependant, les réactions de dégradation des COV étant complexes, cette technique peut conduire à la **formation de sous-produits d'oxydation pouvant s'avérer plus toxiques que les COV initiaux.**

Des travaux de recherche et développement s'intéressent néanmoins à l'addition de dioxyde de titane (TiO₂) pour produire des revêtements photocatalytiques^{39,40}.

Les effets du dioxyde de titane sur la santé font cependant l'objet de divers débats.

2.4 Synthèse de la partie bibliographique et orientation de la partie expérimentale:

La protection du bois en extérieur, et en particulier pour la menuiserie est principalement assurée par:

- des produits en phase solvant (alkydes, alkydes uréthanes),
- des produits en phase aqueuse (acryliques, alkydes modifiées, acryliques uréthanes),

Le secteur industriel utilise une majorité de produits en phase aqueuse.

L'étude bibliographique montre qu'appliquer une finition est une voie pour limiter les émissions de COV des panneaux de particules et MDF.

Des finitions d'une épaisseur adéquate peuvent être des barrières efficaces. En particulier les études s'accordent pour conclure que les revêtements à séchage UV sont des barrières

efficaces, encore faut-il qu'ils soient correctement polymérisés sous risque de produire l'effet inverse.

Les finitions poudre époxy sont plusieurs fois citées comme barrière très efficace. Cependant ce type de finition n'est pas compatible avec un emploi de type menuiserie extérieure.

Des revêtements actifs (revêtements photocatalytiques) sont en développement mais l'utilisation de nano-particules est sujette à controverse sur le plan sanitaire et environnemental. De plus ces revêtements peuvent aboutir à la formation de sous-produits plus toxiques que les COV initiaux.

Différentes références bibliographiques montrent que l'effet barrière d'une peinture alkyde est supérieur à celui d'une peinture acrylique. Les revêtements alkydes sont aussi connus pour leur effet barrière à l'eau plus important que celui des acryliques (cf .étude CODIFAB *Perméabilité à l'eau liquide des finitions*, 2010-2012). La question de la perméabilité à la vapeur d'eau comme indicatrice de l'effet barrière des finitions s'est donc imposée au cours de la présente étude. Il a alors été décidé, en accord avec l'UFME, de revoir le programme expérimental de l'étude afin d'inclure des mesures de perméabilité à la vapeur d'eau comme potentiellement indicatrices d'effet barrière des finitions utilisées en menuiserie. La mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau présente l'avantage d'être moins longue et moins coûteuse que la mesure d'émissions de COV.

De même, il a été décidé avec l'UFME de se concentrer sur les bois résineux afin de maximiser les substances émises, décision prise sur la base de l'expérience de FCBA relatives aux mesures de COV réalisées sur différentes essences de bois utilisées en menuiserie.

3 Partie expérimentale

3.1 Objectifs

L'objectif de la partie expérimentale, revue suite à l'étude bibliographique, est d'étudier l'effet barrière des revêtements utilisés en menuiserie et de déterminer si la perméabilité à la vapeur d'eau d'une finition peut être indicatrice de son effet barrière aux émissions de COV du support qu'elle recouvre.

3.2 Sélection des systèmes à étudier : enquête auprès des menuisiers

Pour sélectionner les systèmes à étudier, une première enquête a été réalisée par l'UFME auprès de ses adhérents. Cinq d'entre eux ont fourni des informations sur la nature des essences utilisées, ainsi que quelques informations relatives aux finitions utilisées. Cette enquête a été complétée par une analyse des dossiers des menuisiers sous certification FCBA permettant d'accéder aux fiches techniques des finitions utilisées. Cette analyse a permis de sélectionner deux menuiseries industrielles (Menuiserie 1 et Menuiserie 2) travaillant des essences résineuses connues pour émettre des COV. Ces deux menuiseries ont été contactées et ont accepté de fournir des échantillons pour une première phase de mesures de perméabilité à la vapeur d'eau.

3.3 Etude de la perméabilité à la vapeur d'eau de finitions utilisées en menuiserie (Phase 1)

3.3.1 Principe de la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau

Un revêtement doit présenter une forte imperméabilité à l'eau liquide mais une certaine perméabilité à la vapeur d'eau afin de libérer l'eau qui pourrait s'infiltrer entre le bois et le revêtement. La mesure de perméabilité à la vapeur d'eau est réalisée par la méthode de la coupelle humide selon la norme EN ISO 7783 ⁴¹ dédiée aux peintures et vernis.

Du fait de la différence entre la pression partielle de vapeur d'eau dans la coupelle test (humidité de 93%) et la pression partielle de vapeur d'eau dans la salle conditionnée, la vapeur d'eau va diffuser à travers le revêtement testé. En pesant la coupelle à des

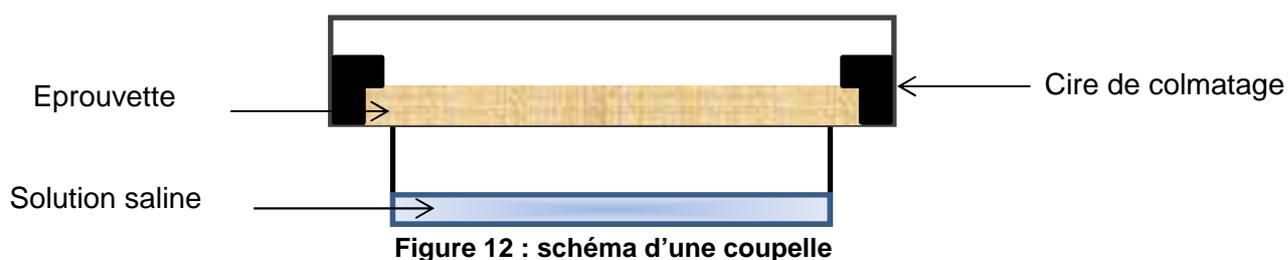
intervalles de temps différents, le changement de masse est suivi ce qui permet de calculer l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur d'eau (S_d).

Pour ce test, des éprouvettes en forme de disque de 92 mm de diamètre et de 5 mm d'épaisseur sont découpées dans les échantillons de menuiseries fournis, et conditionnées à (23 ± 2) °C et une humidité relative de (50 ± 5) %. Les éprouvettes sont ensuite déposées dans les coupelles de test avec la finition vers le haut (voir Figure 11).



Figure 11: Eprouvettes revêtues dans les coupelles de test

La partie inférieure de la coupelle (voir Figure 12) contient une solution saline de dihydrogénophosphate d'ammonium $NH_4H_2PO_4$ pour maintenir une humidité relative constante de 93 %. Les coupelles sont conditionnées à (23 ± 2) °C et une humidité relative de (50 ± 5) %.



L'appareil disponible à FCBA (voir Figure 13) permet de peser la masse à intervalle de temps régulier et de faire son suivi jusqu'à stabilisation.



Figure 13: Appareil permettant de mesurer la perméabilité à la vapeur d'eau

L'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur d'eau est calculée par :

$$S_d = \delta a \times \Delta P_v / V$$

- Avec δa , la perméabilité de l'air qui est 0.0169 g/m.d.Pa (en gramme par mètre par jour par pascal)
- ΔP_v la différence entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans la coupelle et dans la salle conditionnée soit 1207 Pa pour le test de la coupelle humide.
- V représente le taux de transmission de vapeur d'eau en gramme par mètre carré par jour et il est calculé grâce à la formule

$$V = 24 \times \frac{p \cdot G}{p_0 \cdot A} \text{ avec } p = p_0 = 1013 \text{ hPa soit } V = 24 \times \frac{G}{A}$$

G représente le flux de vapeur d'eau en gramme par heure soit $G = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$ avec m_2 et m_1 respectivement les masses en grammes aux temps t_2 et t_1 en heures. A représente l'aire de l'éprouvette soit πR^2 (avec R le rayon de l'éprouvette) en mètre carré.

Ainsi pour chaque test, le S_d du système bois + finition est calculé. Il est comparé au S_d du bois nu (sans finition). Plus la valeur de S_d est grande, plus le revêtement est imperméable à la vapeur d'eau.

3.3.2 Cas de la Menuiserie 1

L'essence de bois utilisée par la Menuiserie 1 est le pin maritime.

Les configurations testées sont détaillées dans le Tableau 19.

Support N°	Support Lamellé collé
A	Pin maritime nu
B	Pin maritime traité (préservation)
C	Pin maritime traité et fini opaque (finition complète)
D	Pin maritime traité et fini transparent (finition complète)
E	Pin maritime traité et fini transparent (1 seule couche de finition)

Tableau 19 : configurations testées / Menuiserie 1

La Figure 14 montre les bois de bouts des carrelets reçus. L'ensemble des carrelets présentaient des débits relativement homogènes.

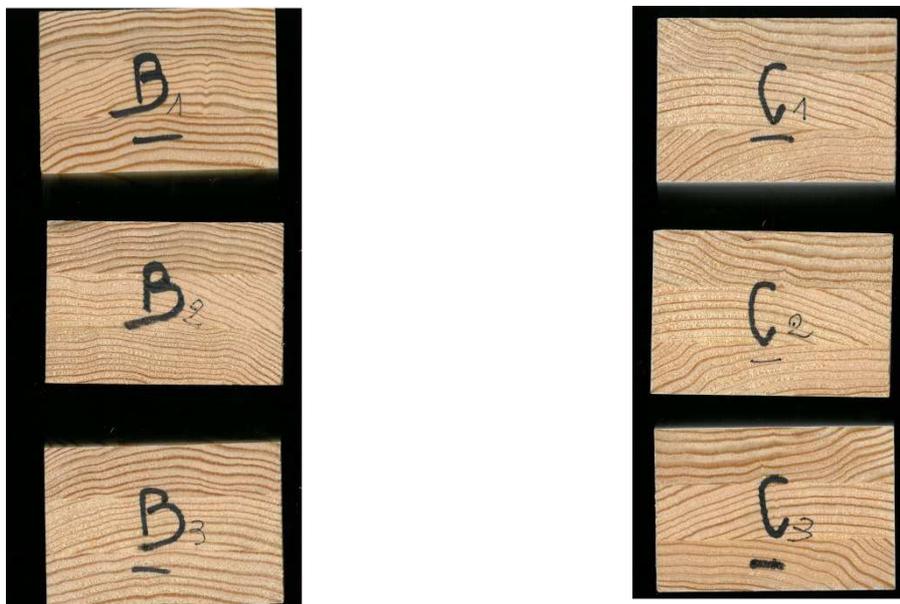


Figure 14: visualisation des sections transversales des carrelets fournis (exemple des carrelets B et C)

Dans les carrelets fournis ont été prélevés des disques qui ont été soumis au test de la coupelle humide.

Pour chaque configuration reçue, trois échantillons ont été testés. Les résultats de Sd sont rassemblés dans la Figure 15 (moyenne et intervalle de confiance à 95%). On rappelle que Sd (exprimé en mètre) est l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur d'eau. Sd correspond à l'épaisseur en mètre de la couche d'air stationnaire qui exercerait la même résistance à la diffusion de vapeur que la couche de matériau testé.

Plus la valeur de Sd est grande, moins le produit laisse passer de vapeur d'eau.

Les résultats montrent que le bois brut et le bois préservé ont des Sd équivalents. La préservation utilisée n'influence donc pas les propriétés de diffusion de la vapeur d'eau. L'application d'une seule couche de finition transparente conduit à une très légère augmentation de Sd comparativement au bois brut. L'effet barrière à la vapeur d'eau est par contre plus marqué avec lorsque le bois est recouvert d'une finition complète transparente. L'application d'une finition complète opaque conduit à une valeur moyenne de Sd légèrement plus importante.

En conclusion la mesure de perméabilité à la vapeur d'eau permet de discriminer les différentes surfaces en fonction de la finition présente.

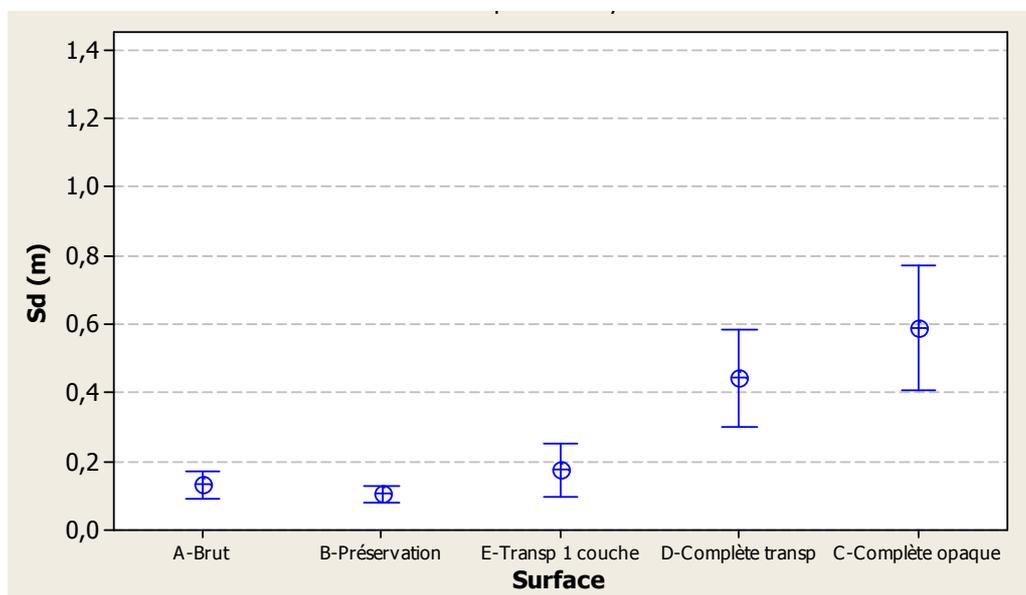


Figure 15: Epaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur d'eau (Sd) des différents échantillons de pin maritime testés (moyenne et intervalle de confiance 95%)

3.3.3 Cas de la Menuiserie 2

L'essence de bois utilisée par la Menuiserie 2 est le pin sylvestre.

Les configurations testées sont détaillées dans le Tableau 20.

Support N°	Support Lamellé collé
A	Pin sylvestre nu (sans aucun traitement ni finition)
B	Pin sylvestre traité (préservation)
C	Pin sylvestre traité et recouvert d'un primaire opaque de finition
D	Pin sylvestre traité et recouvert d'un primaire opaque de finition + finition opaque

Tableau 20: configurations testées / Menuiserie 2

La Figure 16 montre les sections transversales des carrelets reçus.

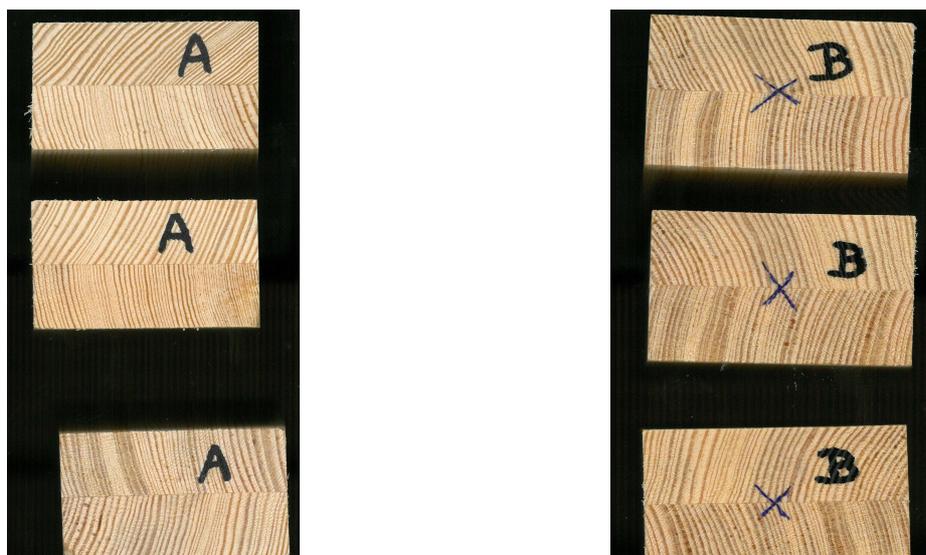


Figure 16 : visualisation des sections transversales des carrelets fournis (exemple des carrelets A et B)

Dans les carrelets fournis ont été prélevés des disques soumis au test de la coupelle humide.

Pour chaque configuration reçue, trois échantillons ont été testés. Les résultats de Sd sont rassemblés dans la Figure 17 (moyenne et intervalle de confiance à 95%).

Les résultats montrent que le pin sylvestre brut et le pin sylvestre préservé ont des Sd équivalents. La finition complète (primaire + finition opaque) conduit à un effet barrière à la vapeur d'eau très marqué.

Par contre l'application du primaire seul conduit à une variabilité des résultats. Cela s'explique par le fait que le primaire conduit à un revêtement beaucoup moins régulier en termes d'épaisseur que la finition complète.

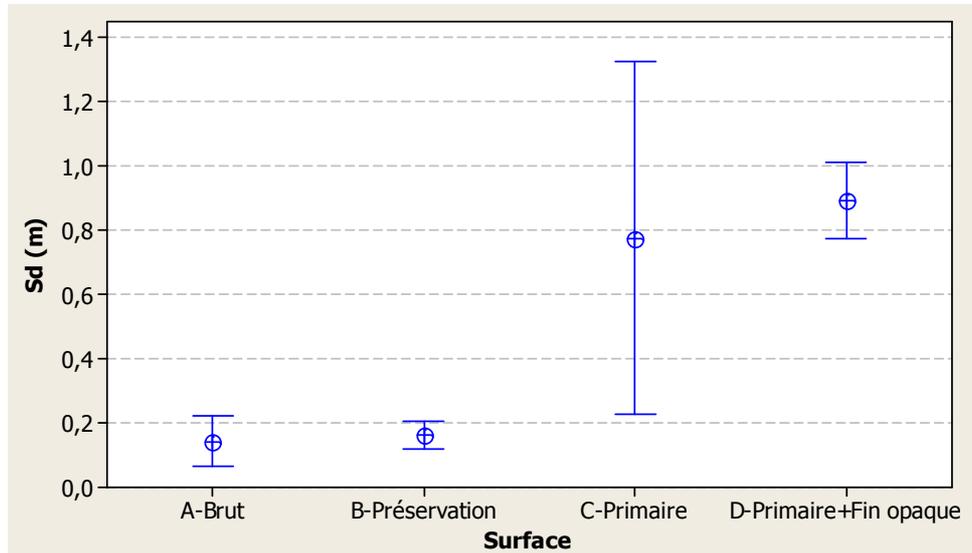


Figure 17: Epaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur d'eau (Sd) des différents échantillons de pin sylvestre testés (moyenne et intervalle de confiance 95%)

En conclusion la mesure de perméabilité à la vapeur d'eau permet de discriminer les différentes surfaces de pin sylvestre en fonction de la finition reçue.

3.3.4 Conclusion

Pour les différents échantillons testés que les deux menuiseries industrielles nous ont fournis, la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau (méthode de la coupelle humide) a permis de différencier les différents types de surface. En particulier, que ce soit sur le pin sylvestre ou le pin maritime, le traitement de préservation n'a pas montré d'influence sur la valeur de Sd. Ce type de traitement étant très peu chargé en résine, il est compréhensible qu'il n'apporte pas d'effet barrière à la vapeur d'eau.

L'effet de la finition est par contre plus ou moins marqué selon que l'on a affaire à un primaire ou une finition complète. Cette dernière étant plus filmogène, elle procure un effet barrière à la vapeur d'eau plus marqué.

A partir de ces résultats, de nouveaux échantillons ont été demandés aux deux menuiseries industrielles pour réaliser la phase 2. Il s'agissait alors de réaliser non seulement des mesures d'émissions de COV, mais à nouveau des mesures de perméabilité à la vapeur d'eau pour qu'elles puissent émaner du même mot de fabrication ; l'idée étant de tenter de relier les résultats de perméabilité à la vapeur d'eau avec les émissions obtenues.

3.4 Etude de l'effet barrière des finitions aux émissions de COV et à la vapeur d'eau (Phase 2)

3.4.1 Configurations étudiées

3.4.1.1 Cas de la Menuiserie 1

A partir des résultats de la phase 1, les configurations suivantes ont été retenues :

Carrelet Type	Composition
A	Pin maritime nu
C	Pin maritime traité préservation + finition complète blanche
D	Pin maritime traité préservation + Finition complète transparente
E	Pin maritime traité préservation+ 1 seule couche de finition transparente

3.4.1.2 Cas de la Menuiserie 2

A partir des résultats de la phase 1, les configurations suivantes ont été sélectionnées et approvisionnées.

Carrelet Type	Composition
A	Pin sylvestre nu (sans aucun traitement ni finition)
D	Pin sylvestre traité et recouvert d'un primaire opaque de finition + finition opaque

3.4.2 Mesures de perméabilité à la vapeur d'eau

Les mesures de perméabilité ont été réalisées selon le même protocole que celui décrit en Phase 1 (cf 3.3.1).

3.4.3 Mesures d'émissions de COV

3.4.3.1 Objectif

Il s'agissait de mesurer le dégagement de composés volatils à partir de carrelets de fenêtres en pin selon une norme de conditionnement en chambre d'essai d'émission :

- NF EN ISO 16000-9 (2006) : Air intérieur – Partie 9 : Dosage de l'émission de composés organiques volatils des produits de construction et d'objets d'équipement – Méthode de la chambre d'essai d'émission.

Différents types d'analyse ont été réalisés après 3, 7 et 28 jours de conditionnement des carrelets en chambre d'essai d'émission :

- Prélèvement sur tube Tenax TA de l'air de la chambre d'essai d'émission et analyse des composés organiques volatils (COV) par TD/GC/MS/FID selon les conditions de la norme NF ISO 16000-6 (2012)
- Prélèvement sur cartouche de gel de silice imprégné de DNPH (2,4-dinitrophénylhydrazine) de l'air de la chambre d'essai d'émission et analyse des composés carbonylés de faible poids moléculaire par HPLC/UV selon les conditions de la norme NF ISO 16000-3 (2011).

Les substances volatiles suivantes ont été systématiquement recherchées :

- Formaldéhyde (numéro CAS 50-00-0)
- Acétaldéhyde (numéro CAS 75-07-0)
- Toluène (numéro CAS 108-88-3)
- Tétrachloroéthylène (numéro CAS 127-18-4)
- Xylène (numéro CAS 1330-20-7)
- 1,2,4-Triméthylbenzène (numéro CAS 95-63-6)
- 1,4-Dichlorobenzène (numéro CAS 106-46-7)
- Éthylbenzène (numéro CAS 100-41-4)
- 2-Butoxyéthanol (numéro CAS 111-76-2)
- Styrène (numéro CAS 100-42-5)
- Composés organiques volatils totaux (COVT)

Elles sont tirées de l'arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils.

En plus de cette liste, des composés dits « traceurs » ont été identifiés et quantifiés parmi les autres substances volatiles émises par les carrelets :

- ✓ alpha-pinène (numéro CAS 80-56-8),
- ✓ hexanal (numéro CAS 66-25-1),
- ✓ acide acétique (numéro CAS 64-19-7).

3.4.3.2 Principe de l'essai

La norme NF EN ISO 16000-9 spécifie une méthode générale d'essai en laboratoire permettant de déterminer le facteur d'émission spécifique par unité de surface, de composés organiques volatils (COV) provenant des produits de construction nouvellement fabriqués ou d'objets d'équipement, dans des conditions climatiques définies. La méthode peut être également appliquée aux produits qui ont vieilli.

L'essai est effectué dans une chambre d'essai d'émission dans des conditions constantes de température (23 ± 2 °C), d'humidité relative (50 ± 5 %) et de débit d'air spécifique par unité de surface (rapport entre le débit d'air soufflé et la surface totale des éprouvettes d'essai placées dans la chambre d'essai d'émission).

L'air de la chambre d'essai d'émission est complètement brassé et les mesurages de la concentration de COV dans l'air de sortie sont représentatifs de l'air dans la chambre d'essai d'émission.

Lorsque l'on connaît la concentration de COV dans l'air à un moment donné, le débit d'air dans la chambre d'essai d'émission et la surface de l'éprouvette d'essai, il est possible de déterminer les facteurs d'émission spécifiques par unité de surface, de COV provenant des produits soumis à essai.

3.4.3.3 Echantillonnage et préparation des éprouvettes

L'échantillonnage et l'expédition des carrelots ont été réalisés par les fabricants de fenêtres.

Les échantillons ont été reçus dans un emballage hermétique à l'air et aux UV (papier aluminium). Avant leur préparation pour essai, ils ont été stockés dans leur emballage à température ambiante tel que décrit dans la norme NF EN ISO 16000-11 (2006).

Des éprouvettes d'essai ont été préparées à partir de chaque échantillon reçu au laboratoire (2 carrelots préparés par référence). Chaque carrelot a été découpé sur un côté et les chants ont été colmatés à l'aide d'un ruban adhésif aluminium non émissif. Seule 4 faces (bois de fil) sont donc mises au contact de l'air de la chambre de test.

Les éprouvettes d'essai découpées et colmatées sont présentées sur la Figure 18.

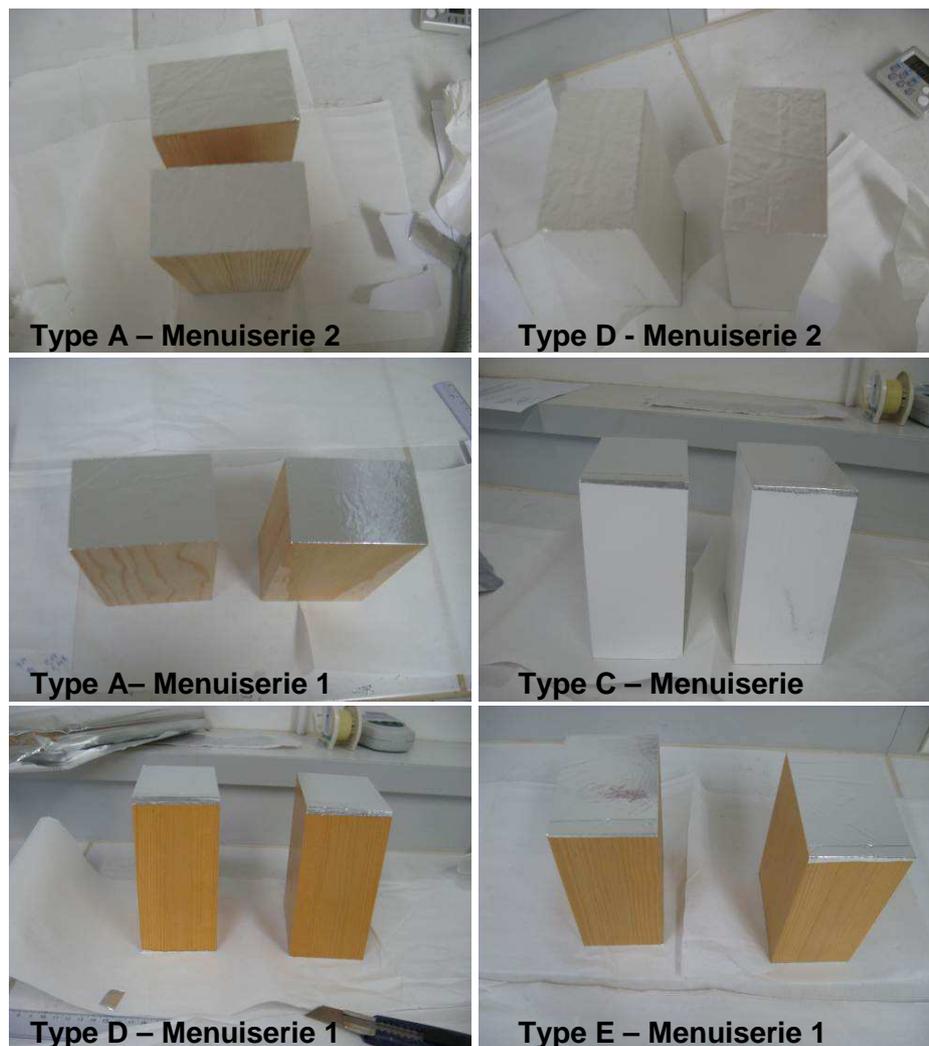


Figure 18: Epreuves d'essai après découpe et colmatage

Les paramètres d'essai en chambre de test sont décrits dans les Tableau 21, Tableau 22, Tableau 23.

Paramètre d'essai		Unités
Dimension des éprouvettes d'essai	2 éprouvettes de 0,148 x 0,100 x 0,070 m	m
Surface de l'éprouvette (S)	0,1	m ²
Volume chambre d'essai (V)	0,200	m ³
Taux de renouvellement d'air (n)	0,5	h ⁻¹
Taux de charge essai (L = S/V)	0,5	m ² /m ³
Débit d'air spécifique (q _{essai} = n/L)	1,0	m ³ /(m ² .h)

Tableau 21: Paramètres d'essai en chambre de test pour le support A - Menuiserie 1

Paramètre d'essai		Unités
Dimension des éprouvettes d'essai	2 éprouvettes de 0,150 x 0,100 x 0,070 m	m
Surface de l'éprouvette (S)	0,1	m ²
Volume chambre d'essai (V)	0,225	m ³
Taux de renouvellement d'air (n)	0,445	h ⁻¹
Taux de charge essai (L = S/V)	0,5	m ² /m ³
Débit d'air spécifique (q _{essai} = n/L)	1,12	m ³ /(m ² .h)

Tableau 22: Paramètres d'essai en chambre de test pour les supports C, D et E - Menuiserie 1

Paramètre d'essai		Unités
Dimension des éprouvettes d'essai	2 éprouvettes de 0,185 x 0,085 x 0,050 m	m
Surface de l'éprouvette (S)	0,1	m ²
Volume chambre d'essai (V)	0,0509	m ³
Taux de renouvellement d'air (n)	0,98	h ⁻¹
Taux de charge essai (L = S/V)	1,96	m ² /m ³
Débit d'air spécifique (q _{essai} = n/L)	0,5	m ³ /(m ² .h)

Tableau 23: Paramètres d'essai en chambre de test pour les supports A et D - Menuiserie 2

Selon la taille de la chambre d'essai d'émission, les conditions expérimentales ne reflètent pas le scénario d'exposition défini dans l'arrêté du 19 avril 2011 (débit d'air spécifique de 7 m³/(m².h)). Par contre, et comme prévu dans le protocole de préparation des éprouvettes d'essai de portes et de fenêtres proposé par la DHUP, un autre scénario a été appliqué respectant les conditions expérimentales suivantes :

- 0,25 h⁻¹ ≤ taux de renouvellement d'air ≤ 1,5 h⁻¹
- taux de charge ≤ 2 m²/m³

Les éprouvettes d'essai ont été conditionnées à 23 ± 2°C et 50 ± 5% d'humidité relative dans des chambres en verre de 50,9 à 225 litres. Leur introduction dans la chambre correspond au début (T₀) de l'essai d'émission (Figure 19).

Durant toute la durée de l'essai, la température et l'humidité relative sont mesurées.

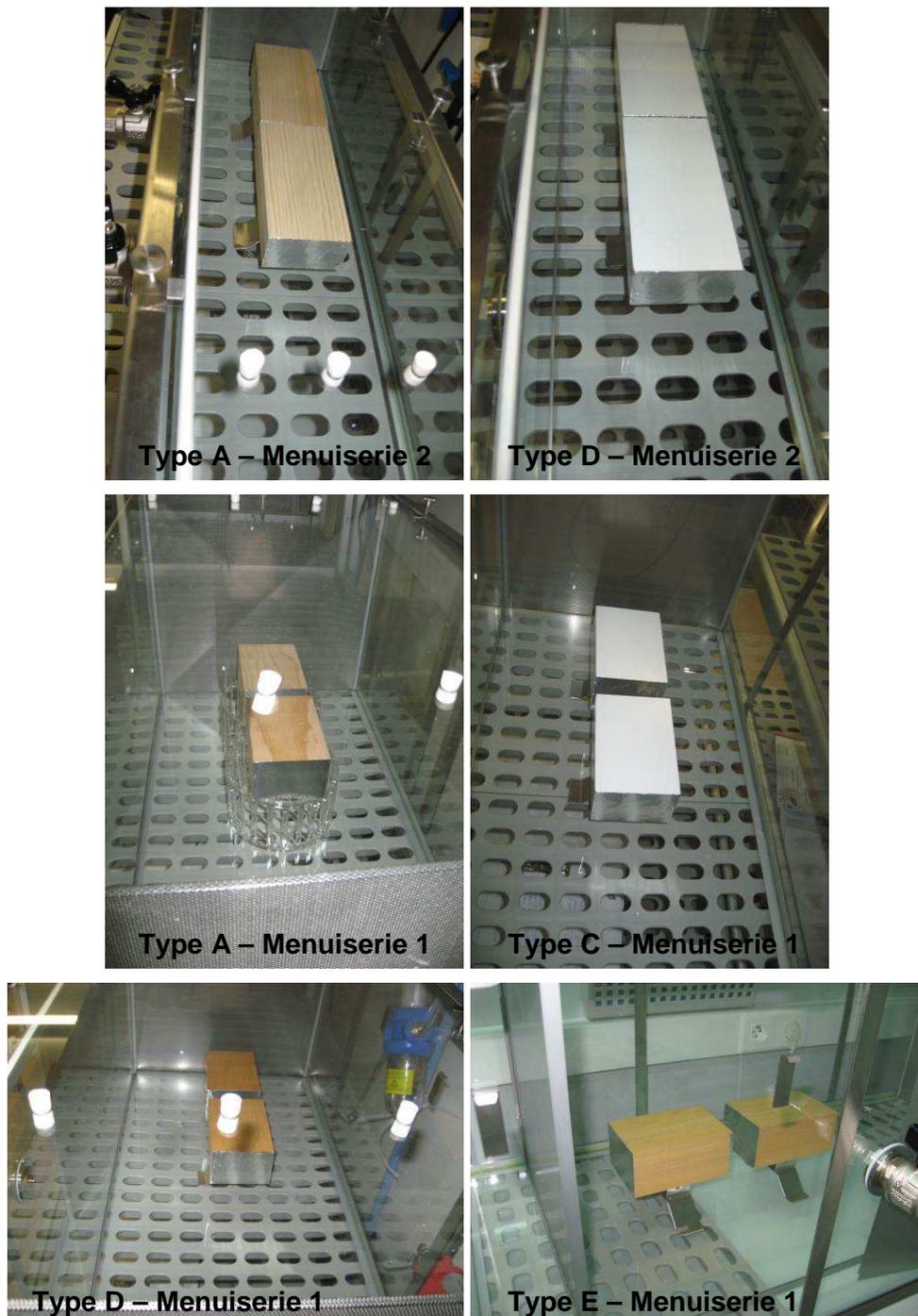


Figure 19: conditionnement des éprouvettes en chambre de test

3.4.3.4 Déroulement de l'essai

L'air de la chambre de test a été prélevé après 3, 7 et 28 jours de conditionnement à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et $50 \pm 5\%$ d'humidité relative.

Les composés volatils ont été prélevés par échantillonnage actif (pompage) de l'air sur un système spécifique. Deux types de prélèvement d'air ont été réalisés :

- sur adsorbant Tenax TA selon les conditions de la norme NF ISO 16000-6 pour la

- mesure des COV
- sur cartouche de gel de silice imprégné de DNPH (2,4-dinitrophénylhydrazine) selon les conditions de la norme NF ISO 16000-3 pour la mesure des composés carbonylés de faible poids moléculaire

Les substances volatiles suivantes ont été systématiquement recherchées :

- Formaldéhyde (numéro CAS 50-00-0)
- Acétaldéhyde (numéro CAS 75-07-0)
- Toluène (numéro CAS 108-88-3)
- Tétrachloroéthylène (numéro CAS 127-18-4)
- Xylène (numéro CAS 1330-20-7)
- 1,2,4-Triméthylbenzène (numéro CAS 95-63-6)
- 1,4-Dichlorobenzène (numéro CAS 106-46-7)
- Éthylbenzène (numéro CAS 100-41-4)
- 2-Butoxyéthanol (numéro CAS 111-76-2)
- Styrène (numéro CAS 100-42-5)
- Composés organiques volatils totaux (COVT)
- Alpha-pinène (numéro CAS 80-56-8)
- Hexanal (numéro CAS 66-25-1)
- Acide acétique (numéro CAS 64-19-7)

Les méthodes de mesure utilisées sont les suivantes :

- Analyse des COV par TD/GC/MS/FID

Les substances volatiles sont analysées par désorption thermique (TD), chromatographie en phase gazeuse (GC), identification par spectrométrie de masse (MS) et quantification par ionisation de flamme (FID) selon la norme NF ISO 16000-6.

La concentration totale en COV (COVT) est fournie comme la somme des concentrations de tous les composés quantifiables. Cette valeur en COVT correspond aux composés élués sur une colonne de chromatographie gazeuse apolaire (méthylsilicone avec 5 % de phénylsilicone), dans une gamme de temps de rétention comprise entre le n-hexane et le n-hexadécane (inclus).

- Analyse des composés carbonylés de faible poids moléculaire par HPLC/UV

Les cartouches de gel de silice imprégné de DNPH sont éluées par 5 ml d'acétonitrile. Après élution des cartouches d'adsorbant, les composés carbonylés de faible poids moléculaire

sont analysés par chromatographie liquide haute performance (HPLC) avec détection UV selon la norme NF ISO 16000-3.

Les résultats sont exprimés en facteurs d'émission (SER). Ils sont calculés selon la formule :
 $SER = C \times q_{\text{essai}}$

avec :

SER : facteur d'émission spécifique en $\mu\text{g}/(\text{m}^2.\text{h})$

q_{essai} : débit d'air spécifique au moment de l'essai en $\text{m}^3/(\text{m}^2.\text{h})$

C : concentration expérimentale dans l'air de la chambre de test en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Légende :

ND : non détecté

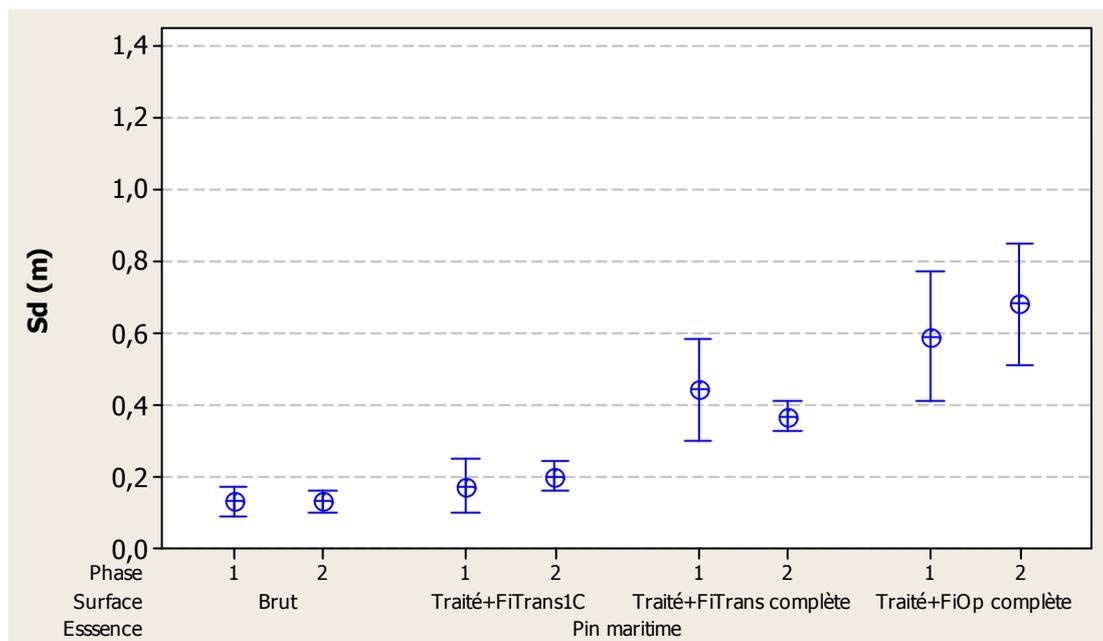
NQ : détecté mais non quantifié (limite de quantification de $2 \mu\text{g}/(\text{m}^2.\text{h})$)

3.4.4 Résultats

3.4.4.1 Cas de la Menuiserie 1

La Figure 20 montre l'épaisseur d'air équivalent pour la diffusion de la vapeur d'eau (Sd) obtenue lors de la deuxième campagne d'essai (Phase 2) et la compare à celle obtenue lors de la première campagne (phase 1).

Globalement les deux campagnes d'essai donnent des résultats similaires pour chaque cas de figure étudié.



Légende :

- Brut : Pin maritime sans aucun traitement
- Traité+FiTrans1C : Pin maritime traité préservation + Finition transparente 1 couche
- Traité+FiTrans complète : Pin maritime traité préservation + Finition transparente complète
- Traité+FiOp complète : Pin maritime traité préservation + Finition complète opaque

Figure 20: Comparaison de l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur d'eau (Sd) des différents échantillons de pin maritime testés dans les phases 1 et 2 (moyenne et intervalle de confiance 95%)

Le Tableau 24, Tableau 25, Tableau 26, Tableau 27 reprennent les facteurs d'émission (SER) en substances volatiles mesurés après 3, 7 et 28 jours de conditionnement des carrelets en chambre de test.

Légende :

- ND : non détecté
- NQ : détecté mais non quantifié (limite de quantification de 2 µg/(m².h))

Echantillon	Type A – Menuiserie 1			
Composition	Pin maritime nu			
Substance volatile	N° CAS	3 jours	7 jours	28 jours
Formaldéhyde	50-00-0	29	24	15
Acétaldéhyde	75-07-0	35	26	15
Tétrachloroéthylène	127-18-4	ND	ND	ND
Toluène	108-88-3	6,2	NQ	ND
Ethylbenzène	100-41-4	ND	ND	ND
1,2,4-Triméthylbenzène	95-63-6	ND	ND	ND
Xylène	1330-20-7	ND	ND	ND
1,4-Dichlorobenzène	106-46-7	ND	ND	ND
Styrène	100-42-5	ND	ND	ND
2-Butoxyéthanol	111-76-2	ND	ND	ND
COVT	-	305	277	187
Alpha-pinène	80-56-8	5,0	5,6	2,7
Hexanal	66-25-1	57	55	15
Acide acétique	64-19-7	570	686	356

Tableau 24: Facteurs d'émission ($\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) en substances volatiles émises par l'échantillon Type A-Menuiserie 1 après 3, 7 et 28 jours en chambre de test

Echantillon	Type C- Menuiserie 1			
Composition	Pin maritime traité + finition complète opaque			
Substance volatile	N° CAS	3 jours	7 jours	28 jours
Formaldéhyde	50-00-0	2,0	1,5	1,6
Acétaldéhyde	75-07-0	11	12	13
Tétrachloroéthylène	127-18-4	ND	ND	ND
Toluène	108-88-3	7,4	6,5	5,6
Ethylbenzène	100-41-4	ND	ND	ND
1,2,4-Triméthylbenzène	95-63-6	21	9,9	NQ
Xylène	1330-20-7	ND	ND	ND
1,4-Dichlorobenzène	106-46-7	ND	ND	ND
Styrène	100-42-5	ND	ND	ND
2-Butoxyéthanol	111-76-2	67	46	23
COVT	-	1944	1053	423
Alpha-pinène	80-56-8	3,1	2,4	NQ
Hexanal	66-25-1	6,4	7,1	12
Acide acétique	64-19-7	108	168	137

Tableau 25: Facteurs d'émission ($\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) en substances volatiles émises par l'échantillon Type C-Menuiserie 1 après 3, 7 et 28 jours en chambre de test

Echantillon	Type D – Menuiserie 1			
Composition	Pin maritime traité + finition complète transparente			
Substance volatile	N° CAS	3 jours	7 jours	28 jours
Formaldéhyde	50-00-0	2,9	2,5	3,1
Acétaldéhyde	75-07-0	18	19	19
Tétrachloroéthylène	127-18-4	ND	ND	ND
Toluène	108-88-3	4,4	2,6	NQ
Ethylbenzène	100-41-4	ND	ND	ND
1,2,4-Triméthylbenzène	95-63-6	ND	ND	ND
Xylène	1330-20-7	ND	ND	ND
1,4-Dichlorobenzène	106-46-7	ND	ND	ND
Styrène	100-42-5	ND	ND	ND
2-Butoxyéthanol	111-76-2	142	72	27
COVT	-	2246	1105	413
Alpha-pinène	80-56-8	7,5	8,5	7,7
Hexanal	66-25-1	13	17	26
Acide acétique	64-19-7	120	168	110

Tableau 26: Facteurs d'émission ($\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) en substances volatiles émises par l'échantillon Type D-Menuiserie 1 après 3, 7 et 28 jours en chambre de test

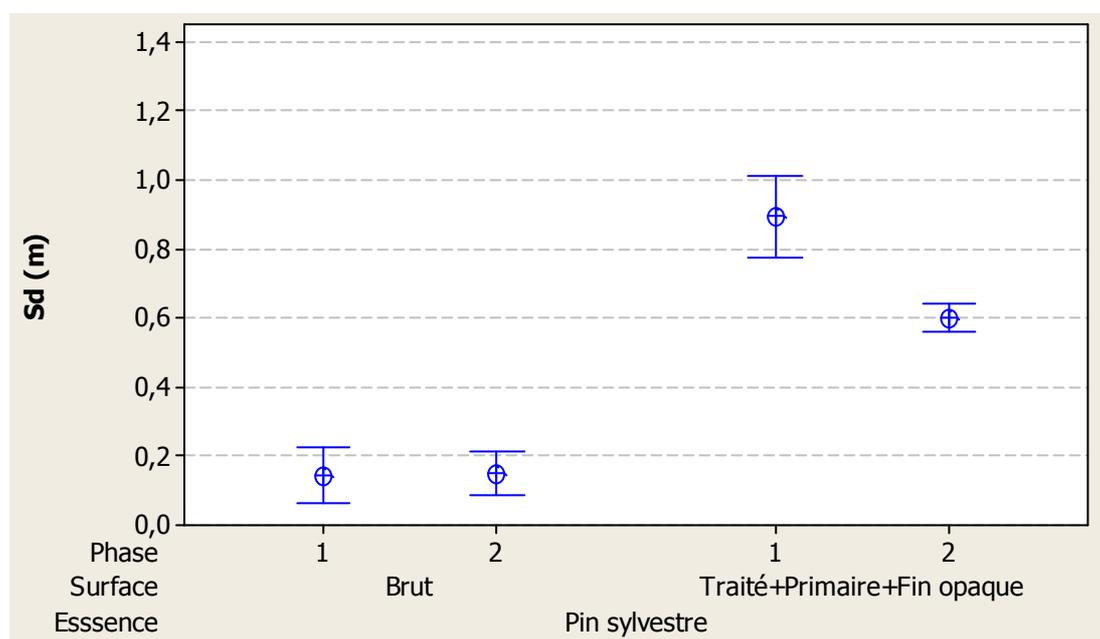
Echantillon	Type E – Menuiserie 1			
Composition	Pin maritime traité + 1 seule couche de finition complète transparente			
Substance volatile	N° CAS	3 jours	7 jours	28 jours
Formaldéhyde	50-00-0	4,3	4,0	4,1
Acétaldéhyde	75-07-0	26	25	20
Tétrachloroéthylène	127-18-4	ND	ND	ND
Toluène	108-88-3	5,8	2,9	NQ
Ethylbenzène	100-41-4	ND	ND	ND
1,2,4-Triméthylbenzène	95-63-6	ND	ND	ND
Xylène	1330-20-7	ND	ND	ND
1,4-Dichlorobenzène	106-46-7	ND	ND	ND
Styrène	100-42-5	ND	ND	ND
2-Butoxyéthanol	111-76-2	95	48	19
COVT	-	1486	847	436
Alpha-pinène	80-56-8	3,5	3,1	2,8
Hexanal	66-25-1	36	38	41
Acide acétique	64-19-7	169	127	113

Tableau 27: Facteurs d'émission ($\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$) en substances volatiles émises par l'échantillon Type E-Menuiserie 1 après 3, 7 et 28 jours en chambre de test

3.4.4.2 Cas de la Menuiserie 2

La Figure 21 montre l'épaisseur d'air équivalent pour la diffusion de la vapeur d'eau obtenue lors de la deuxième campagne d'essai (Phase 2) et la compare à celle obtenue lors de la première campagne (phase 1).

Pour le bois revêtu de finition, la deuxième campagne aboutit à un Sd légèrement plus faible que la première phase, ce qui peut s'expliquer par des grammages déposés différents lors des deux campagnes voire une variabilité du bois.



Légende :

Brut : Pin sylvestre sans aucun traitement

Traité+Primaire+Fin opaque : pin sylvestre traité préservation recouvert d'un système complet de finition opaque

Figure 21: Comparaison de l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de la vapeur d'eau (Sd) des différents échantillons de pin sylvestre testés dans les phases 1 et 2 (moyenne et intervalle de confiance 95%)

Le Tableau 28 et Tableau 29 reprennent les facteurs d'émission (SER) en substances volatiles mesurés après 3, 7 et 28 jours de conditionnement des carrelets en chambre de test.

Légende :

ND : non détecté

NQ : détecté mais non quantifié (limite de quantification de 2 µg/(m².h))

Echantillon	Support A – Menuiserie 2			
Composition	Pin sylvestre nu			
Substance volatile	N° CAS	3 jours	7 jours	28 jours
Formaldéhyde	50-00-0	11	8,0	6,0
Acétaldéhyde	75-07-0	27	18	12
Tétrachloroéthylène	127-18-4	ND	ND	ND
Toluène	108-88-3	8,5	5,5	3,0
Ethylbenzène	100-41-4	ND	ND	ND
1,2,4-Triméthylbenzène	95-63-6	ND	ND	ND
Xylène	1330-20-7	ND	ND	ND
1,4-Dichlorobenzène	106-46-7	ND	ND	ND
Styrène	100-42-5	ND	ND	ND
2-Butoxyéthanol	111-76-2	ND	ND	ND
COVT	-	2494	1500	1162
Alpha-pinène	80-56-8	1042	549	472
Hexanal	66-25-1	181	144	97
Acide acétique	64-19-7	120	59	56

Tableau 28: Facteurs d'émission ($\mu\text{g}/(\text{m}^2.\text{h})$) en substances volatiles émises par l'échantillon Type A-Menuiserie 2 après 3, 7 et 28 jours en chambre de test

Echantillon	Support D – Menuiserie 2			
Composition	Pin sylvestre traité et recouvert d'un primaire opaque et d'une finition opaque			
Substance volatile	N° CAS	3 jours	7 jours	28 jours
Formaldéhyde	50-00-0	2,6	1,7	1,6
Acétaldéhyde	75-07-0	38	28	18
Tétrachloroéthylène	127-18-4	ND	ND	ND
Toluène	108-88-3	6,5	4,9	2,4
Ethylbenzène	100-41-4	ND	ND	ND
1,2,4-Triméthylbenzène	95-63-6	ND	ND	ND
Xylène	1330-20-7	ND	ND	ND
1,4-Dichlorobenzène	106-46-7	ND	ND	ND
Styrène	100-42-5	ND	ND	ND
2-Butoxyéthanol	111-76-2	12	6,5	2,7
COVT	-	1480	880	489
Alpha-pinène	80-56-8	427	227	183
Hexanal	66-25-1	50	42	29
Acide acétique	64-19-7	48	29	31

Tableau 29: Facteurs d'émission ($\mu\text{g}/(\text{m}^2.\text{h})$) en substances volatiles émises par l'échantillon Type D-Menuiserie 2 après 3, 7 et 28 jours en chambre de test

3.4.4.3 Comparaison des émissions - effets barrière des finitions

Les figures ci-dessous comparent les variations des facteurs d'émissions des différentes substances. A noter cependant que des échelles différentes ont volontairement été utilisées selon les composés analysés.

Les légendes suivantes ont été adoptées:

PinS nu : Pin sylvestre sans aucun traitement
PinSt+FiOp : Pin sylvestre traité préservation + finition complète opaque
PinM nu : pin maritime sans aucun traitement
PinMt+FiOp : Pin maritime traité préservation + Finition complète opaque
PinMt+FiT 1c : Pin maritime traité préservation + Finition transparente 1 couche
PinMt+FiT : Pin maritime traité préservation + Finition complète transparente

3.4.4.3.1 Formaldéhyde

La Figure 22 compare les variations du facteur d'émission du formaldéhyde au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries.

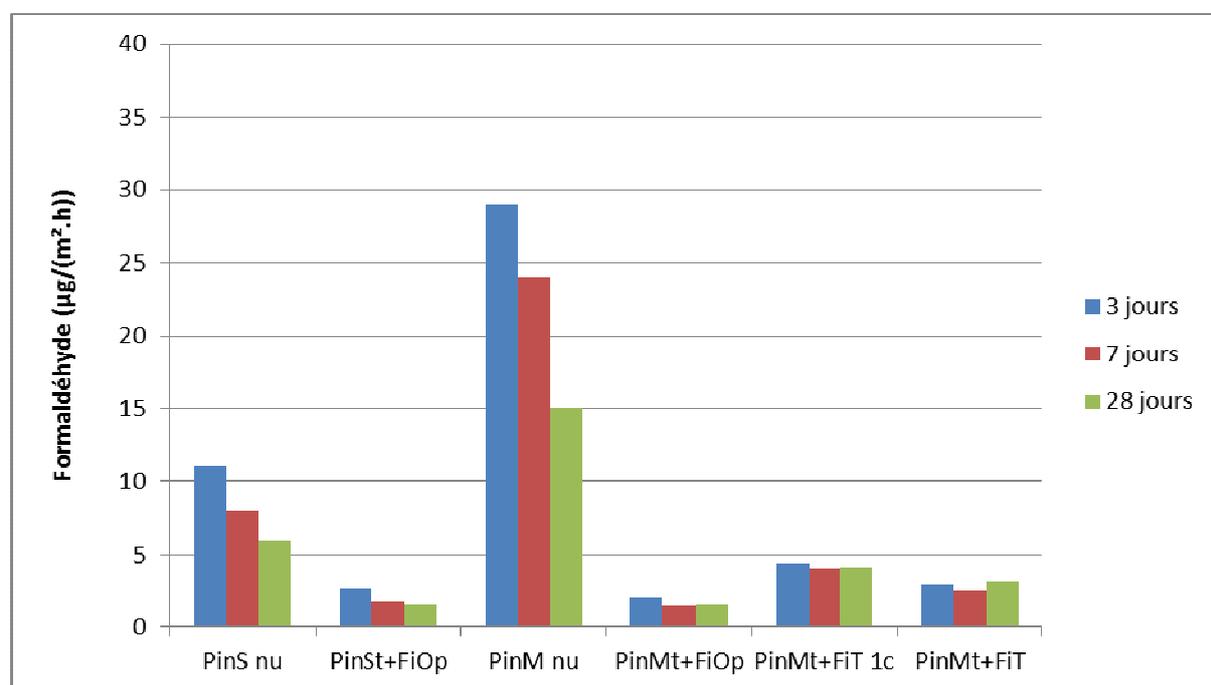


Figure 22: variations du facteur d'émission du formaldéhyde au cours du temps pour les différents échantillons testés

La figure montre clairement que le facteur d'émission du formaldéhyde est le plus élevé pour les deux essences de bois (pin sylvestre et pin maritime) sans aucun traitement de préservation ni finition.

Le pin maritime fourni se distingue en présentant des facteurs d'émission de formaldéhyde 2.5 fois plus élevé que le pin sylvestre. Pour les deux essences, **l'application d'une finition permet clairement de réduire le facteur d'émission de formaldéhyde**. Même appliquée en une seule couche (cas de la finition transparente), la finition permet une réduction de 85% du facteur d'émission à 3 jours (73% à 28 jours). Les finitions complètes utilisées permettent, à 3 jours, une réduction de 76% dans le cas du pin sylvestre, et de 90% dans le cas du pin maritime. Après 28 jours, ces réductions apportées par le système de finition sont de 73% pour le pin sylvestre et de 79% pour le pin maritime.

3.4.4.3.2 Acétaldéhyde

La Figure 23 compare les variations du facteur d'émission de l'acétaldéhyde au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries.

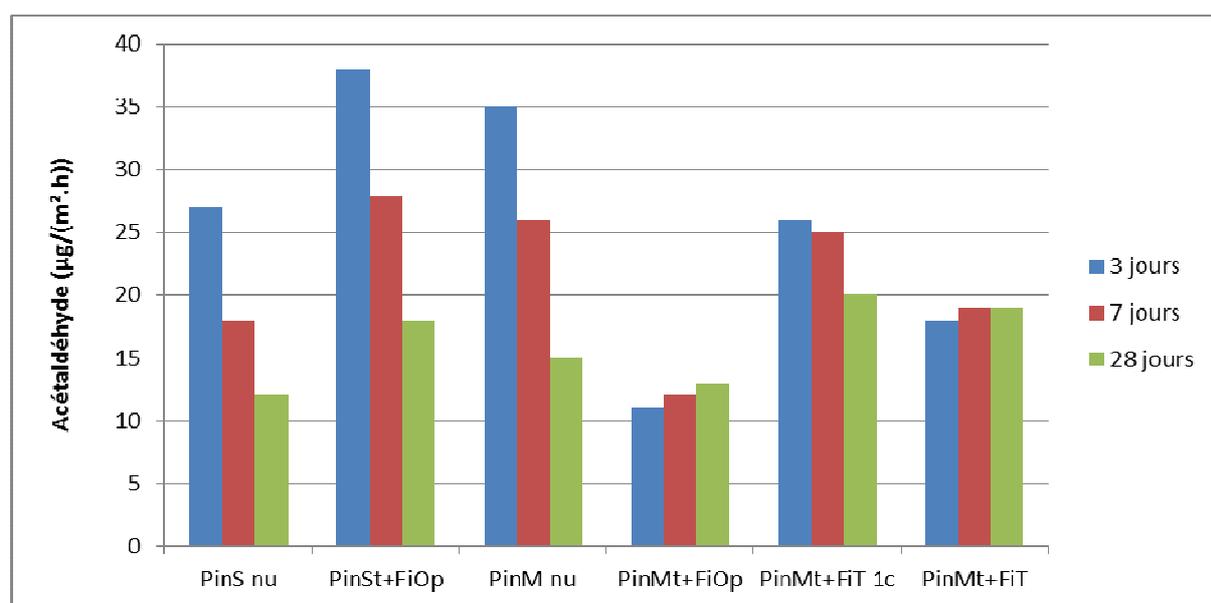


Figure 23: variations du facteur d'émission de l'acétaldéhyde au cours du temps pour les différents échantillons testés

La figure montre des tendances différentes selon l'essence considérée et les produits de finition utilisés.

Sur pin sylvestre nu, le facteur d'émission de l'acétaldéhyde diminue d'un peu plus de la moitié au cours du temps. Par rapport au bois nu, l'utilisation de la finition opaque accentue le facteur d'émission de 41% dès 3 jours. Après 28 jours, l'augmentation d'émission générée par la finition est de 50%

Le pin maritime montre un facteur d'émission de l'acétaldéhyde plus élevé que le pin sylvestre nu. A 3 jours, il est plus élevé de 30%.

L'effet barrière à l'émission d'acétaldéhyde sur pin maritime dépend de la finition utilisée. La finition opaque conduit à une nette réduction de 69% de l'émission à 3 jours. Cette réduction diminue au cours du temps et après 28 jours elle est de 13% par rapport à l'émission du pin maritime nu à cette même durée d'exposition.

Après 3 jours d'exposition, l'application d'une finition transparente conduit à une réduction du facteur d'émission de l'acétaldéhyde de 26 % lorsqu'appliquée en une couche, et de 49% lorsqu'il s'agit d'une finition complète. Après 28 jours, comparativement au pin maritime nu à cette même durée, la finition transparente montre un facteur d'émission plus important de l'ordre de 30% dans les deux cas étudiés (complète, 1 couche).

3.4.4.3.3 Toluène

La Figure 24 compare les variations du facteur d'émission du toluène au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries. Elle montre que dans tous les cas, les valeurs sont faibles comparées à celles obtenues pour le formaldéhyde et l'acétaldéhyde.

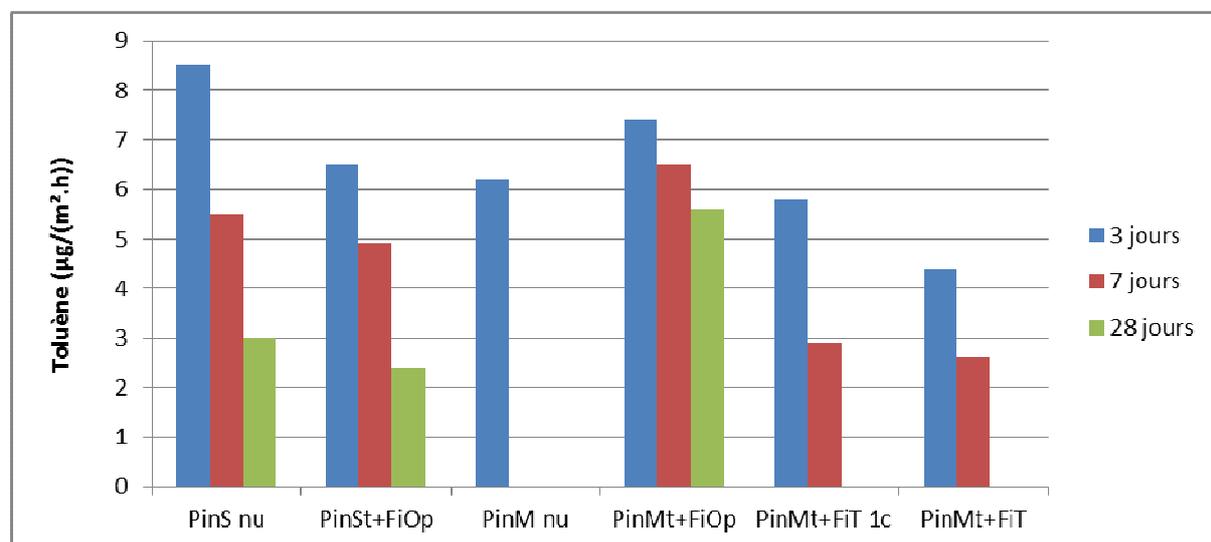


Figure 24: variations du facteur d'émission du toluène au cours du temps pour les différents échantillons testés

La figure montre qu'après 3 jours en chambre, c'est le pin sylvestre nu qui présente le facteur d'émission du toluène le plus important parmi les cas étudiés. Il diminue cependant de près de 65 % après 28 jours. Sur pin maritime nu, ce facteur d'émission est moins élevé et n'est plus détecté au bout de 28 jours.

L'application de la finition opaque sur pin sylvestre (Menuiserie 2) conduit à un léger effet barrière (20% après 28 jours).

La finition opaque utilisée par la Menuiserie 1 sur pin maritime conduit par contre à une augmentation du facteur d'émission du toluène, ce composé étant encore détecté après 28 jours alors qu'il ne l'était plus sur le pin maritime nu.

Après 3 jours, la finition transparente complète présente un effet barrière à l'émission de toluène de 29% par rapport au pin maritime nu. Après 7 jours, le toluène est toujours observé mais à une quantité très faible, proche de la limite de détection ($2 \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$). Il n'est plus présent après 28 jours.

3.4.4.3.4 1,2,4-triméthylbenzène

La Figure 25 compare les variations du facteur d'émission du 1,2,4-Triméthylbenzène au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries. Elle montre qu'aucune des deux essences étudiées n'a montré d'émission de ce composé. Seule l'application de la finition opaque complète sur pin maritime (Menuiserie 1) génère une émission de ce composé qui diminue de 50% après 7 jours et n'est plus quantifiable après 28 jours.

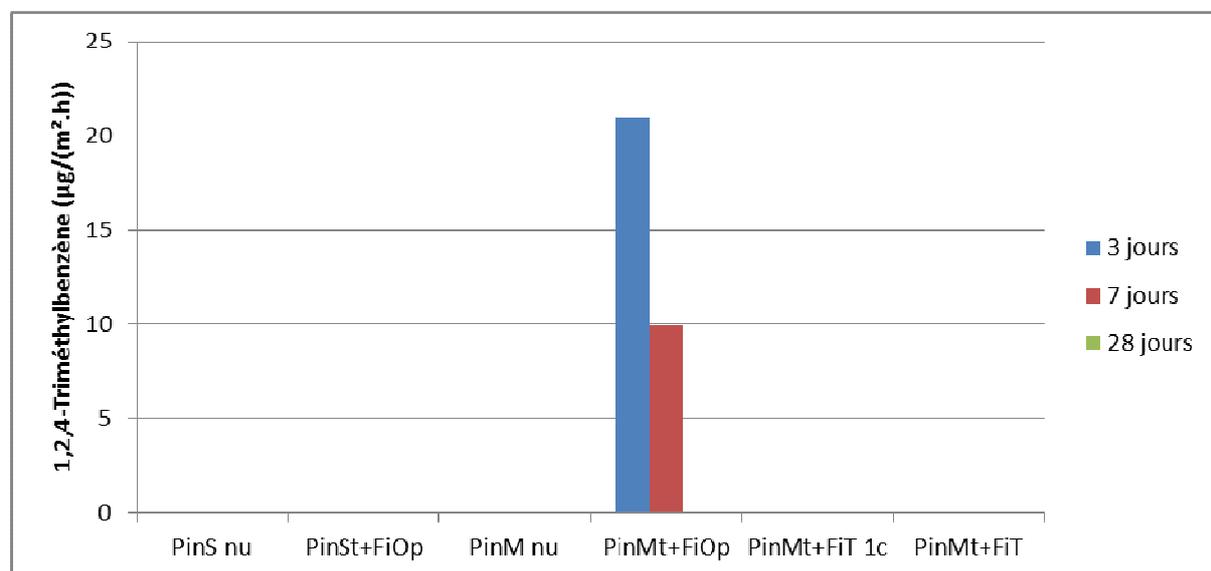


Figure 25: variations du facteur d'émission du 1,2,4 -Triméthylbenzène au cours du temps pour les différents échantillons testés.

3.4.4.3.5 2-Butoxyéthanol

La Figure 26 compare les variations du facteur d'émission du 2-Butoxyéthanol au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries.

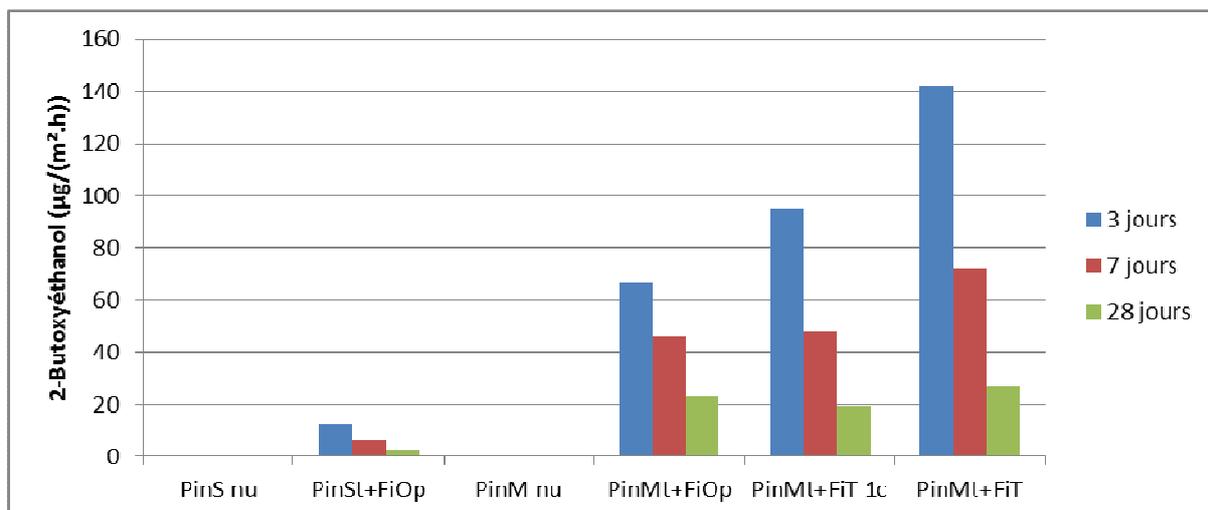


Figure 26: variations du facteur d'émission du 2-Butoxyéthanol au cours du temps pour les différents échantillons testés

La figure montre qu'aucune des deux essences nues testées n'émettent pas de 2-Butoxyéthanol.

Dans le cas de la Menuiserie 2 (pin sylvestre), l'application de la finition opaque conduit à une très faible émission de 2-Butoxyéthanol qui après 28 jours est proche de la limite de quantification.

Les finitions utilisées par la Menuiserie 1 (pin maritime) conduisent à une émission de 2-Butoxyéthanol, particulièrement marqué pour la finition transparente. Celle-ci conduit à un facteur d'émission d'un peu plus du double de celui obtenu avec la finition opaque. Après 28 jours, les facteurs d'émissions sont cependant assez voisins.

3.4.4.3.6 COV totaux

La Figure 27 compare les variations du facteur d'émission des COV totaux au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries.

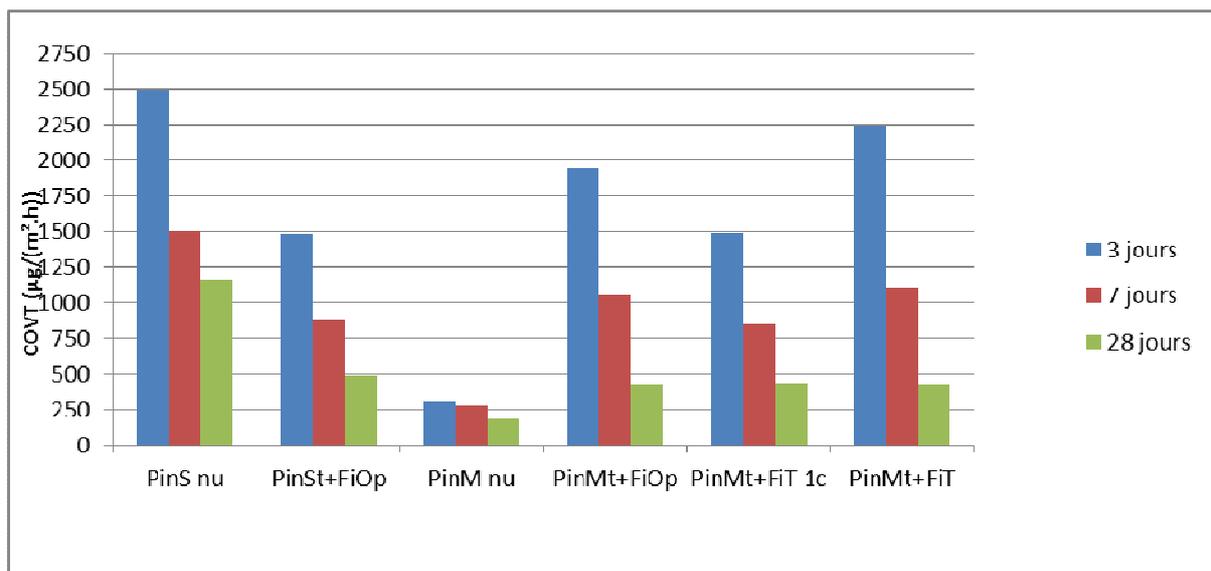


Figure 27: variations du facteur d'émission des COV totaux au cours du temps pour les différents échantillons testés

Parmi toutes les configurations testées, la figure montre que c'est le pin sylvestre nu qui présente le facteur d'émission des COV totaux le plus important quelle que soit la durée considérée (3 jours, 7 jours et 28 jours). Après 28 jours, le facteur d'émission des COV totaux du pin sylvestre nu est de 1162 µg/(m².h).

L'application de la finition opaque sur pin sylvestre (Menuiserie 2) permet un abattement clair des COV. Cet abattement est de 58% après 28 jours.

Sur pin maritime, le facteur d'émission des COV totaux s'est montré particulièrement bas (187 µg/(m².h) après 28 jours). Les finitions utilisées sur cette essence avec les conditions d'application associées conduisent toutes à une augmentation des COV totaux par rapport à l'essence nue. Après 28 jours, le facteur d'émission des COV totaux est comparable pour la finition opaque et la finition transparente (complète ou 1 couche) et se situe aux alentours de 400 µg/(m².h).

3.4.4.3.7 Alpha-pinène

La Figure 28 compare les variations du facteur d'émission de l'alpha-pinène au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries.

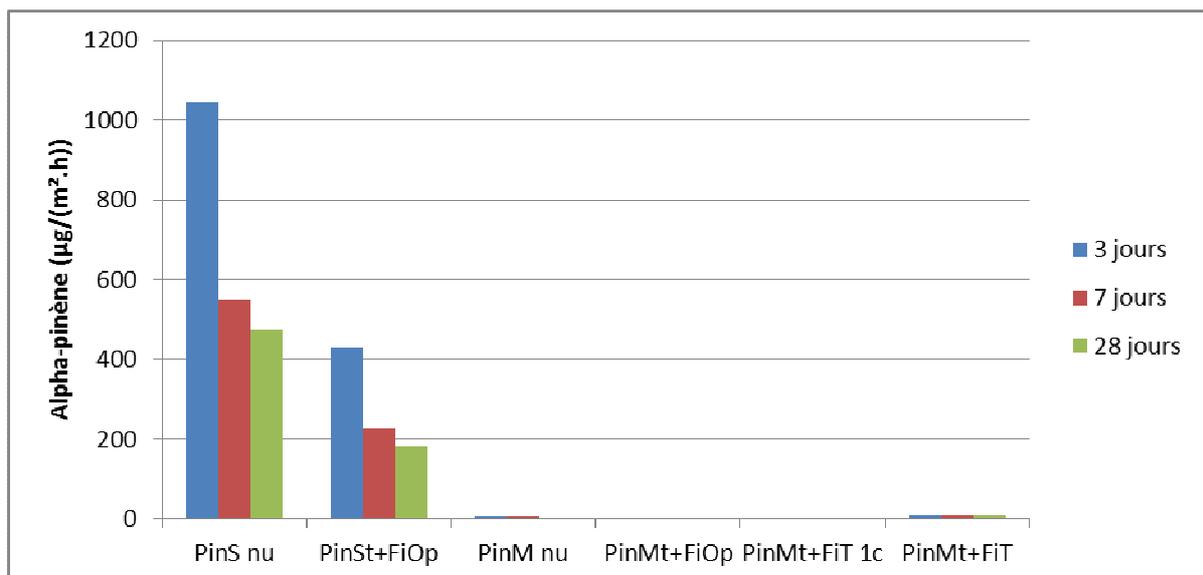


Figure 28: variations du facteur d'émission de l'alpha-pinène au cours du temps pour les différents échantillons testés

La figure montre un fort facteur d'émission de l'alpha-pinène pour le pin sylvestre nu (1042 µg/(m².h) à 3 jours). Il chute cependant de moitié dès 7 jours, puis plus lentement après 28 jours (472 µg/(m².h)). L'application de la finition opaque utilisée par la Menuiserie 2 conduit à un net effet barrière vis-à-vis de l'alpha-pinène. La finition permet une réduction d'environ 60% du facteur d'émission.

Dans le cas du pin maritime, le facteur d'émission de l'alpha-pinène est très faible (<10 µg/(m².h)) que le support soit revêtu de finition ou nu.

3.4.4.3.8 Hexanal

La Figure 29 compare les variations du facteur d'émission de l'hexanal au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries.

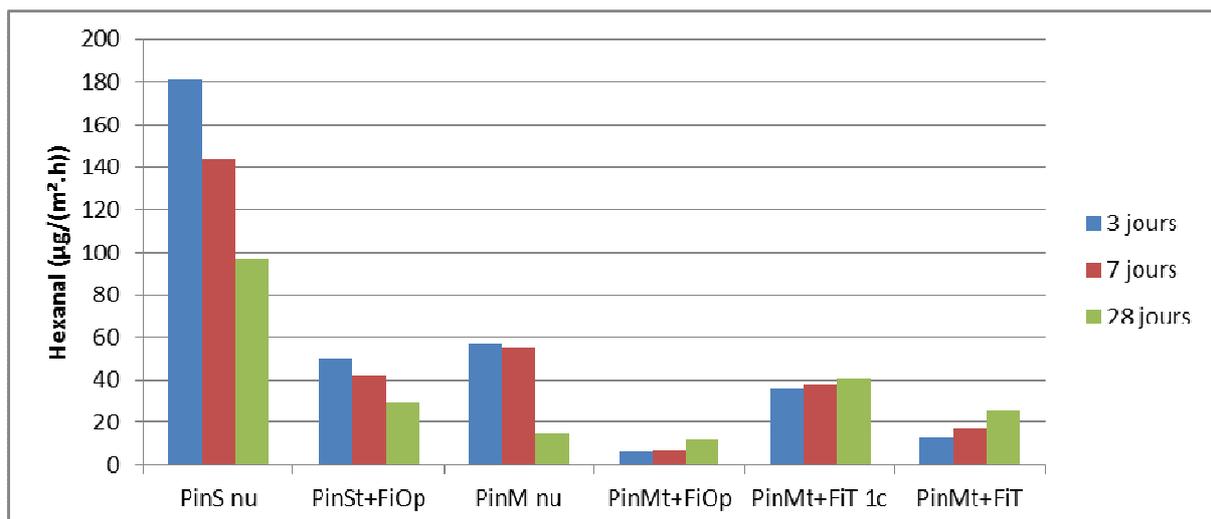


Figure 29: variations du facteur d'émission de l'hexanal au cours du temps pour les différents échantillons testés

Cette figure montre que, parmi les configurations étudiées, c'est le pin sylvestre nu qui émet le plus d'hexanal (environ 180 µg/(m².h)). Même si le facteur d'émission chute de moitié après 28 jours, il reste supérieur à celui des autres configurations étudiées. L'utilisation de la finition opaque permet une nette réduction du facteur d'émission. Après 28 jours la finition permet de diminuer l'émission de 70%.

L'émission d'hexanal a été moindre pour le pin maritime nu. Pour cette essence, le facteur d'émission était proche de 60 µg/(m².h) à 3 jours pour atteindre 15 µg/(m².h) à 28 jours. La finition opaque utilisée par la Menuiserie 1 (pin maritime) constitue une barrière à l'émission de cet aldéhyde puisqu'elle réduit de près de 90% le facteur d'émission à 3 jours. Cependant après 28 jours, la réduction n'est plus que de 20%. Comparativement l'effet barrière constitué par la finition transparente est moindre.

L'hexanal n'est pas connu pour entrer dans la constitution initiale des peintures et l'examen des fiches techniques disponibles n'a pas permis de détecter sa présence. Par contre, pour une surface peinte, les émissions des aldéhydes et notamment de l'hexanal peuvent être liées à l'oxydation par l'oxygène de l'air des esters d'acide gras insaturés présents dans les peintures lors de la période de séchage. Des travaux menés par Chang et Guo sur trois peintures alkydes ont effectivement montré une émission d'hexanal au cours du temps⁴².

L'émission d'hexanal peut donc survenir avec l'utilisation de peintures alkydes ou d'autres composés d'origine végétale (huile de lin riche en acides oléique et linoléique).

Dans le cas de notre étude, la fiche technique de la finition opaque utilisée sur pin maritime (Menuiserie 1) mentionne que la résine utilisée est une combinaison d'acrylique et d'alkyde. La présence d'alkyde peut donc expliquer l'augmentation du facteur d'émission de l'hexanal au cours du temps. Les fiches techniques du primaire transparent et de la finition

transparente utilisée par la Menuiserie 1 n'ont pas permis de mettre en évidence l'éventuelle présence d'alkyde ou huile dans les produits liquides.

3.4.4.3.9 Acide acétique

La Figure 30 compare les variations du facteur d'émission de l'acide acétique au cours du temps pour les différents échantillons étudiés issus des deux fabricants de menuiseries.

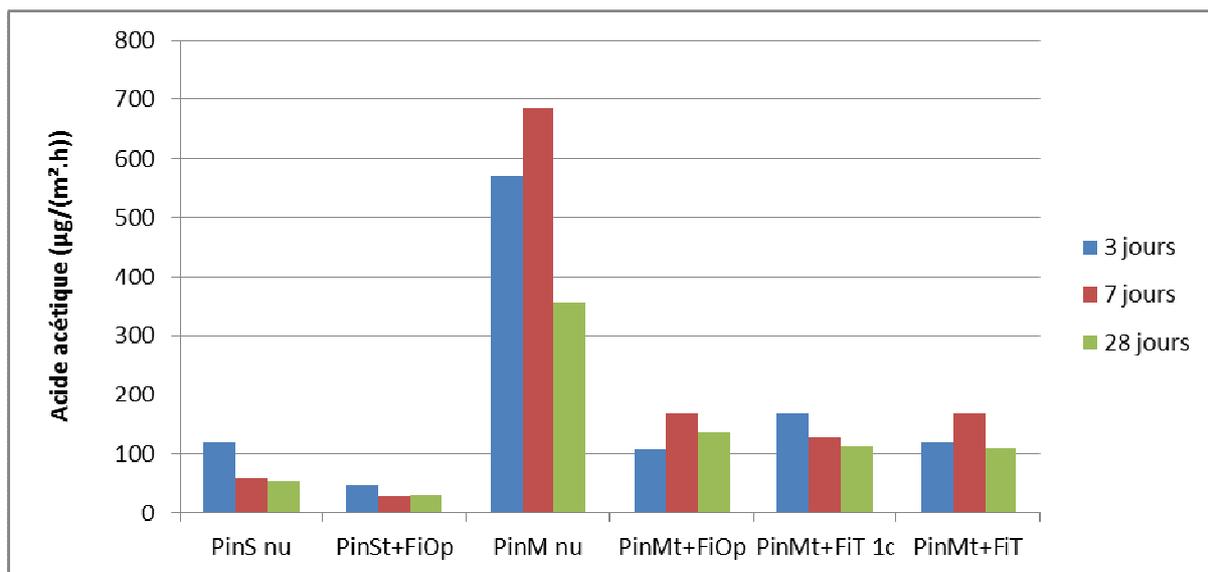


Figure 30: variations du facteur d'émission de l'acide acétique au cours du temps pour les différents échantillons testés

La figure montre que le facteur d'émission de l'acide acétique est plus élevé pour le pin maritime. A 28 jours il est environ 6 fois plus élevé que celui du pin sylvestre.

L'application de la finition opaque utilisée par la Menuiserie 2 sur le pin sylvestre permet une réduction du facteur d'émission à 28 jours de 45%.

Sur pin maritime, la finition opaque utilisée par la Menuiserie 1 permet, à 28 jours, une réduction de 62% du facteur d'émission de l'acide acétique. La finition transparente permet une réduction de presque 70%.

3.4.4.4 Relation Sd et émissions de COV

La question qui se posait durant cette étude était de savoir si la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau de la finition (détermination de Sd) pouvait être prédictive de l'effet barrière aux émissions de COV.

Les mesures de Sd des surfaces étudiées ont donc été mises en regard des facteurs d'émission des différents composés.

La Figure 31 montre que l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur d'eau (Sd) et le facteur d'émission du formaldéhyde sont liés pour les configurations étudiées. Plus Sd est grand, plus le facteur d'émission du formaldéhyde est faible. En d'autres termes, plus le revêtement est imperméable à la vapeur d'eau, plus l'effet barrière à l'émission de formaldéhyde du support revêtu est grand.

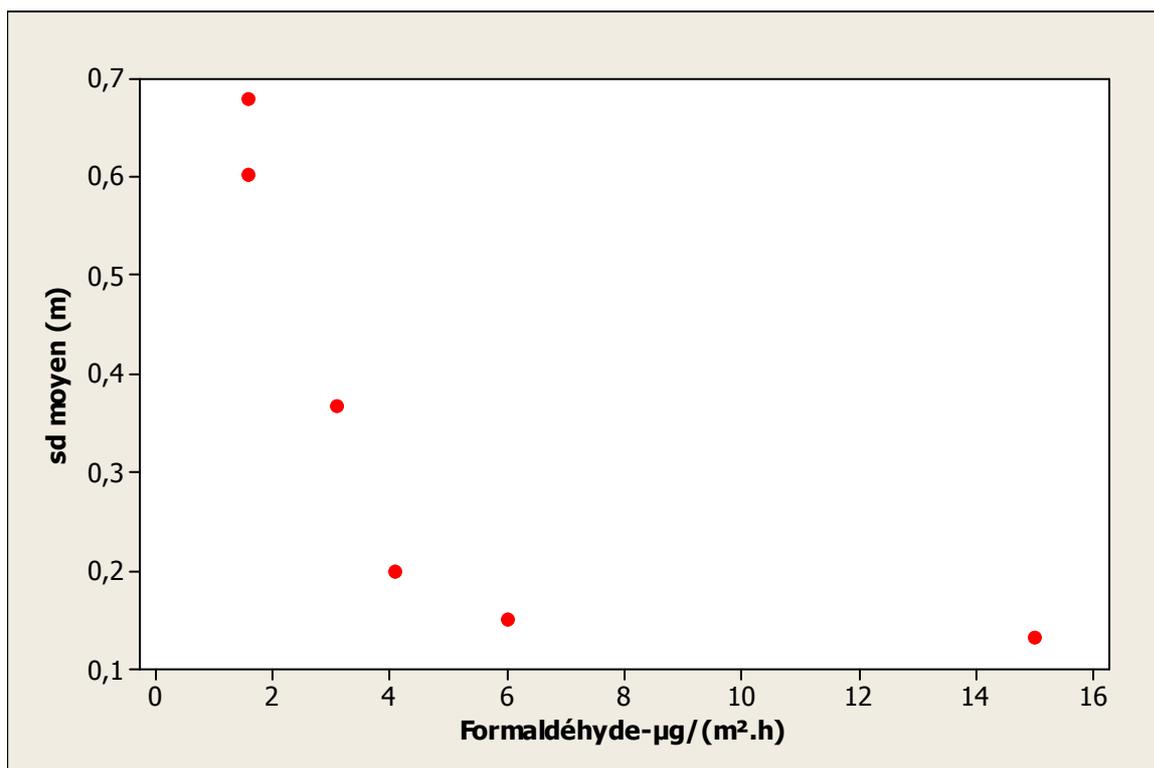


Figure 31: Relation Sd-facteur d'émission de formaldéhyde

Il n'a pas été trouvé de relation entre Sd et le facteur d'émission des autres composés volatils, comme le montre, à titre d'exemple, la Figure 32 pour le facteur d'émission des COV totaux.

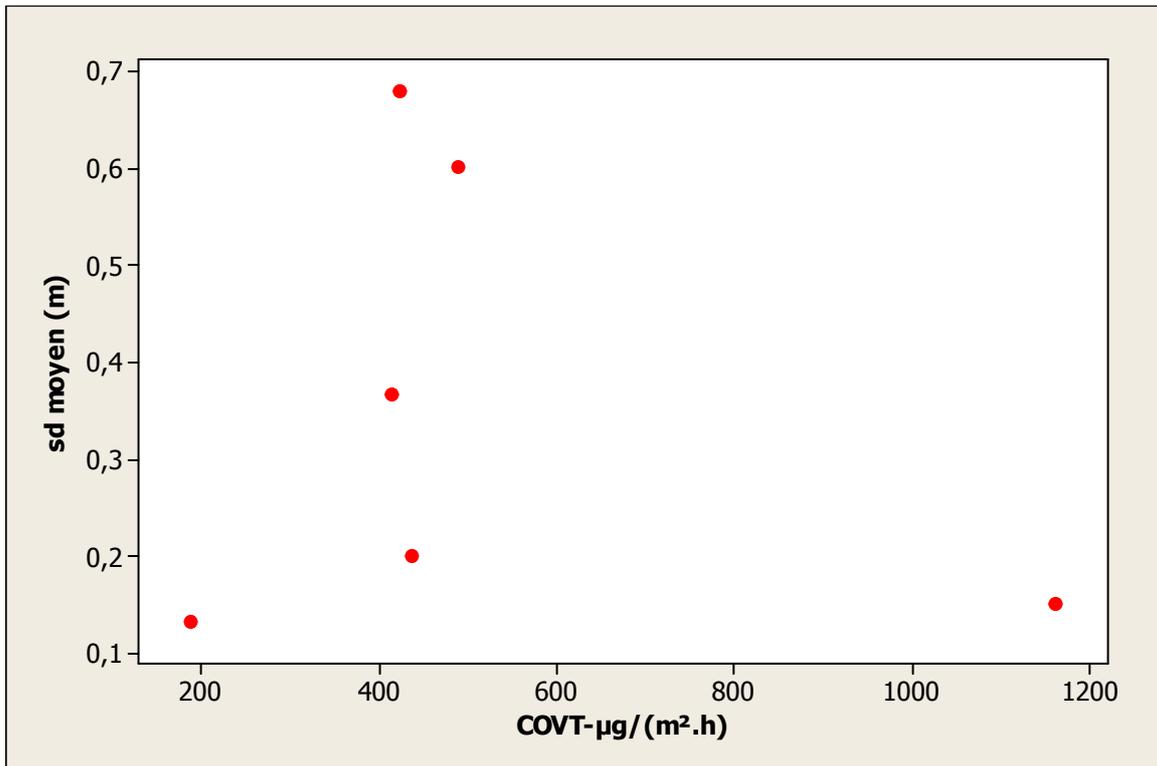


Figure 32: Sd versus facteur d'émission des COV totaux

4 Conclusions générales

L'objectif de cette étude était d'étudier l'effet barrière au formaldéhyde des finitions rencontrées dans le secteur de la menuiserie extérieure (porte d'entrée, fenêtre).

L'étude bibliographique montre qu'en France la protection du bois en extérieur, et en particulier pour la menuiserie est principalement assurée par des produits en phase solvant (alkydes, alkydes uréthanes), des produits en phase aqueuse (acryliques, alkydes modifiées, acryliques uréthanes). Le secteur industriel utilise une majorité de produits en phase aqueuse.

D'après l'étude bibliographique, appliquer une finition est une voie pour limiter les émissions de COV des panneaux de particules et MDF. En particulier les études s'accordent pour conclure que les revêtements à séchage UV sont des barrières efficaces, encore faut-il qu'ils soient correctement polymérisés sous risque de produire l'effet inverse.

Les finitions poudre époxy sont plusieurs fois citées comme barrière très efficace. Cependant ce type de finition n'est pas compatible avec un emploi de type menuiserie extérieure.

L'étude bibliographique montre que des revêtements actifs (revêtements photocatalytiques) sont en développement dans certains secteurs mais l'utilisation de nano-particules est sujette à controverse sur le plan sanitaire et environnemental. De plus ces revêtements peuvent aboutir à la formation de sous-produits encore plus toxiques que les COV initiaux.

Différentes références bibliographiques montrent que l'effet barrière d'une peinture alkyde est supérieur à celui d'une peinture acrylique. Les revêtements alkydes sont aussi connus pour leur effet barrière à l'eau plus important que celui des acryliques (cf .étude CODIFAB *Perméabilité à l'eau liquide des finitions*, 2010-2012). La question de la perméabilité à la vapeur d'eau comme indicatrice de l'effet barrière des finitions s'est donc imposée au cours de la présente étude. Il a alors été décidé, en accord avec l'UFME, de revoir le programme expérimental de l'étude afin d'inclure des mesures de perméabilité à la vapeur d'eau comme potentiellement indicatives d'effet barrière des finitions utilisées en menuiserie. La mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau présente l'avantage d'être moins longue et moins coûteuse que la mesure d'émissions de COV. De même, il a été décidé avec l'UFME de se concentrer sur les bois résineux afin de maximiser les substances émises, décision prise sur la base de l'expérience de FCBA relatives aux mesures de COV réalisées sur différentes essences de bois utilisées en menuiserie.

Pour sélectionner les systèmes à étudier, une première enquête a été réalisée par l'UFME auprès de ses adhérents. Cinq d'entre eux ont fourni des informations sur la nature des essences utilisées, ainsi que quelques informations relatives aux finitions utilisées. Cette enquête dû être complétée par une analyse des dossiers des menuisiers sous certification FCBA permettant de sélectionner deux menuiseries industrielles - Menuiserie 1 (pin maritime) et Menuiserie 2 (pin sylvestre) - travaillant des essences résineuses connues pour émettre des COV. Ces deux menuiseries ont accepté de fournir des échantillons pour une première phase de mesures de perméabilité à la vapeur d'eau. La méthode de la coupelle humide a conduit à la détermination de l'épaisseur d'air équivalente pour la diffusion de vapeur d'eau (Sd) des différents types de surface. Cette mesure a permis de différencier les surfaces testées. En particulier, que ce soit sur le pin sylvestre ou le pin maritime, le traitement de préservation n'a pas montré d'influence sur la valeur de Sd. Ce type de traitement étant très peu chargé en résine, il est compréhensible qu'il n'apporte pas d'effet barrière à la vapeur d'eau.

L'effet de la finition était par contre plus ou moins marqué selon que l'on avait affaire à un primaire ou une finition complète. Cette dernière étant plus filmogène, elle a procuré un effet barrière à la vapeur d'eau plus marqué.

A partir des résultats de Sd, de nouveaux échantillons ont été demandés aux deux menuiseries industrielles pour réaliser la phase 2. Il s'agissait alors de réaliser non seulement des mesures d'émissions de COV (3, 7 et 28 jours), mais à nouveau des mesures de perméabilité à la vapeur d'eau pour qu'elles puissent émaner du même mot de fabrication ; l'idée étant de tenter de relier les résultats de perméabilité à la vapeur d'eau avec les émissions obtenues.

Les substances volatiles recherchées ont été celles de l'arrêté du 19 avril 2011 (formaldéhyde, acétaldéhyde, toluène, tétrachloroéthylène, xylène, 1,2,4-Triméthylbenzène, 1,4-dichlorobenzène, éthylbenzène, 2-Butoxyéthanol, styrène, composés organiques volatils totaux). En plus de cette liste, des composés dits « traceurs » ont été identifiés et quantifiés parmi les autres substances volatiles émises par les carrelets : alpha-pinène, hexanal, acide acétique.

L'étude montre que **le facteur d'émission du formaldéhyde est le plus élevé pour les deux essences de bois (pin sylvestre et pin maritime) sans aucun traitement de préservation ni finition.** Le pin maritime testé se distingue particulièrement en présentant des facteurs d'émission de formaldéhyde plus élevé que le pin sylvestre. **Pour les deux essences, l'application d'une finition permet clairement de réduire de manière très significative le facteur d'émission de formaldéhyde.** Même appliquée en une seule

couche (cas de la finition transparente), la finition permet une réduction de 85% du facteur d'émission à 3 jours (73% à 28 jours). Les finitions complètes utilisées permettent, à 3 jours, une réduction de 76% dans le cas du pin sylvestre, et de 90% dans le cas du pin maritime. Après 28 jours, ces réductions apportées par le système de finition sont de 73% pour le pin sylvestre et de 79% pour le pin maritime.

Pour l'émission de COV totaux, l'application de la finition opaque sur pin sylvestre (Menuiserie 2) permet un abattement clair des COV. Cet abattement est de 58% après 28 jours.

Sur pin maritime, le facteur d'émission des COV totaux s'étant montré étonnamment bas, les finitions utilisées sur cette essence avec les conditions d'application associées conduisent toutes à une augmentation des COV totaux par rapport à l'essence nue. Après 28 jours, le facteur d'émission des COV totaux est comparable pour la finition opaque et la finition transparente (complète ou 1 couche).

Le pin sylvestre étudié a montré un fort facteur d'émission de l'alpha-pinène qui a chuté cependant de moitié dès 7 jours, puis plus lentement après 28 jours. **L'application de la finition opaque utilisée par la Menuiserie 2 sur pin sylvestre conduit à un net effet barrière vis-à-vis de l'alpha-pinène. La finition permet une réduction d'environ 60% du facteur d'émission.** Dans le cas du pin maritime, le facteur d'émission de l'alpha-pinène était très faible que le support soit revêtu de finition ou non.

Parmi les deux essences étudiées, c'est le pin sylvestre nu qui a émis le plus d'hexanal. Même si le facteur d'émission chutait de moitié après 28 jours, il est resté supérieur à celui des autres configurations étudiées. **L'utilisation de la finition opaque sur pin sylvestre a permis une nette réduction du facteur d'émission de l'hexanal (70% après 28 jours).** L'émission d'hexanal a été moindre pour le pin maritime nu. Pour cette essence, la finition opaque utilisée a constitué une barrière à l'émission de cet aldéhyde réduisant de près de 90% le facteur d'émission à 3 jours. Cependant après 28 jours, la réduction n'était plus que de 20%. Comparativement l'effet barrière constitué par la finition transparente était moindre. L'hexanal n'est pas connu pour entrer dans la constitution initiale des peintures et l'examen des fiches techniques disponibles n'a pas permis de détecter sa présence. Par contre, pour une surface peinte, les émissions des aldéhydes et notamment de l'hexanal peuvent être liées à l'oxydation par l'oxygène de l'air des esters d'acide gras insaturés présents dans les peintures lors de la période de séchage. L'émission d'hexanal peut donc survenir avec l'utilisation de peintures alkydes ou d'autres composés d'origine végétale (huile de lin riche en acides oléique et linoléique). La fiche technique de la finition opaque utilisée sur pin maritime (Menuiserie 1) mentionnait effectivement une combinaison d'acrylique et d'alkyde.

La présence d'alkyde peut donc expliquer l'augmentation du facteur d'émission de l'hexanal observée.

Le facteur d'émission de l'acide acétique s'est montré six fois plus élevé pour le pin maritime que pour le pin sylvestre. L'application de la finition opaque utilisée par la Menuiserie 2 sur le pin sylvestre a permis une **réduction du facteur d'émission de l'acide acétique** à 28 jours de 45%. Sur pin maritime, la finition opaque utilisée par la Menuiserie 1 a permis à 28 jours, une réduction de 62% tandis que la finition transparente a permis une réduction de presque 70%.

La question qui se posait durant cette étude était de savoir si la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau de la finition (détermination de Sd) pouvait être indicative de l'effet barrière aux émissions de COV. L'étude a montré que plus le système de finition avait un Sd élevé, plus le facteur d'émission du formaldéhyde est faible. **En d'autres termes, plus le revêtement est imperméable à la vapeur d'eau, plus l'effet barrière à l'émission de formaldéhyde du support revêtu est grand.** Cette conclusion devrait encourager les déterminations de la perméabilité à la vapeur d'eau des systèmes de finition. Actuellement force est de constater que les fiches techniques des produits ne donnent aucune information sur ce paramètre.

L'étude n'a par contre pas montré de lien entre Sd et le facteur d'émissions des autres composés volatils.

Bien que la finition ait, dans certains cas, conduit à une augmentation du facteur d'émission de certains COV, les valeurs des facteurs d'émissions obtenues dans cette étude classeraient les différents supports étudiés dans la catégorie A+.

5 Remerciements

Nous remercions vivement le CODIFAB (Comité professionnel de développement des industries françaises de l'ameublement et du bois) pour le financement de cette étude, ainsi que l'UFME (Union des Fabricants de Menuiseries Extérieures) pour sa participation à l'étude. L'étude n'aurait pas pu être menée sans la participation des fabricants de menuiserie que nous remercions également. Un certain nombre de collaborateurs FCBA se sont impliqués dans cette étude et nous remercions plus particulièrement : Christiane Deval, Gilles Labat, Dominique Mangin, Christophe Yrieix, Frédéric Wielezynski.

Laurence Podgorski

6 Références

- ¹ Zanetti M., Gaillard J.M., Labat G. Etude bibliographique sur les émissions de formaldéhyde des bois collés.
- ² NF EN 927-1. (2013) Peintures et vernis. Produits de peinture et systèmes de peinture pour le bois en extérieur. Partie 1 : Classification et sélection
- ³ Brock T., Groteklaes M., & Mischke P. (2002) Les matières premières. In : Manuel de technologie des peintures et vernis. Déville lès Rouen : Eurocol Editions 394 p.
- ⁴ Laout J.C. (2005) Formulation des peintures-Mise en œuvre des polymères utilisés. Technique de l'ingénieur, j2272-1-j2272-23.
- ⁵ INRS. (2005) Peinture en phase aqueuse (ou peinture à l'eau). Composition, risques toxicologiques, mesures de prévention. Paris : INRS, 13 p.
- ⁶ Podgorski L. & Merlin A. (2001) Systèmes bois-finitions extérieures. Vieillessement, comportement. In: Dirol D. & Deglise X. Durabilité des bois et problèmes associés. Paris : Hermès Science Publication, 416 p.
- ⁷ Weiss K. D. (1997). Paint and coatings: a mature industry in transition. *Progress in Polymer Science*, 22, 203-245.
- ⁸ NF EN 927-3 (2012). Produits de peinture et systèmes de peinture pour bois en extérieur. Partie 3 : Essais de vieillissement naturel.
- ⁹ Anliker R. (2009) Vernis alkydes et peintures à l'huile. Le magazine spécial 15 des peintres et vernisseurs.
- ¹⁰ Hofland A. (2012). Alkyd resins: From down and out to alive and kicking. *Progress in Organic Coatings*, 73, 274– 282.
- ¹¹ Koller A., Lauer R. & Devonport W. (2008) Specially Engineered Acrylic Hybrids: A New Technology Platform for Low VOC Decorative Coatings. PRA's 6th International Woodcoatings Congress "Preserve, Protect, Prolong", 14-15 Oct. 2008, Amsterdam, The Netherlands, paper 6.
- ¹² De Merijer M. (2001) Review on the durability of exterior wood coating with reduced VOC-content. *Progress in Organic Coating*, 43, 217-255.
- ¹³ Bulian F. & Graystone Jon A. (2009) Wood coatings, 1st edition: theory and practice. 320 p.
- ¹⁴ Baumstark R. & Gettman F. (2012) Microfoam in water-based, acrylic spray coats for exterior wood-A systematic approach for better solutions. PRA's 8th International Woodcoatings Congress "Science and Technology for Sustainable Design", 30-31 Oct. 2012, Amsterdam, The Netherlands, paper 7.
- ¹⁵ Hesry A.S, Bernhofer T., Conrads M. & Foster R. (2012) Can acrylic Emulsion Replace solvent borne Alkyds? PRA's 8th International Woodcoatings Congress "Science and Technology for Sustainable Design", 30-31 Oct. 2012, Amsterdam, The Netherlands, paper 5.

¹⁶ Nejad M. Coating Performance on Preservative Treated Wood. Graduate Department of Forestry: Université de Toronto, 2011, 221p.

¹⁷ Baumstark R. & Tuchbeiter A. (2008) New Acrylic binder technologies for water-based exterior wood coatings. PRA's 6th International Woodcoatings Congress "Preserve, Protect, prolong", 14-15 Oct. 2008, Amsterdam, The Netherlands, paper 7.

¹⁸ Shaw J. (2010) UV curable polyurethane dispersions: a VOC compliant high performance solution for indoor and outdoor wood coating. Industrial Coating Publications. American coating conference, 12-14 Avril 2010, Charlotte, USA.

¹⁹ Chang C.W. & Lu K.T. (2013) Linseed-oil-based waterborne UV/air dual-cured wood coatings. *Progress in Organic Coatings*, 76, 1024–1031.

²⁰ Directive 2004/42/CE du 21 avril 2004 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures et dans les produits de retouche de véhicules, et modifiant la directive 1999/13/CE. Journal officielle de l'Union Européenne L143/87 du 30/04/2004.

²¹ NF EN ISO 4618. (2014). Peintures et vernis. Termes et définitions.

²² Laout J.C. (2005) Formulation des peintures-Physico-chimie et matières pulvérulentes. In : *Technique de l'ingénieur*, j2270-1-j2270-17.

²³ ECHA European Chemicals Agency. Réglementations. Règlement relatif aux produits biocides. [En ligne] Disponible sur <http://echa.europa.eu/fr/regulations/biocidal-products-regulation> (consulté le 11 septembre 2015).

²⁴ Arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils. Journal officiel n° 111 du 13/05/2011 texte numéro 15.

²⁵ NF EN ISO 16000-9 (2006) : Air intérieur –Partie 9 : Dosage de l'émission de composés organiques volatils des produits de construction et d'objets d'équipement –Méthode de la chambre d'émission.

²⁶ Bulian F. Emissions from wood floorings. Which is the right choice? PRA's 9th International Woodcoatings congress, Amsterdam, 14-15 octobre 2014.

²⁷ Bulian F. *Materials and Technologies of the furniture industry*, edizioni Goliardiche, 2012.

²⁸ G.E. Myers, Effects of post-manufacture board treatments on formaldehyde emission : a literature review (1960-1984), *Forest Products Journal*, vol. 36, n° 6, 1986.

²⁹ G.E. Myers, Effects of temperature and humidity on formaldehyde emission from UF-bonded boards : a literature critique, *Forest Products Journal*, vol. 35, n° 9, 1986.

³⁰ G.E. Myers, New technologies and materials for bonding wood products, *Adhesives Age*, vol. 31, n° 11, 1988.

³¹ G.E. Myers, J.A. Koutsky, Procedure for measuring formaldehyde liberation from formaldehyde-based resins, *Forest Products Journal*, vol. 37, n° 9, 1987.

³² G.E. Myers, How mole ratio of UF resin affects formaldehyde emission and other properties : a literature critique, *Forest Products Journal*, vol. 34, n° 5, 1984.

³³ A. Barry and D. Corneau, Effectiveness of barriers to minimize VOC emissions including formaldehyde, *Forest Product Journal*, vol. 56, n° 9, 2006.

http://www.ecobind.com/research/Effectiveness_of_Barriers_Phase_I.pdf

³⁴ Barry A. Effectiveness of barriers to minimize VOC, *FP Innovations – Forintek, Value to wood*, April 2008.

http://www.valuetowood.ca/imports/pdf/en/r-d_summaries/RDS%2008-05-E.pdf

³⁵ Composite Panel Association. VOC emission barrier effects of laminates, overlays and coatings for particleboard, medium density fibreboard (MDF) and hardboard. *Technical Bulletin*, 2003.

³⁶ United States of America Consumer Product Safety Commission. An update on formaldehyde. Publication 725. Revision 022016.

www.cpsc.gov/PageFiles/121919/An-Update-On-Formaldehyde-725.pdf

³⁷ W.J. Groah, G.D. Gramp, R.J. Rudzinski, The effect of surface ply thickness on formaldehyde emissions from a diffuse porous hardwood, *Forest Product Journal*, Vol 42, N°7/8, July 1992.

³⁸ Costa N. A., Pereira J., Ferra J., Cruz P., Martins J., Magalhães F.D., Mendes A., Carvalho L. H. Scavengers for achieving zero formaldehyde emission of wood-based panels. *Wood Science and Technology*, Volume 47, Issue 6, pp 1261-1272, 2013.

³⁹ Tran T. The activity of acrylic-silicon/nano-TiO₂ films for the visible-light degradation of formaldehyde and NO₂. *Building and Environment*, Volume 65, Pages 215-221, 2013

⁴⁰ Zhenan Han. Preparation of TiO₂-Coated Polyester Fiber Filter by Spray-Coating and Its Photocatalytic Degradation of Gaseous Formaldehyde. *Aerosol and Air Quality Research*, 12: 1327–1335, 2012

⁴¹ NF EN ISO 7783. (2011). Peintures et vernis. Détermination des propriétés de transmission de la vapeur d'eau. Méthode de la coupelle.

⁴² Chang J. C. S., Guo Z (1998). Emissions of odorous aldehydes from alkyd paint. *Atmos Environ*, 32(20):3581–3586.