HAL
open science

Implications tactiles et visuelles de la rugosité du bois et des matériaux dérivés du pin maritime

Tahiana Ramananantoandro

To cite this version:

Tahiana Ramananantoandro. Implications tactiles et visuelles de la rugosité du bois et des matériaux dérivés du pin maritime. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2005. Français. NNT : 2005EMSE0017 . tel-00793158

HAL Id: tel-00793158

https://theses.hal.science/tel-00793158

Submitted on 21 Feb 2013

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

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

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE SAINT-ÉTIENNE

THÈSE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR
DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE SAINT-ÉTIENNE
ET DE L'UNIVERSITÉ JEAN MONNET DE SAINT-ÉTIENNE
École Doctorale : Génie des Procédés

par
Tahiana RAMANANANTOANDRO

IMPLICATIONS TACTILES ET VISUELLES DE LA RUGOSITÉ DU BOIS ET DES MATÉRIAUX DÉRIVÉS DU PIN MARITIME

Soutenue publiquement le 04 juillet 2005
à l'Auditorium de la technopole Hélioparc Pau-Pyrénées

Devant le jury composé de :

M. Bernard Thibaut, Directeur de recherche, CNRS Guyane	, Rapporteur
M. Marc Danzart, Professeur, ENSIA Massy	, Rapporteur
Mme Mireille Fouletier, Professeur, Ecole des Mines d'Alès	, Directeur de thèse
M. Jacques Bourgois, Professeur, Ecole des Mines de Saint Etienne	, Examinateur
M. Pierre Larricq, Maître de conférences, Université de Toulouse	, Examinateur
M. Olivier Eterradossi, Maître-Assistant, Ecole des Mines d'Alès	, Examinateur
Mme Dominique Lafon, Enseignant-Chercheur, Ecole des Mines d'Alès	, Membre invité

Thèse préparée au Centre des Matériaux de Grande Diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès

« Fa ny fahasoavan'Andriamanitra
no naha toy izao ahy »

Remerciements

Ce travail de recherche a été réalisé au sein de l'Equipe Propriétés Psychosensorielles des Matériaux qui fait partie du Centre des Matériaux de Grande Diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès, sous la direction de Mme Mireille Fouletier. Grâce à elle, je me suis vue confiée cette première thèse sur le domaine novateur et original de la perception tactile du matériau bois au contact du doigt. Par son intermédiare, j'ai également pu présenter mon travail de recherche à de nombreuses conférences et colloques en France et à l'étranger, ce qui a été pour moi une chance inestimable. Pour toutes ces raisons, je la remercie vivement.

Je tiens à exprimer mes plus vives reconnaissances à M. Olivier Eterradossi, Maître-Assistant à l'Ecole des Mines d'Alès, avec qui j'ai travaillé en grande partie. Cette thèse doit beaucoup aux innombrables heures à discuter. J'ai pu profiter de ses connaissances et de sa rigueur scientifique, de ses conseils éclairés et apprécier sa constante disponibilité tout au long de ces trois années de thèse.

Mes plus sincères remerciements vont aussi à Mme Marie Bacou qui a assuré le co-encadrement de cette thèse. Même si notre collaboration s'est arrêtée en milieu de la thèse, ses conseils, sa disponibilité permanente et sa qualité humaine ont été pour beaucoup dans la réussite de cette thèse.

Ma reconnaissance s'adresse également à M. Pierre Larricq, maître de conférences à l'IUT de Tarbes, qui a exprimé un très vif intérêt pour mes travaux. Il m'a aidé dans l'usinage des matériaux et dans les mesures des paramètres de rugosité avec le perthomètre laser. Les nombreuses discussions que j'ai eues avec lui et le travail important qu'il a fourni en lisant et en corrigeant les versions de ma thèse m'ont été d'une aide précieuse.

Je tiens à remercier Mme Dominique Lafon, enseignant chercheur à l'Ecole des Mines d'Alès, pour m'avoir initié aux principes de l'analyse d'image. Travailler avec elle a été une source d'expériences des plus intéressantes.

Je voudrai exprimer toute ma reconnaissance aux deux rapporteurs de cette thèse : M. Bernard Thibaut, directeur de recherche CNRS (Guyane) et M. Marc Danzart, professeur de statistique à l'ENSIA Massy qui, malgré la distance et leur emploi du temps très chargé, ont accepté de rapporter ma thèse. Que M. Jacques Bourgois, professeur à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements pour l'honneur qu'il me fait en présidant le jury de thèse.

J'exprime ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à ce travail : M. Marc Vinches pour son partage de connaissance en géostatistiques et M. Jean Marie Thaulemesse pour les observations avec le MEB. Un grand merci à M. Martial Giton pour l'aide à l'apprentissage de Latex et à la programmation sur Matlab.

Je souhaite remercier très sincèrement les entreprises de la région : Weyeurhaueser (Morcenx), Egger-Rol (Rion-des-Landes), Smurfit Rol Pin (Labouheyre) et la société Gau (Castres) pour m'avoir fourni les échantillons nécessaires à ce travail.

Toutes mes reconnaissances vont à toutes les personnes qui ont bien voulu participer aux tests sensoriels, pourtant sans rémunération, pour leur aide précieuse et leur aimabilité.

Sans oublier l'équipe paloise : Leila, Kamelia, Sylvie, Philippe, Stéphane, Aurélien, Hélène, Nathalie, Anne, Amadou, Virginie et Valérie pour la bonne ambiance ; et les collègues tarbais : Abolghasem, Florent, Jean-Noël, Mireille, Gérard pour m'avoir permis de finir avec sérénité cette thèse.

Enfin, mes pensées vont à mes parents pour leur soutien et leur encouragement permanent et particulièrement à Diera pour sa relecture de la thèse et Mahery pour son soutien sans faille.

Table des matières

Introduction **1**

1 Étude bibliographique **7**
1.1 Phénoménologie et métrologie de la rugosité du bois 7
1.1.1 Les facteurs influençant la rugosité du bois 7
1.1.1.1 Les propriétés intrinsèques 7
1.1.1.2 L'assemblage 8
1.1.1.3 Procédé d'élaboration de la surface 12
1.1.1.4 Résultante des trois facteurs 13
1.1.2 Analyse instrumentale des états de surface 13
1.1.2.1 Profilométrie 13
1.1.2.2 Evaluation sensorielle 26
1.1.2.3 Tribologie 29
1.2 La rugosité : génératrice de sensations 29
1.2.1 La perception tactile humaine au contact d'un matériau 30
1.2.1.1 Contact de la surface de l'objet avec la peau 30
1.2.1.2 Traduction en impulsions nerveuses par l'intermédiaire des récepteurs 31
1.2.1.3 Transmissions des pulsions neurales et réception au niveau du cerveau 31
1.2.1.4 Perception du toucher 31
1.2.2 Les différentes approches pour mesurer, caractériser ou simuler le toucher des matériaux rugueux 32
1.2.2.1 Approche neurophysiologique 32
1.2.2.2 Approche psychophysique 33
1.2.2.3 Approche biomécanique 34
1.2.3 Influence de la vision sur la sensation tactile de rugosité (intermodalité) 35
1.2.3.1 Présentation du système visuel 36
1.2.3.2 Définition de l'observateur standard (fonction chromatique $\overline{r}\ \overline{g}\ \overline{b}$ de l'observateur) 37
1.2.3.3 Etude de la texture couleur 38
1.2.4 Les travaux concernant la recherche de corrélation entre les paramètres de rugosité et la perception tactile 39
1.3 Conclusions 43

2 Matériels et méthodes **45**
2.1 Création d'une gamme de textures rugueuses pour générer les sensations . 45
2.1.1 Choix des matériaux à base de pin maritime 45
2.1.1.1 Par la diversité des textures colorées et des états de surface 45

2.1.1.2 Par usinage d'un même matériau 47
2.1.1.3 Choix des grains de ponçage 47
2.1.1.4 Réglage des autres paramètres de ponçage 48
2.1.2 Préparation des échantillons 48
2.1.2.1 Relevé des poids des plaques 50
2.2 Caractérisation instrumentale des paramètres physiques de rugosité de surface 51
2.2.1 Méthode d'acquisition de la topographie de surface 51
2.2.1.1 Techniques d'acquisition de la topographie de surface . . . 51
2.2.1.2 Définitions des paramètres d'acquisition de la topographie de surface 56
2.2.2 Extraction des paramètres de rugosité 58
2.2.2.1 Définition des paramètres de rugosité de surface étudiés . 58
2.3 Caractérisation instrumentale des paramètres physiques liés à la vision . . 61
2.3.1 Spécification du signal lumineux capturé par des valeurs (trois composantes trichromatiques) 61
2.3.1.1 Acquisition d'images 61
2.3.1.2 Transposition de l'espace initial des données dans un espace Lab 62
2.3.2 Analyse des coordonnées trichromatiques (L, a, b) des couleurs des images 63
2.3.2.1 Analyse statistique 63
2.3.2.2 Analyses spatiales 64
2.4 Analyse sensorielle 67
2.4.1 Objectifs poursuivis 67
2.4.2 Choix des tests sensoriels 67
2.4.3 Mode de présentation des échantillons 72
2.4.4 Les sujets 72
2.4.5 Conditions opératoires 74

3 Caractérisations physiques 75
3.1 Caractérisation instrumentale de la rugosité de surface 75
3.1.1 Effet du filtrage du profil brut sur les paramètres de rugosité 75
3.1.2 Corrélation entre les paramètres 79
3.1.3 Effet de l'ordre et de la taille de ponçage sur les paramètres de rugosité 79
3.1.4 Exemple typique de représentation surfacique de la topographie de surface des plaques étudiées 81
3.1.5 Etude de la différence et de la similitude entre les échantillons en termes de paramètres de rugosité 84
3.1.5.1 MDF poncés 84
3.1.5.2 Bois de pin poncés 85
3.1.5.3 Divers matériaux dérivés du bois 86
3.1.6 Récapitulatif et discussions 87
3.2 Caractérisation instrumentale de l'aspect visuel 88
3.2.1 Analyse statistique des valeurs de $(L,\ a,\ b)$ 89
3.2.1.1 MDF poncés 89
3.2.1.2 Bois poncés 93
3.2.1.3 Divers matériaux dérivés du bois 93

3.2.2 Analyse spatiale des valeurs de (L, a, b) 95
3.2.2.1 Paramètres spatiaux 95
3.2.2.2 Applications de la théorie des variogrammes et des courbes d'écart de couleur sur les images des matériaux étudiés . . 96
3.2.2.3 MDF poncés 98
3.2.2.4 Bois poncés 99
3.2.2.5 Divers matériaux dérivés du bois 99
3.2.3 Récapitulatif et discussions 101

4 Caractérisation sensorielle et relations avec les paramètres physiques 103
4.1 Caractérisation sensorielle du toucher et de la vision du bois 103
4.1.1 Descripteurs du toucher du bois 103
4.1.1.1 MDF poncés 104
4.1.1.2 Bois poncés 105
4.1.1.3 Divers matériaux à base de bois 106
4.1.1.4 Récapitulatif et discussions 107
4.1.2 Rang de classement moyen 108
4.1.2.1 MDF poncés 108
4.1.2.2 Bois de pin poncés 110
4.1.2.3 Matériaux divers dérivés du bois 110
4.1.2.4 Récapitulatif et discussions 112
4.1.3 Influence de la vision sur le toucher 114
4.1.4 Analyse du positionnement multidimensionnel (MDS) 115
4.1.4.1 Principe 115
4.1.4.2 Démarche 116
4.1.4.3 MDF poncés 117
4.1.4.4 Bois poncés 117
4.1.4.5 Divers matériaux dérivés du bois 117
4.1.4.6 Récapitulatif et discussions 118
4.2 Relations entre des résultats sensoriels et expérimentaux 119
4.2.1 Relations entre les paramètres de rugosité et les résultats des classements tactiles 119
4.2.2 Corrélation (ACP) des composantes de la MDS avec les paramètres de rugosité 123
4.2.2.1 MDF poncés 124
4.2.2.2 Bois poncés 124
4.2.2.3 Divers matériaux dérivés du bois 124
4.2.2.4 Récapitulatifs et discussions 124
4.2.3 Implications visuelles de la rugosité 126

Conclusion 129

Bibliographie 139

A Fonction d'autocorrélation 143

B Présentation des panneaux étudiés 145

C Définitions des paramètres de rugosité étudiés, selon l'aide du logiciel Mountains Map 153

D Matrices de corrélation entre les paramètres de rugosité 157

E Effet de la taille des grains de ponçage et de l'ordre de ponçage sur les valeurs des paramètres de rugosité 161

F Variabilité des paramètres de rugosité calculés sur tous les échantillons étudiés 163

G Images couleur des plaques étudiées 171

H Analyse statistique des coordonnées *L, a, b* des images des plaques étudiées calculées au moyen du calibrage 175

I Semi-variogrammes moyens des composants *L, a, b* 177

J Courbes d'écart de couleur 187

Table des figures

1 Approche 4

1.1 Le plan ligneux du bois 8
1.2 Le plan ligneux du bois 9
1.3 Procédés d'élaboration des surfaces de bois 12
1.4 Effet du type d'usinage sur l'état de surface du bois 12
1.5 Classification des principes physiques de numérisation 3D 14
1.6 Profils mesurés par la méthode laser et la méthode à palpeur : a) sur du hêtre poncé b) sur du hêtre poncé puis peint 16
1.7 Principe d'acquisition d'un rugosimètre confocal 17
1.8 Carte des altitudes reconstituées 18
1.9 Principe de filtrage d'un profil 19
1.10 Les paramètres surfaciques de rugosité selon le rapport EUR 15 178 20
1.11 Représentation graphique de deux profils de rugosité présentant des valeurs positives et négatives de S_{sk} 21
1.12 Représentation graphique de trois profils de rugosité appartenant aux trois classes de signification de S_{ku} 22
1.13 Expression de la direction de la texture au moyen de la mesure de l'angle par rapport à l'axe Y 23
1.14 La courbe d'Abbott-Firestone et les zones fonctionnelles 25
1.15 Séquence des évènements aboutissant à la sensation tactile 30
1.16 Coupe schématique de la peau : les récepteurs cutanés 31
1.17 Densité de répartition de quatre types de récepteurs cutanés sur la surface interne de la main 33
1.18 Vue 3D des maillages d'éléments finis (a) du doigt humain et (b) leur déformation 35
1.19 La vision de la couleur : le triplet lumière-objet-recepteur 36
1.20 Sensibilité de l'oeil en vision photopique $V(\lambda)$ et en vision scotopiques $V'(\lambda)$ 37
1.21 Fonctions chromatiques $\overline{r}$ $\overline{g}$ $\overline{b}$ de l'observateur humain 38
1.22 Etude de trois méthodes de filtrage du profil brut : a) présentation des filtres, b) corrélations avec la rugosité tactile [47] 42

2.1 Position des matériaux étudiés dans l'espace défini par la rugosité de surface et l'hétérogénéité de la texture couleur 46
2.2 Machine à poncer utilisée 48
2.3 La surface étudiée : a) planches de bois massif desquelles ont été prélevés les échantillons, b) le plan L-T 49
2.4 Mise à l'étuve des échantillons de bois massif 50
2.5 Nomenclature des échantillons 50
2.6 Quantité de matières enlevées pour chaque taille des grains de ponçage étudiée. a) MDF poncés b) Bois poncés 51

2.7 Comparaison des valeurs de S_a calculées à partir du rugosimètre laser et du rugosimètre confocal . . . 53
2.8 Comparaison des valeurs de S_{sk} et S_{ku} calculées à partir du rugosimètre laser et du rugosimètre confocal . . . 54
2.9 Evolution des moyennes et écart-types de S_a et S_q en fonction du nombre d'acquisitions sur les plaques de MDF poncés avec des grains différents . . 57
2.10 Algorithme des opérations appliquées sur chaque fichier brut de carte d'altitudes . . . 59
2.11 Liste des paramètres de rugosité étudiés . . . 60
2.12 Espace couleur uniforme Lab . . . 62
2.13 Schéma explicatif du calibrage . . . 63
2.14 Forme générale d'un semi-variogramme . . . 65
2.15 Les conditions du test sensoriel . . . 67

3.1 Projection sur le plan factoriel principal des paramètres de rugosité calculés sur les plaques de MDF, a) avec un filtrage à 100 μm, b) avec un filtrage à 200 μm, c) avec un filtrage à 300 μm . . . 77
3.2 Projection sur le plan factoriel principal des paramètres de rugosité calculés sur les plaques de bois, a) avec un filtrage à 100 μm, b) avec un filtrage à 200 μm, c) avec un filtrage à 300 μm . . . 78
3.3 Exemple typique de représentation surfacique de la topographie de surface des plaques de MDF étudiées . . . 82
3.4 Exemple typique de représentation surfacique de la topographie de surface des plaques de bois massif étudiées . . . 82
3.5 Exemple typique de représentation surfacique de la topographie de surface des plaques des matériaux dérivés du bois étudiées . . . 83
3.6 Projection sur le plan factoriel principal a) des variables, b) des individus (surfaces des MDF poncés), c) valeurs propres . . . 85
3.7 Projection sur le plan factoriel principal a) des variables, b) des individus (surfaces de bois poncés), c) valeurs propres . . . 86
3.8 Projection sur le plan factoriel principal a) des variables, b) des individus (surfaces des divers matériaux dérivés du bois), c) valeurs propres . . . 87
3.9 Représentation des MDF poncés dans l'espace couleur . . . 89
3.10 Distribution de la valeur de L, a, b des pixels composant les images des plaques de MDF poncées et de bois massifs poncées . . . 91
3.11 Images des surfaces des six plaques de MDF poncées prises à la loupe binoculaire . . . 92
3.12 Représentation des bois poncés dans l'espace couleur . . . 93
3.13 Représentation des matériaux dérivés du bois dans l'espace couleur . . . 94
3.14 Distribution de la valeur de L, a, b des pixels composant les images des plaques des divers matériaux dérivés du bois . . . 94
3.15 Quatre échantillonnages aléatoires de 50000 points dans l'image du quart de la plaque (m : moyenne, sd : écart-type) . . . 96
3.16 Les quatre directions d'analyse des semi-variogrammes et de la courbe d'écart de couleur . . . 97
3.17 Nombre de couples de données en fonction de la distance, pour la courbe d'écart de couleur . . . 98

3.18 Exemples de courbe d'écart de couleur correspondant aux deux groupes de texture 101

4.1 Projection des échantillons de MDF poncés et des descripteurs dans l'espace de l'analyse de correspondance 105
4.2 Projection des échantillons de bois de pin poncés et des descripteurs dans l'espace de l'analyse de correspondance 106
4.3 Projection des échantillons de bois divers et des descripteurs dans l'espace de l'analyse de correspondance 107
4.4 Rang de classement sensoriel pour les plaques de MDF (a, c, d) et les plaques de bois (b, d, e) 109
4.5 Rang de classement sensoriel correspondant aux plaques de bois divers . . 111
4.6 Effet du temps (7 mois) et du toucher sur les valeurs de S_a calculées avec le perthomètre 113
4.7 Estimation de l'évolution des erreurs commises par le panel sensoriel selon l'ordre de passage des sujets 115
4.8 Représentation des espaces de perception tactile de la rugosité à l'aide de l'analyse MDS a) des MDF poncés, b) des bois poncés 117
4.9 Représentation des espaces de perception de la rugosité des divers matériaux dérivés du bois à l'aide de l'analyse MDS : a) tactile, b) visio-tactile 118
4.10 Représentation deux à deux du rang tactile et des paramètres de rugosité des plaques de MDF poncées 121
4.11 Représentation deux à deux du rang tactile et des paramètres de rugosité des plaques de bois poncées 122
4.12 Trois profils topographiques différents présentant la même valeur de R_a . . 123
4.13 Projection sur le plan factoriel 1 x 2 des paramètres de rugosité et des coordonnées des dimensions de la MDS calculées a) sur les plaques de MDF poncées, b) sur les plaques de bois poncés 123
4.14 Projection des paramètres de rugosité et des coordonnées des dimensions de la MDS calculées sur les plaques des divers matériaux dérivés du bois . 125

A.1 Classification des surfaces selon la fonction d'autocorrélation 143

C.1 Etablissement des paramètres fonctionnels à partir de la courbe d'Abbott . 155

D.1 Matrice de corrélation entre les paramètres de rugosité mesurés sur les éprouvettes de MDF 158
D.2 Matrice de corrélation entre les paramètres de rugosité mesurés sur les éprouvettes de bois de pin 159
D.3 Matrice de corrélation entre les paramètres de rugosité mesurés sur les éprouvettes de divers matériaux dérivés du bois 160

F.1 Paramètres de rugosité calculés sur les échantillons de MDF 165
F.2 Paramètres de rugosité calculés sur les échantillons de bois massif 167
F.3 Paramètres de rugosité calculés sur les divers échantillons dérivés du bois . 169

G.1 Images couleur des six plaques de MDF poncées 172
G.2 Images couleur des six plaques de bois poncées 173
G.3 Images couleur des huit plaques de matériaux dérivés du bois 174

I.1 Semi-variogrammes de L calculés sur quatre directions sur les plaques de MDF poncées . . . 178
I.2 Semi-variogrammes de a calculés sur quatre directions sur les plaques de MDF poncées . . . 179
I.3 Semi-variogrammes de b calculés sur quatre directions sur les plaques de MDF poncées . . . 180
I.4 Semi-variogrammes de L calculés sur quatre directions sur les plaques de bois poncées . . . 181
I.5 Semi-variogrammes de a calculés sur quatre directions sur les plaques de bois poncées . . . 182
I.6 Semi-variogrammes de b calculés sur quatre directions sur les plaques de bois poncées . . . 183
I.7 Semi-variogrammes de L calculés sur quatre directions sur les plaques de divers matériaux dérivés du bois . . . 184
I.8 Semi-variogrammes de a calculés sur quatre directions sur les plaques de divers matériaux dérivés du bois . . . 185
I.9 Semi-variogrammes de b calculés sur quatre directions sur les plaques de divers matériaux dérivés du bois . . . 186

J.1 Courbes d'écart de couleur calculées sur quatre directions sur les six plaques MDF poncées . . . 188
J.2 Courbes d'écart de couleur calculées sur 4 directions sur les six plaques de bois poncées . . . 189
J.3 Courbes d'écart de couleur calculées sur quatre directions sur les plaques des huit matériaux dérivés du bois . . . 190

Liste des tableaux

1.1 Structure des matériaux composites à base de bois étudiés 11
1.2 Caractéristiques de différents rugosimètres utilisés dans la bibliographie pour une application au bois 15
1.3 Propriétés des quatre mécanorécepteurs de la peau 33
1.4 Seuil de sensibilité tactile liée à la rugosité 34
1.5 Les paramètres représentant, dans la bibliographie, la sensation de rugosité sur des matériaux bois 41

2.1 Correspondance entre les codes FEPA et la grosseur moyenne des grains des papiers abrasifs 48
2.2 Caractéristiques du crayon optique « 300 μm » du rugosimètre confocal et du palpeur optique LS10 du perthomètre 55
2.3 Récapitulatifs du nombre de cartes d'altitudes à étudier 58
2.4 Schémas de base des semi-variogrammes 66
2.5 Description des tests sensoriels avec la liste des panneaux à présenter pour chaque type de test 71
2.6 Calcul de l'effectif minimum nécessaire du panel sensoriel pour chaque test réalisé 73
2.7 Caractéristiques des panels 74

3.1 Liste des paramètres non corrélés entre eux pour chaque groupe de matériaux 79
3.2 Analyse de variance : F (valeur du test de Fisher) et niveau de signification 80
3.3 Paramètres de texture couleur calculés sur les valeurs de L 95
3.4 Type et nombre de modèles statistiques qui s'ajustent à la courbe d'écart de couleur, direction 0° 101
3.5 Type et nombre de modèles statistiques qui s'ajustent à la courbe d'écart de couleur, direction 90° 101

4.1 Coefficient de corrélation de Pearson (et de Spearman) entre les paramètres de rugosité et les rangs moyens de classement tactile pour les éprouvettes de MDF, de bois massif et de divers matériaux à base de bois 120

E.1 Moyenne des effets des grains de ponçage et de l'ordre de ponçage sur les valeurs des paramètres de rugosité pour les plaques de MDF poncées . . . 161
E.2 Moyenne des effets des grains de ponçage et de l'ordre de ponçage sur les valeurs des paramètres de rugosité pour les plaques de bois de pin poncées 162

H.1 Moyenne et écart-type des coordonnées L, a, b des images de chaque plaque de bois calculées au moyen du calibrage 176

Introduction

Contexte de l'étude

Les industriels sont actuellement de plus en plus nombreux à s'intéresser aux propriétés psychosensorielles de leurs produits. De même que la vue, l'odorat et le goût, le toucher joue un rôle important dans la décision d'achat. En fonction des attentes du client, une maîtrise des propriétés sensorielles des matériaux est requise à une étape de sa fabrication industrielle. Le ministère de l'industrie (2000) a recensé l'étude des propriétés psychosensorielles des matériaux parmi les « 119 technologies-clefs » des années à venir. Les causes de cette situation sont multiples :

- dans les industries des matériaux, les produits ont aujourd'hui acquis une haute qualité technique. Les enjeux de production se tournent vers la maîtrise des propriétés d'usage et l'amélioration des propriétés sensorielles,
- le commerce des matériaux cherche de nouveaux marchés,
- les nouvelles technologies liées au monde virtuel s'intéressent à la reproduction de la sensation.

Pour faciliter l'approche industrielle des propriétés psychosensorielles, il est nécessaire de mettre en place un ensemble de théories et techniques qui comprendrait la caractérisation du sens humain, la modélisation des réponses psychosensorielles de l'observateur standard, un système de représentation mathématique qui permettrait la caractérisation et à termes la formulation du toucher [39]. Selon les sens, les outils sont plus ou moins développés et utilisés dans l'industrie. Le domaine de la vision est extrêmement documenté. Les avancées concernent notamment :

- la définition de la relation entre les paramètres physiques à l'origine de la couleur et les composantes subjectives que notre œil perçoit dans le phénomène (colorimétrie),
- la possibilité de formuler ou de reproduire une couleur désirée.

On sait que la sensation tactile est la résultante de plusieurs composantes : rugosité, dureté, collant, température, etc. [25], mais la métrologie du toucher reste encore peu développé car actuellement :

- le toucher attendu n'est pas encore défini en termes clairs et précis,
- le toucher des matériaux se heurte à un déficit métrologique important, on ne sait pas encore le caractériser et le mesurer d'une manière objective,
- il n'est pas possible de formuler les effets tactiles désirés. L'analyse sensorielle est le seul outil employé pour caractériser la sensation tactile d'un matériau.

Ce travail de thèse s'intègre dans une thématique générale à long terme visant à créer des espaces de représentations psychophysiques qui permettent de décrire quantitative-

ment la sensation au toucher produite par les matériaux. Le travail de thèse se concentre plus spécifiquement sur les propriétés psychosensorielles liées à la rugosité de surface et l'influence de la vision sur les sensations tactiles de rugosité. Le matériau bois et divers composites à base de bois de pin maritime (*Pinus pinaster*) sont utilisés comme matériaux modèles car ils sont faciles d'accès et faciles à usiner. De plus, le pin maritime est un matériau clé de développement économique en Aquitaine avec une surface occupée de 897 000 ha sur les 1 166 000 ha de forêt de Gascogne.

De manière très globale l' Aquitaine, à elle seule, représente 20% de la filière bois française. Parmi ses points forts, on peut citer [80] :

- La production de plants : avec trois des principales pépinières forestières françaises situées dans les Landes et en Gironde.
- Sciage : la part de l'Aquitaine dans les sciages-résineux français est de 25%. Les derniers chiffres connus (1997) font état de 1 931 612 m^3 (dont 1 661 000 m^3 sciage pin maritime) sciés dans la Région. Ceci concerne 325 scieries. Il est à souligner que 194 scieries de pin maritime produisent 1 449 410 m^3 sciés (85% du volume total). 21 scieries dépassent les 20 000 m^3 sciés par an.
- Emballage : avec 123 entreprises concernées, l'Aquitaine représente 30% de la production française globale.
- Parquets-lambris : les parquets-lambris en « Pin des Landes » concernent 62 entreprises qui commercialisent 7% de la production française, avec une production de l'ordre de : 20 millions de m^2 de lambris et de 2,5 millions de m^2 de parquets.
- Panneaux et contreplaqués : c'est en Aquitaine que l'on trouve la plus importante usine de déroulage résineux en Europe (Labouheyre - Groupe Smurfit 100 000m^3 contreplaqué pin). A ceci, il convient d'ajouter six unités qui produisent soit du panneau de particules soit du panneau MDF.
- Pâtes, papiers, cartons : Le secteur carton représente un élément essentiel de la filière bois en Aquitaine par l'importance de sa consommation en rondis (estimée à 2,2 millions de m^3) et de produits connexes de scierie.
- Ameublement : C'est le « chaînon manquant » de la filière, notamment en matière de résineux.

Face à ce dernier constat, pour conquérir de nouveaux marchés ou accroître la part de marché, il y a un besoin d'innovation dans le domaine de l'ameublement, en élargissant la gamme de produits proposés ou en remplaçant les produits obsolètes. Cet objectif est ressenti comme prioritaire par près de la moitié des firmes innovantes selon Adour Compétitivité [21]. Le toucher des meubles et l'aspect donné au produit sont des voies d'innovation à explorer pour contrer une concurrence étrangère forte, principalement italienne, axée sur le design et l'ergonomie. Il serait intéressant d'utiliser un matériau de substitution, plus rentable et plus facile à utiliser, en mettant à profit le côté sensoriel bois.

Problématique

Ce travail est issu de remarques régulièrement formulées :

- La plupart des travaux publiés sur la perception tactile de rugosité concerne la réponse à des surfaces artificielles bien définies telles que des grilles [109] ou des motifs en relief [76]. Il y a peu de travaux concernant la rugosité des surfaces de bois qui est souvent difficile à décrire d'une manière objective.
- Il est actuellement possible de caractériser objectivement l'état de surface au moyen de plusieurs paramètres de rugosité (plus d'une centaine) mais on ne sait pas lesquels ont un lien avec les sensations évoquées lors du « toucher ».
- L'analyse des états de surface des matériaux bois est cruciale dans le contrôle effectif de la qualité du bois en aval de son usinage. L'estimation de la rugosité de surface est réalisée à travers une comparaison visio-tactile de la surface à analyser avec des étalons, lesquels reproduisent des surfaces techniques correspondant à des paramètres d'usinage déterminés. D'utilisation facile, cette méthode ne donne pas de mesure à proprement parlé mais une estimation sujette à la subjectivité de l'opérateur.
- Les matériaux composites à base de bois sont de plus en plus utilisés en substitution au bois car leurs propriétés peuvent être reproduites d'une plaque à l'autre et il est facile de moduler leur forme. Il serait intéressant de comparer leur toucher par rapport à celui du bois.
- La vision fonctionne avec le toucher dans la perception de la rugosité. Des chercheurs [56, 55, 51, 52] ont examiné les capacités des deux modalités dans la perception de la texture. Il serait intéressant de voir l'application au matériau bois et ainsi d'étudier l'influence de la vision dans la perception de la rugosité du bois.

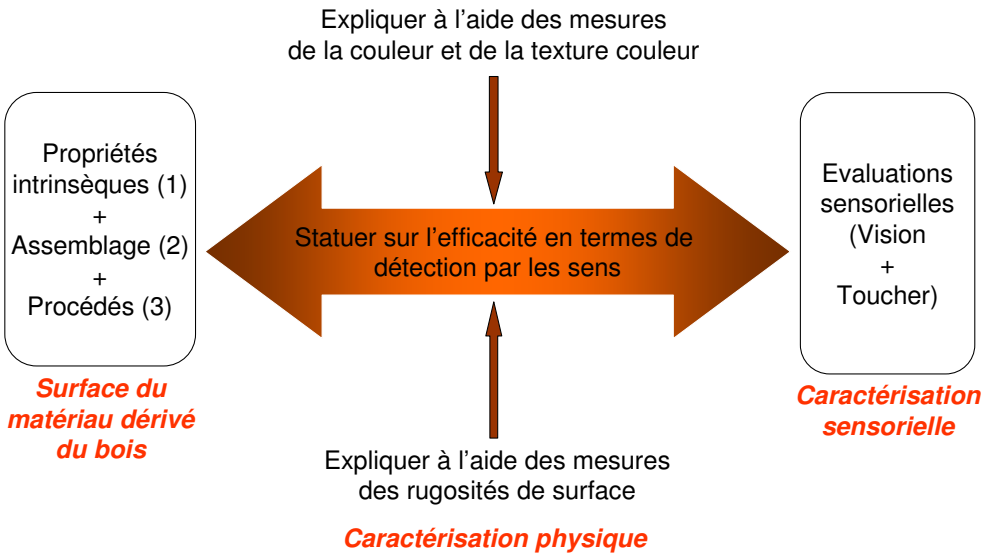
Il y a donc un besoin évident de mesures instrumentales fiables et reproductibles qui puissent traduire les perceptions de rugosité de l'homme. C'est pour répondre à cette problématique que ce travail a démarré.

Objectifs de l'étude

Les objectifs de ce travail de thèse sont d'explorer l'incidence des propriétés topographiques de surface des matériaux dérivés du bois de pin maritime sur les sensations de rugosité au toucher et d'étudier l'influence de la vision sur les sensations de rugosité au toucher. Par « rugosité de surface », nous entendons les attributs topographiques décrits en paramètres de rugosité mesurables et non comme l'idée des hautes fréquences opposées aux basses fréquences (ondulation). Cela se traduit au toucher par la perception du relief par les doigts. Il s'agit alors d'établir les relations entre les paramètres physiques mesurés (rugosité, couleur) et les sensations tactiles de rugosité de surface sur des bois et composites à base de bois de pin maritime.

Approche du problème

L'approche que nous avons suivie pour atteindre les objectifs de la thèse peut être illustrée dans la figure 1. A partir d'un ensemble de produits à base de pin maritime, nous allons mener en parallèle deux études complémentaires (une analyse physique des caractéristiques visio-tactiles des échantillons et une analyse sensorielle avec des consommateurs) et chercher le lien entre ces résultats physiques et sensoriels.



1. *Propriétés intrinsèques: propriétés de chacun des éléments constitutifs du matériau*
2. *Assemblage: la manière dont les éléments constitutifs du matériau sont agencés*
3. *Procédés: procédés d'élaboration de la surface du matériau*

FIG. 1 – Approche

Ce travail a donc été organisé de la façon suivante :

- La première partie situe le travail dans son contexte bibliographique. La revue des acquis antérieurs concernant la métrologie de la rugosité, les perceptions tactiles et visuelles et les diverses tentatives de corrélation des mesures sensorielles avec les mesures instrumentales permettra d'appréhender les problématiques liées à la métrologie du toucher. Cette revue permettra aussi de définir les paramètres qui doivent être pris en compte dans la corrélation entre les données physiques et les données sensorielles et de définir clairement la méthodologie de travail.
- Dans la deuxième partie, nous détaillerons notre démarche expérimentale, en précisant la fabrication des échantillons et la mise en place des expérimentations faisant intervenir : l'analyse sensorielle et les mesures physiques liées au toucher et à la vision.
- La présentation des résultats des caractérisations physiques de la rugosité de surface et de l'aspect visuel du bois est abordée dans la troisième partie. On parlera ainsi des paramètres 3D de rugosité de surface, des analyses statistiques des coordonnées (L, a, b) des pixels des images de la surface des échantillons et des analyses spatiales de la répartition de ces pixels dans les images.
- Dans la quatrième partie seront étudiés les résultats des analyses sensorielles. On

parlera notamment des descripteurs du toucher du bois, des résultats du classement sensoriel des échantillons et de l'espace de perception de la rugosité du bois. Ensuite, nous avons repris l'ensemble des résultats en essayant d'établir différentes relations entre les mesures physiques et les résultats sensoriels. Pour ce faire, nous avons travaillé sur des modèles de corrélations linéaires simples entre les paramètres de rugosité et les résultats des classements. Enfin, une analyse en composantes principales entre les paramètres de rugosité et les coordonnées des espaces de perception de la rugosité permet de compléter ces résultats en combinant les paramètres.

Chapitre 1

Étude bibliographique

Cette revue bibliographique permettra de savoir ce qu'on évalue quand on touche la surface du bois et de soulever clairement les questions sur les méthodes de mesure de rugosité qui conviennent pour atteindre l'objectif qu'on s'est fixé, c'est-à-dire, la métrologie des propriétés psychosensorielles liées à la rugosité tactile et visuelle des matériaux bois et ses dérivés.

1.1 Phénoménologie et métrologie de la rugosité du bois

Dans ce paragraphe sont d'abord analysés les facteurs qui conditionnent la rugosité du bois et des composites à base de bois. Dans une seconde partie, les méthodes de métrologie de la rugosité sont présentées, y compris les diverses méthodes d'acquisition des profils topographiques de surface, avec les analyses des avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes pour une application aux matériaux bois.

1.1.1 Les facteurs influençant la rugosité du bois

On désigne par rugosité les aspérités et les creux d'une surface mesurée par rapport à la surface moyenne assimilée localement à un plan [12]. Les facteurs qui interviennent dans la rugosité du bois peuvent être rassemblés en trois groupes :
- les propriétés intrinsèques au matériau,
- l'assemblage,
- le procédé d'usinage appliqué en surface.

1.1.1.1 Les propriétés intrinsèques

Les propriétés intrinsèques concernent les propriétés de chaque élément constitutif du matériau. Le bois est un matériau d'origine biologique résultant du fonctionnement d'une assise de cellules : le cambium libéro-ligneux. Le pin maritime fait partie de la famille des résineux, son bois est constitué d'un ensemble de cellules allongées, dont la majorité (90-95%) est orientée dans la direction longitudinale du tronc de l'arbre (trachéides longitudinales ou fibres ligneuses) tandis que 5-10% sont alignés dans le plan radial (ce sont les parenchymes radiales). Ces cellules allongées ont une longueur de 3 à 4 mm, une

section presque carrée ou rectangulaire de l'ordre de 30 μm x 30 μm [75]. Les cellules sont organisées selon des cernes annuels concentriques.

Les composants chimiques du bois, notamment la cellulose et l'hémicellulose, sont de nature hygroscopique, c'est-à-dire que le bois tend vers un état d'équilibre entre son degré d'humidité et celui de la condition ambiante. L'ambiance influe ainsi sur la rugosité de surface car lors de l'absorption ou du rejet de l'eau, la taille et la forme des cellules changent. On peut aussi mentionner les rôles des métabolites secondaires tels que les tanins ou les corps gras.

1.1.1.2 L'assemblage

On entend par assemblage la manière donc chaque élément constitutif du matériau est agencé. Pour le bois, l'assemblage concerne l'agencement des cellules entre elles. Pour les matériaux dérivés du bois, il s'agit de l'agencement des particules et des autres constituants.

1.1.1.2.1 Les plans ligneux du matériau bois Le bois est un matériau poreux et anisotrope. Sa rugosité de surface est conditionnée par l'organisation des cellules qui le constituent. Selon la direction d'exploration choisie, les profils d'état de surface révélés sont différents. La figure 1.1 illustre le plan ligneux caractéristique des résineux.

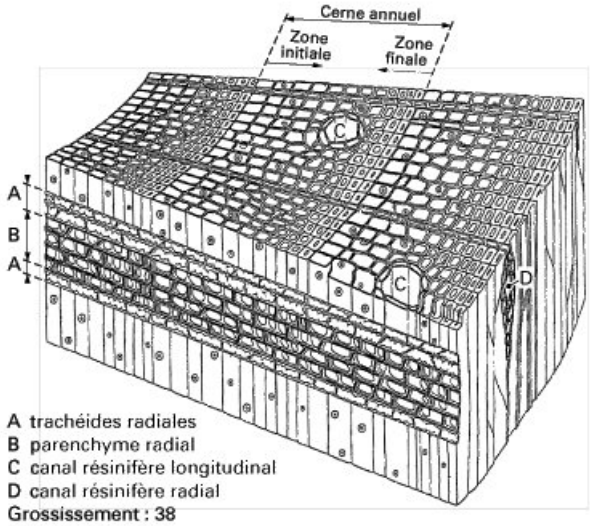


Fig. 1.1 – Le plan ligneux du bois de résineux [111]

Selon la direction de prélèvement de la surface du bois, on remarque que :
- sur le plan radial (correspondant à la direction de croissance en diamètre), la surface révèle les sections droites des cellules ligneuses orientées majoritairement suivant l'axe du tronc et, en proportion beaucoup moins grande, les sections longitudinales des rayons ligneux,

- sur le plan tangentiel (tangent aux cernes annuelles), la surface révèle les alignements longitudinaux des trachéides et parfois les sections droites des rayons ligneux,
- sur le plan longitudinal (dans le sens des fibres), la section révèle essentiellement les alignements des rayons ligneux et les alignements des cellules longitudinales.

Il est donc nécessaire dans l'étape expérimentale de ce travail de savoir sur quel plan ligneux l'échantillon de bois est prélevé afin de connaître la composition de la surface étudiée.

Dans un même plan ligneux, on note la distinction entre bois initial et bois final constituant les cernes annuels. En effet, dans le bois initial, les cellules ont une cavité à forte section et une épaisseur de paroi cellulaire réduite. Les proportions sont inversées dans le bois final. Le plan radial du bois illustré par la figure 1.1 permet de souligner la différence de rugosité entre le bois initial, qui est beaucoup plus dense, et le bois final.

1.1.1.2.2 Zone de prélèvement et autres singularités La rugosité peut aussi varier selon que l'échantillon est prélevé dans le bois d'aubier ou dans le bois de duramen. L'aubier, de couleur claire, se situe à la périphérie du tronc. Il est constitué de cellules vivantes conduisant la sève brute. Le duramen, de couleur foncée, se situe dans la portion centrale du tronc. Il est constitué de cellules mortes qui contiennent les extractifs et jouent un rôle de soutien (figure 1.2). Il faut noter enfin la présence de singularités comme les noeuds ou les arrachements des fibres qui peuvent modifier la rugosité de surface.

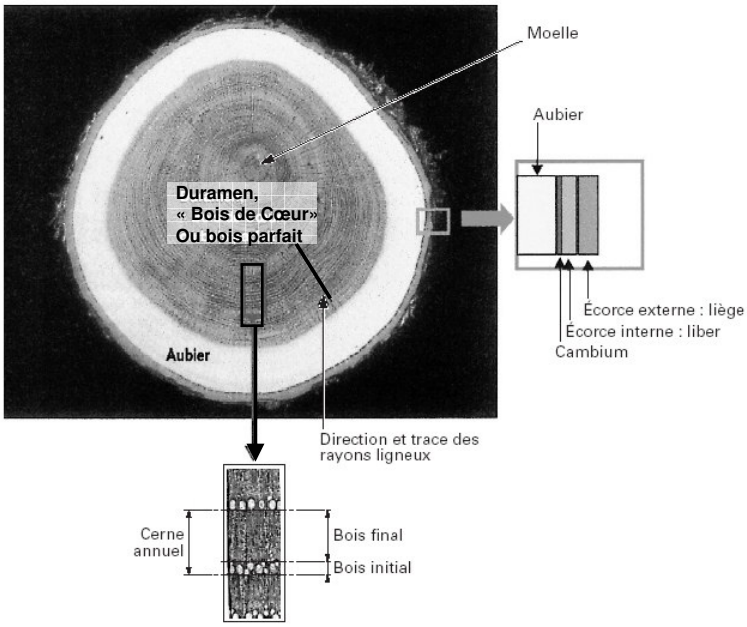
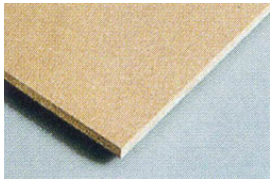
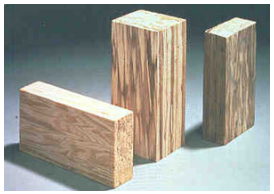


Fig. 1.2 – Structure du tronc dans l'arbre [111]

1.1.1.2.3 Agencement des matières des matériaux dérivés du bois Sous l'appellation de panneaux dérivés du bois, on regroupe des matériaux dont la matière première

est du bois sous différentes formes (massif, placage, fibres, particules) assemblé avec ou sans adjonction d'adhésif. Leur procédé de fabrication permet de s'affranchir des limites dimensionnelles imposées par l'arbre. Ces matériaux fabriqués industriellement se caractérisent par l'homogénéité de leurs caractéristiques physico-mécaniques. La nature du collage est diverse et détermine le domaine d'emploi de ces panneaux. Par exemple, une colle urée-formol est appropriée pour les utilisations en milieu sec, un produit urée-mélamine-formol ou du phénol-formol pour les emplois pouvant être exposés à l'humidité [91]. Le tableau 1.1 présente les caractéristiques des différents types de matériaux dérivés du bois étudiés dans cette thèse. D'avantages de détails sont présentés en annexe B.

Appellation	**Composition du matériau**	**Composition de la surface**	**Images**
Contreplaqué	Empilage de plis croisés de bois seuls ou associés à une âme (de panneau latté ou lamellé) ou à des feuilles de matériaux non dérivés du bois. La cohésion entre les couches de l'empilage est assurée par un liant organique	Plaquage issue du déroulage avec les fibres orientées longitudinalement et les défauts de surface (éclats, arrachements)	
Panneau de fibres MDF	Fibres de ligno-cellulosiques lavées et collées, avec ou sans adjonction de liant synthétique, sous l'action de la chaleur et de la pression	Fibres enchevêtrées et colle	
Oriented Strand Board	Grandes lamelles orientées de dimension 5-6 cm/1 cm liées entre elles par un collage organique	Grandes lamelles et colle	
Panneau de particules	Particules de bois (grands copeaux, particules, copeaux de rabotage, sciures) et/ou autre matériau lignocellulosique en formes de particules (amas de chanvre, amas de lin, fragments de bagasse) avec addition d'un liant organique ou d'un liant minéral	Particules enchevêtrées et colle	
Bois reconstitué PSL	Bandes de placages étroites et longues (chutes de placages de 3 mm par 2400 mm) disposées à fils parallèles, encollées et pressées en continu	Plaquage avec les défauts de surface	

TAB. 1.1 – Structure des matériaux composites à base de bois étudiés

Comme indiqué dans le tableau 1.1, la rugosité diffère selon la nature des divers matériaux. La rugosité est la résultante de plusieurs facteurs tels que la taille des fibres/copeaux, leur répartition, leur densité ainsi que la proportion de liant. Le panneau de fibres semble le plus homogène en termes d'état de surface et de couleur car il est constitué de la plus petite unité (fibres de bois de très petite taille, de l'ordre de 30 à 40 μm pour le pin) mélangée avec de la colle.

1.1.1.3 Procédé d'élaboration de la surface

Les différents procédés d'élaboration des surfaces de bois sont résumés selon la figure 1.3 [110].

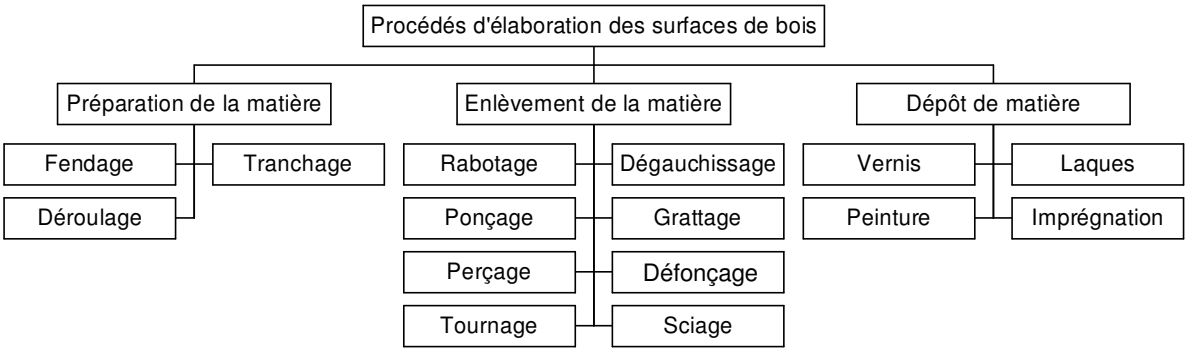


FIG. 1.3 – Procédés d'élaboration des surfaces de bois [110]

Depuis les années 50, plusieurs études rendent compte de l'état de surface obtenu par différents procédés d'usinage.

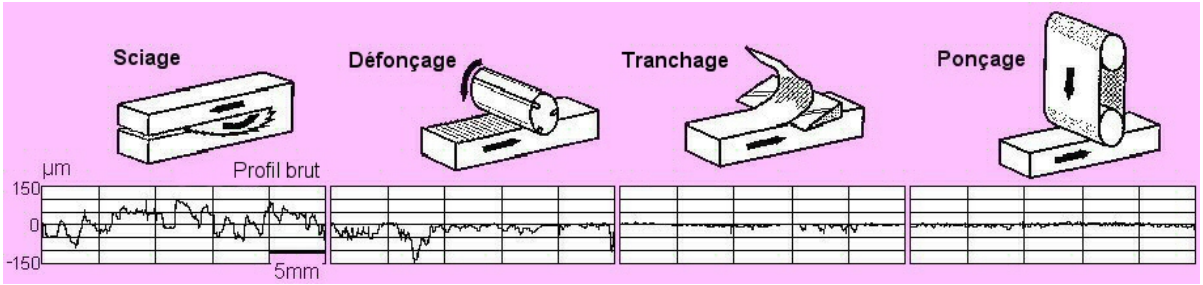


FIG. 1.4 – Effet du type d'usinage sur la rugosité du bois [97]

Chaque type de procédé induit des états de surface différents. Le ponçage, par exemple, fait apparaître des stries orientées dans le sens de ponçage. L'application de vernis ou de lasure masque complètement ou en partie les porosités naturelles de la surface de bois suivant la quantité appliquée. Pour illustrer cela, la figure 1.4 montre les profils de rugosité de surface correspondant à quatre types d'usinage du bois, d'après Sadoh [97]. L'amplitude de la rugosité de surface diminue dans l'ordre suivant : sciage, défonçage, tranchage, ponçage.

Il est classique de trouver dans la littérature des travaux concernant l'effet de l'usinage sur la rugosité de surface [24, 72, 77]. Dans le cas de l'usinage à grande vitesse notamment, l'augmentation de la vitesse de coupe limiterait le phénomène le peluchage (les relèvements des fibres non coupées par l'arête sont limités) et permettrait d'obtenir une surface plus lisse. Chen [18] a étudié l'effet des vitesses de ponçage et des tailles de grains sur les paramètres de rugosité. Plusieurs études ont été réalisées concernant l'effet des paramètres d'usinage (l'espèce de bois, pression, type d'abrasifs, orientation du ponçage et taille des grains) sur les paramètres de rugosité du bois [17, 73, 108] et des composites à base de bois [14, 57].

1.1.1.4 Résultante des trois facteurs

La résultante de ces trois facteurs influençant la rugosité du bois (propriétés intrinsèques, assemblage, procédés) crée des surfaces particulières. Pour illustrer l'action conjointe des propriétés anatomiques du bois et de l'usinage, on peut prendre l'exemple de l'action de l'arrête de coupe sur le bois initial et le bois final. Celle-ci génère des hétérogénéités du fait des caractéristiques mécaniques et de la densité très contrastées du bois initial et du bois final [23, 40]. Par ailleurs, la coupe rotative dans la direction du bois entraîne souvent une alternance de surfaces lisses et rugueuses :

- dans la zone des bois de printemps où les fibres sont plus tendres, la coupe entraîne la fente des fibres, laisse de nombreux lumens et crée ainsi une surface rugueuse,
- dans la zone des bois d'été, l'arête de coupe passe entre les fibres (dans la paroi cellulaire) et entraîne leur dissociation. Il en résulte beaucoup moins de vallées et une surface beaucoup plus lisse.

La coupe rotative des surfaces tangentielles entraîne le même phénomène mais les surfaces les plus lisses ne suivent pas forcément le même plan que précédemment et ne sont pas forcément localisées dans les zones de bois d'été.

Connaissant les différents facteurs qui conditionnent l'état de surface du bois et ses dérivés, on peut aborder les différentes méthodes instrumentales de caractérisation des états de surface.

1.1.2 Analyse instrumentale des états de surface

Afin de caractériser d'une manière objective la rugosité de surface, plusieurs méthodes d'analyse existent. On peut citer la profilométrie, l'analyse sensorielle ou la tribologie. Pour cette étude, deux méthodes ont été utilisées : la profilométrie et l'analyse sensorielle.

1.1.2.1 Profilométrie

1.1.2.1.1 Évolution dans le temps Depuis les années 30, les chercheurs ont commencé à utiliser les techniques de profilométrie pour caractériser la rugosité des surfaces. L'étude des paramètres s'est beaucoup développée depuis. Les principes, les définitions, la

terminologie, les critères, les symboles et les indications pour la cotation des états de surface sont normalisés au niveau international par une série de normes ISO [2]. Le problème de la caractérisation a été largement débattu face au nombre important (plus d'une centaine) de paramètres définis par les normes ; d'autant plus que plusieurs paramètres sont corrélés entre eux. Les critères les plus communément utilisés dans l'industrie du plastique et du métal sont les paramètres 2D : R_a, R_q, R_t, R_z et R_p qui sont des paramètres d'amplitude facilement mesurables [88, 114]. La majorité des travaux ainsi que les normes existantes concernent les systèmes de mesure en deux dimensions. Pourtant, l'analyse de surface en 2D possède certaines limites quant à la caractérisation d'une surface, elle ne donne pas suffisamment d'informations notamment sur la directionnalité et l'isotropie de la surface. Récemment, les progrès de la microinformatique et le développement des techniques de mesures ont conduit au développement de la topographie 3D. La cartographie 3D permet de rendre compte des phénomènes mettant en jeu les surfaces, notamment si celles-ci sont anisotropes ou si elles présentent des irrégularités. C'est la raison pour laquelle ce sont les paramètres 3D qui sont pris en compte dans cette étude.

1.1.2.1.2 Les différents systèmes d'acquisition de profil de surface 3D Il existe différents types de systèmes de mesure en 3D des profils de surface [66]. Ils peuvent être classifiés selon la figure 1.5.

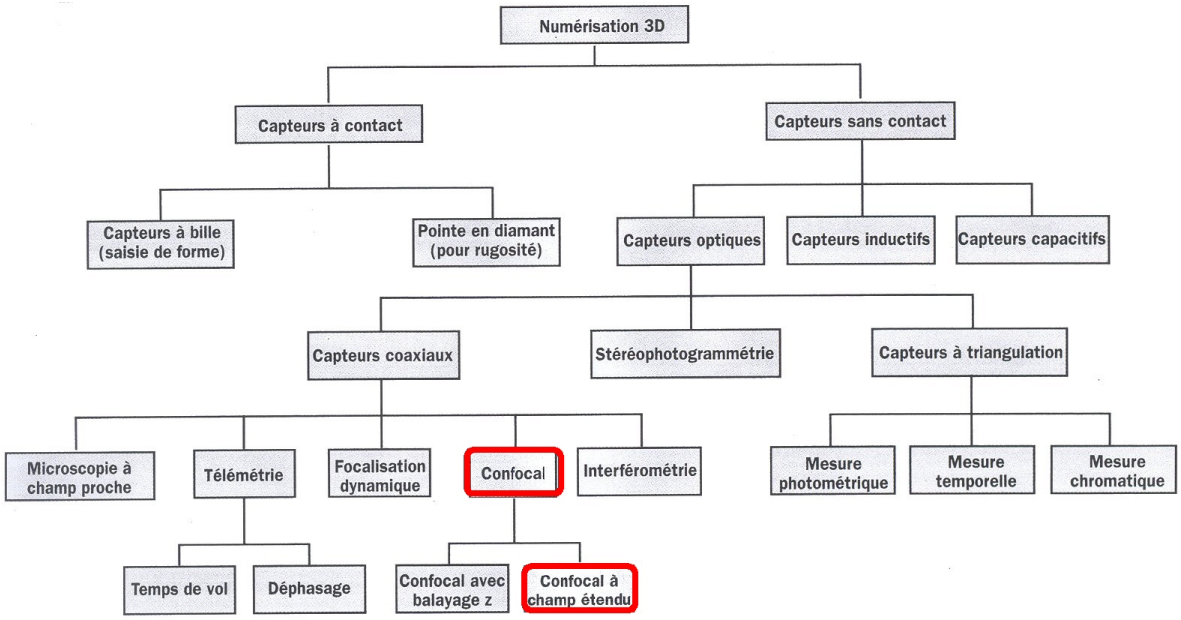
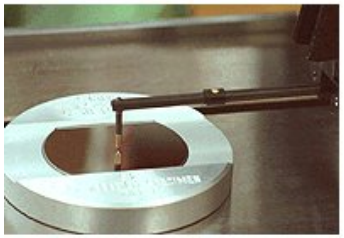
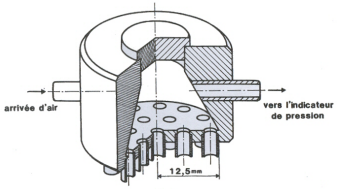


FIG. 1.5 – Classification des principes physiques de numérisation 3D [65]
Les méthodes que nous allons utiliser dans ce travail sont encadrés en gras

Pour une application au bois, un grand nombre de méthodes de mesure ou d'estimation de la rugosité a été testé. Plusieurs auteurs se sont attachés à les étudier et les comparer entre elles. Les caractéristiques, avantages et limites des trois méthodes de mesure les plus utilisées dans le domaine du bois sont présentés dans le tableau 1.2 ci-après.

Nom	Descriptifs	Avantages	Limites	Auteurs
Palpeur mécanique 	Les déplacements verticaux du palpeur produisent dans un circuit électrique approprié des variations de tension pouvant être amplifiées et enregistrées	Le plus utilisé dans le domaine du bois et a fourni bon nombre de résultats expérimentaux	– Le rayon de courbure de la pointe du palpeur fixe la sensibilité du rugosimètre – La pointe du palpeur peut créer des microdéformations (fibres relevées ou rayures) en surface des matériaux lors de l'analyse	[14, 41, 46, 57, 84, 108, 113]
Méthode pneumatique 	De l'air sous pression est insufflé par une buse et détermine la « rugosité absolue » par la chute de pression enregistrée sur la colonne d'eau au niveau de cette buse	Rapidité de la mesure	– Il y a une valeur seuil au-delà de laquelle le pouvoir de ségrégation de l'appareil décroît considérablement – Obtention d'une valeur absolue de la rugosité	[84]
Rugosimètre laser	Le principe de mesure repose sur les différences de temps d'émission et de réflexion d'un faisceau laser monochromatique aux différents points de la surface	– Rapidité d'acquisition – Aucun contact entre le capteur et la surface des matériaux	Artefact possible dû à l'influence de la couleur sur les profils enregistrés	[47, 69, 73, 77, 79]

TAB. 1.2 – Caractéristiques de différents rugosimètres utilisés dans la bibliographie pour une application au bois

Le palpeur mécanique est l'instrument le plus utilisé dans le domaine du bois et celui-ci a déjà fourni bon nombre de résultats expérimentaux, dans le cas de bois massifs bruts de sciage [46, 108, 110] ou poncés [113], de composites MDF [14, 57], de placages [84] ou de contreplaqués [41].

Depuis quelques années, le rugosimètre laser est de plus en plus utilisé [98]. Fujiwara [48] a notamment comparé la méthode laser et la méthode à palpeur. Ses études (figure 1.6a) montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les profils acquis par ces deux instruments sur du matériau bois poncé. Par contre, l'observation de la figure 1.6b permet de mettre en évidence une différence entre les deux méthodes pour une application aux surfaces peintes. Contrairement aux surfaces poncées, des composants de grandes et petites fréquences sont superposés sur le profil primaire pour la méthode laser, ce n'est pas le cas pour la méthode à palpeur.

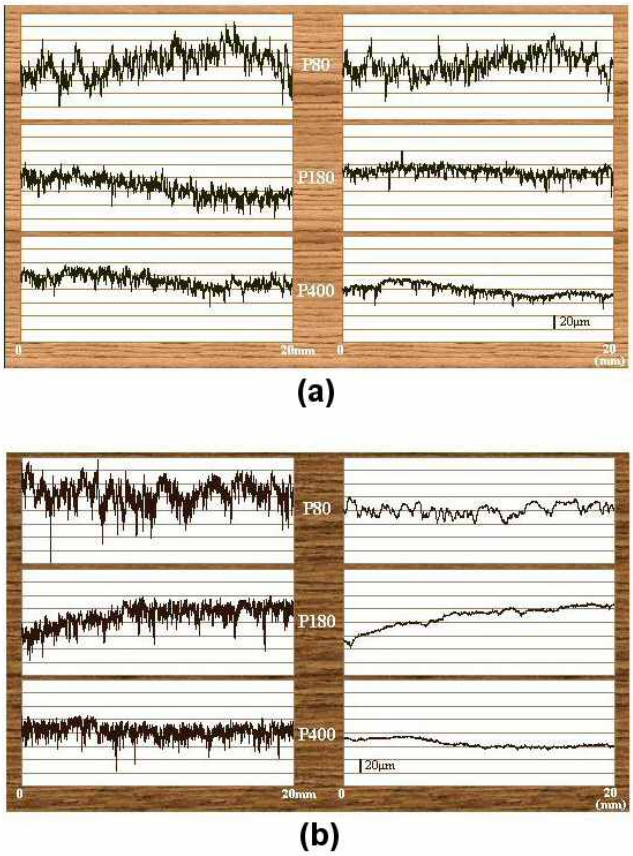


Fig. 1.6 – Profils mesurés par la méthode laser à gauche et par la méthode à palpeur à droite : a) sur du hêtre poncé b) sur du hêtre poncé puis peint [48]

Selon les comparaisons du tableau 1.2 et les travaux de Fujiwara (figure 1.6), chacun des instruments d'acquisition de rugosité de surface couramment utilisés sur le bois présente des inconvénients plus ou moins importants selon chaque instrument. La méthode laser nous semble la plus adaptée même si celle-ci peut être sensible à la variation de couleur dans le cas des surfaces à fort contraste de couleur [69].

Une autre méthode d'acquisition de la topographique proposée sur le marché nous semble très intéressante mais celle-ci n'a pas encore été utilisée sur le matériau bois. Il s'agit du rugosimètre confocal. Celle-ci présente l'avantage de ne présenter aucune interaction mécanique entre le capteur et la surface étudiée et d'être insensible à la variation de couleur ; ce qui est un avantage décisif car le matériau bois est un matériau texturé colorimétriquement. Ses caractéristiques détaillées sont les suivantes : le rugosimètre confocal est une technique d'acquisition optique point par point qui fonctionne sous le principe de l'imagerie confocale à champ étendu. Une source de lumière polychromatique blanche (S) est décomposée par un crayon optique à forte aberration optique (L) en un continuum d'images monochromatiques uniformément réparties sur un segment de droite de longueur égale à la profondeur de champ requise. La lumière renvoyée par la surface de l'objet traverse en retour inverse l'objectif L et après réflexion sur une lampe réfléchissante atteint le filtre spatial P. Le filtrage spatial sélectionne la lumière provenant du point de mesure M : la lumière provenant d'un point situé axialement au-dessus et au-dessous de M est filtré. Le signal lumineux transmis par le filtrage spatial est analysé au moyen d'un spectrographe. Le calcul consiste à déterminer le maximum de la courbe d'intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde par la méthode du barycentre. En effet, la présence d'un objet au niveau du point M engendre un maximum d'intensité lumineuse à la longueur d'onde λ_M correspondant à ce point. La connaissance de λ_M renseigne sur l'altitude de ce point. Grâce à ce système de codage chromatique de l'information, la mesure est insensible aux variations de réflectivité de l'objet et à leur état de surface (poli ou non, diffusant ou spéculaire). Il existe plusieurs capteurs permettant la mesure à différentes profondeurs de champ [65].

En raison de ces arguments, le rugosimètre confocal a été choisi pour réaliser ce travail de thèse. Le rugosimètre laser a été utilisé en complément du rugosimètre confocal pour permettre de comparer les mesures d'état de surface de nos échantillons.

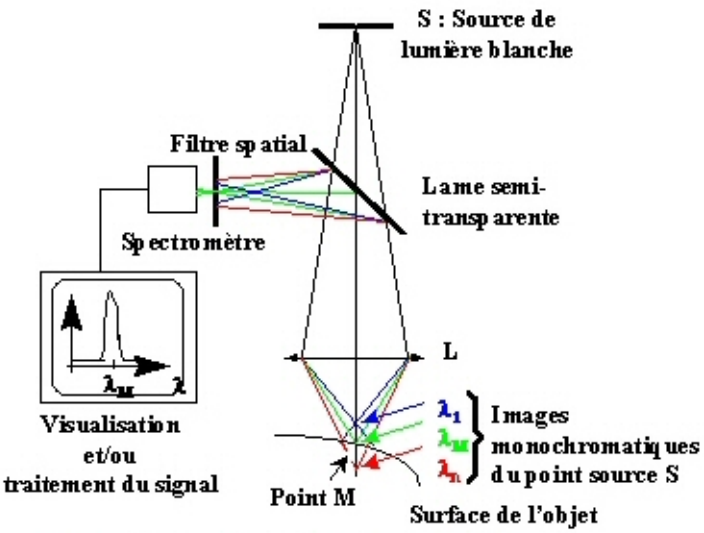


FIG. 1.7 – Principe d'acquisition d'un rugosimètre confocal [65]

1.1.2.1.3 Les modes de présentation des résultats : les profils de rugosité Les systèmes d'acquisition balayent les surfaces suivant une direction $\vec{x}$. La représentation surfacique 3D consiste en la mise côte à côte suivant la direction $\vec{y}$ de plusieurs profils parallèles. Le profil est donc enregistré comme un ensemble de NxM données acquises à des intervalles discrètes (Δx et Δy) et la surface est considérée comme une fonction de z(x, y) donnant l'altitude de tout point dans un système de coordonnées cartésiennes (figure 1.8).

Les paramètres de rugosité sont calculés en considérant les hauteurs et les distributions des différents points constituant les profils de rugosité.

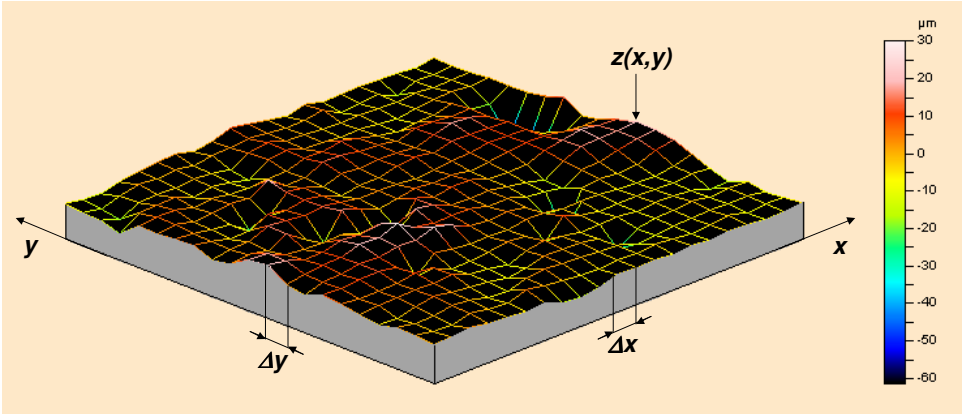


FIG. 1.8 – Carte des altitudes reconstituées

1.1.2.1.4 Traitement du signal Selon les besoins, les paramètres de rugosité sont calculés soit sur le profil brut, sur le profil d'ondulation ou sur le profil de rugosité. La séparation des divers profils est obtenue par une procédure que l'on appelle « filtrage ». Pour ce faire, le profil est considéré comme composé d'une gamme de fréquences :

- les grandes fréquences spatiales (faible longueur d'onde) correspondent à celles qui sont perçues comme « rugueuses »,
- les petites fréquences spatiales (forte longueur d'onde) correspondent à des changements un peu plus graduels dans le profil et sont souvent associées aux termes « ondulations ».

Le filtre peut être :

- passe-haut : qui fait passer les fréquences au-dessus d'un certain seuil, c'est-à-dire la rugosité,
- passe-bas : qui fait passer les fréquences au-dessous d'un certain seuil, c'est-à-dire l'ondulation,
- passe-bande : appliquant à la fois des filtres passe-haut et passe-bas.

Le filtre est caractérisé par sa longueur de coupure (ou « cut-off » en profilométrie). Ce terme désigne la longueur, arbitrairement choisie, qui sera prise pour limite entre les basses fréquences et les hautes fréquences, c'est-à-dire la fréquence au-dessus ou au-dessous de laquelle les composants sont extraits ou éliminés. Le choix de cette longueur est primordial puisqu'il détermine la pondération entre « rugosité » et « ondulation » [13]. Le choix est déterminé selon la fonction attendue de la surface : par exemple, ce qui est considéré comme « rugosité » dans l'essieu automobile serait considéré comme « ondulation » dans

les broches des montres. Dans ce travail de thèse où l'on étudie le contact du doigt avec la surface, une réflexion a été conduite sur le choix judicieux de la longueur de coupure en fonction de la sensibilité du doigt. Ce point sera développé plus tard dans le paragraphe 2.2.1.2.1.

Le principe de filtrage d'un profil peut être illustré par la figure 1.9 qui représente un profil de surface non filtré ainsi que les profils d'ondulations et de rugosités correspondants.

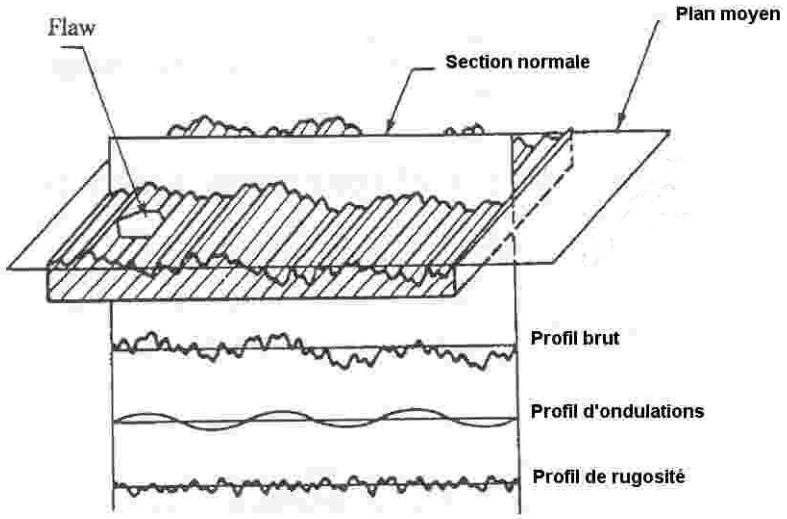


FIG. 1.9 – Principe de filtrage d'un profil [93]

1.1.2.1.5 Les paramètres d'état de surface Jusqu'à ce jour, il n'existe pas encore de normalisation pour les paramètres 3D. Une avancée a été initiée en 1993 par la communauté européenne dans le cadre d'un programme international dans le but de développer une mesure standard de surface 3D. Le rapport EUR 15 178 propose une combinaison de treize paramètres tridimensionnels numériques pour caractériser une topographie de surface [10, 33, 34, 35, 36]. Ces paramètres ont été sélectionnés en considérant trois principes :

- seuls les phénomènes importants ont besoin d'être décrits,
- les paramètres ne sont pas corrélés entre eux,
- minimiser le nombre de paramètres.

Ces paramètres sont des extrapolations des paramètres 2D normalisés [2]. Ils sont définis par rapport à un plan moyen (ou plan de référence) obtenu par redressement par la méthode des moindres carrés de la surface mesurée de telle sorte que la somme des écarts à partir de ce plan moyen soit minimale. Les altitudes sont par la suite centrées autour de cette ligne.

Les treize paramètres de rugosité peuvent être regroupés dans quatre familles de paramètres (figure 1.10) :

- paramètres d'amplitude,
- paramètres spatiaux,
- paramètres hybrides,

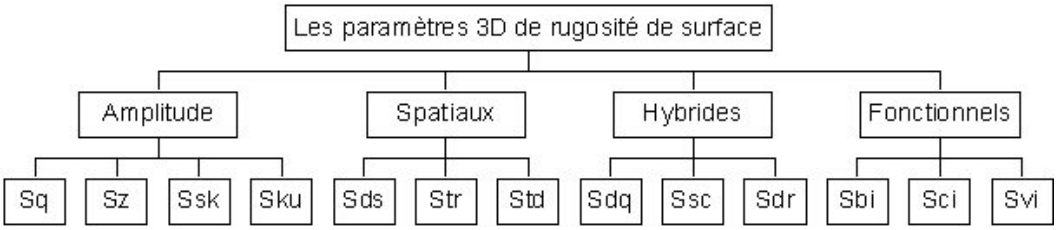


FIG. 1.10 – Les paramètres surfaciques de rugosité selon le rapport EUR 15 178 [10]

– paramètres fonctionnels.

Paramètres d'amplitude Les paramètres d'amplitude caractérisent les irrégularités dans la direction verticale de la surface. Ce sont les extensions des paramètres déjà définis en deux dimensions.

S_q : Moyenne quadratique des écarts à la moyenne

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN}\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=0}^{M}\eta^2(x_i, y_j)} \tag{1.1}$$

avec :
– M : nombre de points suivant l'axe X
– N : nombre de points suivant l'axe Y
– $\eta(x_i, y_j)$: valeurs brutes redressées de l'altitude rugosimétrique par rapport au plan moyen

C'est un paramètre de dispersion défini comme la valeur de la racine carrée moyenne de la déviation de la surface à l'intérieur de la zone échantillonnée (équivalent à R_q en 2D). Du fait de la puissance 2, il est plus sensible aux valeurs extrêmes des données que la moyenne arithmétique des écarts à la moyenne S_a. Sa valeur est influencée par la taille de la surface échantillonnée, celle-ci est peu influencée par le pas d'acquisition.

S_{5z} : Hauteur des dix points de la surface

C'est un paramètre extrême défini comme la moyenne de la distance entre les cinq plus grands pics et les cinq plus profonds creux à l'intérieur de la zone échantillonnée. Un voisinage 3x3 est pris en considération pour trouver les pics et le creux.

$$S_{5z} = \frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^{5}|\eta_{pi}| + \sum_{i=1}^{5}|\eta_{vi}|\right), i = 1, 2, ..., 5 \tag{1.2}$$

Avec : η_{pi} et η_{vi} : respectivement les cinq plus hauts sommets et les cinq plus profonds creux, qui sont reliés sur les huit sommets voisins.

Etant donné que la valeur de ce paramètre est dominée par les valeurs extrêmes, S_{5z} est influencé par la taille de la surface et le pas d'acquisition.

S_{sk} : Symétrie de la courbe de distribution des profondeurs ou skeweness de la distribution des hauteurs de la topographie

$$S_{sk} = \frac{1}{NMS_3^q} \sum_{j=0}^{N} \sum_{i=0}^{M} \eta^3(x_i, y_j) \tag{1.3}$$

C'est la mesure de l'asymétrie des déviations de la surface par rapport au plan moyen. Sa signification est illustrée par la figure 1.11, telle que :

S_{sk}=0 : pour une surface gaussienne dont la distribution des altitudes est symétrique,

$S_{sk} \prec -1$: quand la surface comporte plus de creux que de pics par rapport au plan moyen (le maximum de la courbe de distribution d'amplitude se situe au-dessus de la ligne moyenne)

$S_{sk} \succ 1$: quand la surface comporte plus de pics que de creux par rapport au plan moyen.

L'effet de la présence de valeurs extrêmes d'aspérités, même en faible nombre, sur les valeurs de S_{sk} est significatif. Ce paramètre n'est donc pas adapté à certaines fonctions fonctionnelles car l'existence de faible nombre de valeurs extrêmes n'influence pas sur les propriétés d'adhésion. En ce qui concerne le toucher, ce paramètre pourrait représenter la perception de la rugosité car la sensation tactile est influencée par les valeurs extrêmes, même en faible proportion [56].

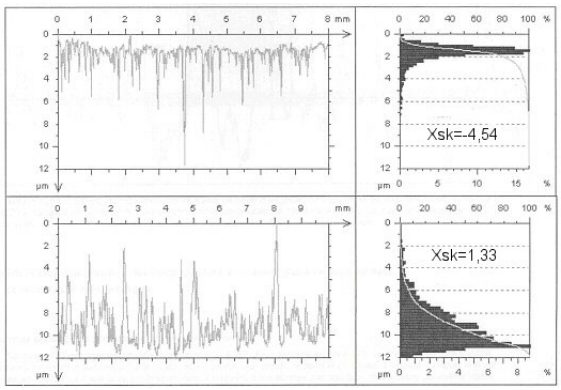


FIG. 1.11 – Représentation graphique de deux profils de rugosité présentant des valeurs positives et négatives de S_{sk}

S_{ku} : Aplatissement de la courbe de distribution des profondeurs ou kurtosis de la distribution des hauteurs de la topographie

$$S_{ku} = \frac{1}{NMS_4^q} \sum_{j=0}^{N} \sum_{i=0}^{M} \eta^4(x_i, y_j) \tag{1.4}$$

C'est la mesure de l'élargissement de la courbe de distribution des altitudes, c'est-à-dire le plus ou moins grand regroupement des points autour de la moyenne. Sa signification

est illustrée par la figure 1.12, telle que :

S_{ku}=3 : pour une surface gaussienne,

$S_{ku} \prec 3$: pour une distribution des altitudes élargie par rapport au plan moyen,

$S_{ku} \succ 3$: pour une distribution des altitudes resserrée autour du plan moyen.

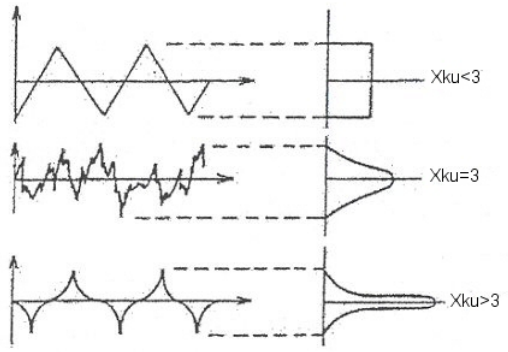


FIG. 1.12 – Représentation graphique de trois profils de rugosité appartenant aux trois classes de signification de S_{ku}

L'existence de valeurs extrêmes peut induire une valeur très élevée de S_{ku}, pouvant aller jusqu'à 100. Ce dernier est faiblement sensible au pas d'acquisition.

Paramètres spatiaux Les propriétés spatiales de la surface sont les plus difficiles à décrire à l'aide d'un paramètre à cause des textures aléatoires ou des textures à des longueurs d'ondes multiples. Les paramètres spatiaux caractérisent les irrégularités dans la direction horizontale du profil, ils sont particulièrement utiles pour faire la distinction entre les surfaces texturées et les surfaces à structures aléatoires. Ils sont calculés à partir de certaines techniques comme la fonction d'autocorrélation ou la densité spectrale de puissance définies en annexe A.

S_{ds} *:Densité des sommets (pics/mm^2)*

C'est le nombre de sommets ramené à une unité de surface. Un point est considéré comme sommet s'il est plus haut que ses huit voisins.

$$S_{ds} = \frac{\text{Nombre de sommets}}{(M-1)\,.\,(N-1)\,.\Delta x.\Delta y} \tag{1.5}$$

Avec Δx : pas d'échantillonnage en X,

Δy : pas d'échantillonnage en Y.

S_{tr} *: Rapport d'aspect de la texture*

Ce paramètre reflète l'isotropie (ou l'anisotropie) de la surface. Il est compris entre 0 et 1. Il est calculé à partir de la fonction d'autocorrélation.

$$S_{tr} = \frac{\text{distance de la plus rapide longueur de décroissance à 0,2 de l'autocorrélation}}{\text{distance de la plus lente longueur de décroissance à 0,2 de l'autocorrélation}} \tag{1.6}$$

Si $S_{tr} \prec 0{,}3$: la surface est dite anisotrope, c'est-à-dire qu'elle présente une structure orientée et/ou périodique,

Si $S_{tr} \succ 0{,}5$, la structure est dite isotrope, c'est-à-dire qu'elle présente des caractéristiques uniformes dans toutes les directions.

Ce paramètre peut être intéressant du point de vue du toucher car le doigt peut détecter une orientation privilégiée de la texture.

S_{td} :Directionnalité de la texture

Ce paramètre donne l'orientation privilégiée de la texture présente sur la surface par rapport à l'axe Y. La direction des textures est exprimée par un angle, un angle négatif est donné à une texture ressemblant à celle figurant sur le côté gauche de la figure 1.13, une texture comme sur le côté droit de la figure 1.13 se voit attribuer un angle positif. Par cette définition, la direction de la texture est égale à 0° si la surface s'étend parallèlement à l'axe Y.

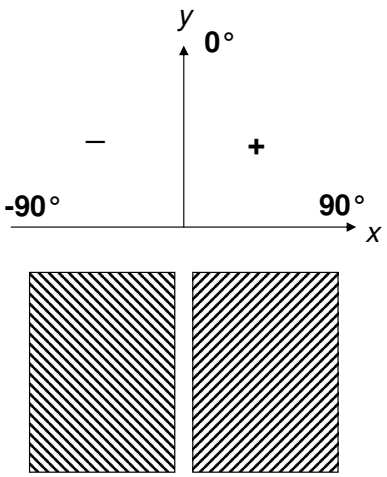


FIG. 1.13 – Expression de la direction de la texture au moyen de la mesure de l'angle par rapport à l'axe Y

$$\begin{cases} S_{td} = \beta & \text{pour } \beta \leq \pi/2 \\ S_{td} = \pi - \beta & \text{pour } \pi/2 \leq \beta \leq \pi \end{cases} \tag{1.7}$$

Avec β : position où la valeur maximale du spectre angulaire apparaît.

La validité de ce paramètre est soumise à certaines conditions :
– S_{td} n'a de sens que si $S_{tr} \prec 0{,}5$,

- Si la surface présente une texture circulaire, ce paramètre donnera une direction erronée proche de la tangente du cercle,
- Si la surface présente deux ou plusieurs directions privilégiées, le paramètre donnera l'angle de la direction principale.

Le paramètre S_{td} pourrait être relié à la perception tactile pour les mêmes raisons que S_{tr}.

Paramètres hybrides Les paramètres hybrides combinent à la fois des informations d'amplitude et des informations spatiales.

$S_{\Delta q}$ *:Pente quadratique moyenne de la surface (en $\mu m/\mu m$)*

$S_{\Delta q}$ décrit le caractère plus ou moins abrupt des pics et des creux. Ce paramètre est relativement faible pour une surface rodée ou rectifiée. Il est sensible au pas d'acquisition.

S_{sc} *: Courbure moyenne arithmétique aux sommets (en μm^{-1})*

Ce paramètre permet de connaître la forme moyenne des sommets : soit aiguë, soit arrondie, d'après la valeur moyenne de la courbure de la surface en ces points. Celle-ci est obtenue par approximation polynomiale de la fonction qui permet de relier le sommet avec quatre points pris dans quatre directions entourant ce sommet. Ce paramètre est sensible au pas d'acquisition.

$$S_{sc} = \frac{1}{2}.\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\delta\eta^2(x,y)}{\delta x^2} + \frac{\delta\eta^2(x,y)}{\delta y^2}\right)_{\text{pour chaque sommet}} \tag{1.8}$$

Avec n= nombre de sommets

S_{dr} *: Surface développée*

Ce paramètre indique la « complexité » de la surface par le rapport entre la surface curviligne et la surface du support. Il est sensible au pas d'acquisition.

$$S_{dr} = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M} A_{ij} - (M-1).(N-1).\Delta x.\Delta y}{(M-1).(N-1).\Delta x.\Delta y} \tag{1.9}$$

S_{dr}= 0% pour une surface parfaitement plate et sans aspérités,

S_{dr}= quelques % pour une surface tourmentée.

Paramètres fonctionnels Dans l'industrie, les surfaces peuvent être destinées à des usages spécifiques comme le frottement, le collage ou la rétention de lubrifiant. Selon ces besoins fonctionnels, certaines surfaces doivent posséder des caractéristiques topographiques qui vont dans le sens de l'utilisation attendue. Les paramètres de rugosité cités

jusque là donnent des descriptions générales de la topographie, tandis que les paramètres fonctionnels sont calculés spécialement pour caractériser le potentiel d'une surface à remplir une certaine fonction (portance, réserves de lubrifiant). Ces notions sont importantes et surtout utilisées dans la tribologie, c'est à dire dans les cas de frottement dynamique entre deux surfaces. Pour le bois, il n'y a pas de frottement dynamique mais ces paramètres présentent un intérêt pour la finition (application de peinture ou vernis) ou pour le collage. Certes, dans le toucher, il n'y a pas de fluide mais ce phénomène pourrait être relié à certaines sensations, c'est ce qu'on vérifiera dans la suite de ce travail.

Les paramètres fonctionnels sont calculés à partir de la courbe d'Abbott-Firestone [1] [1] qui est classifiée en différentes zones fonctionnelles (figure 1.14)

- zone des pics ($\leq$ 5%)
- zone du noyau (5 - 80%)
- zone des vallées ($\geq$ 80%)

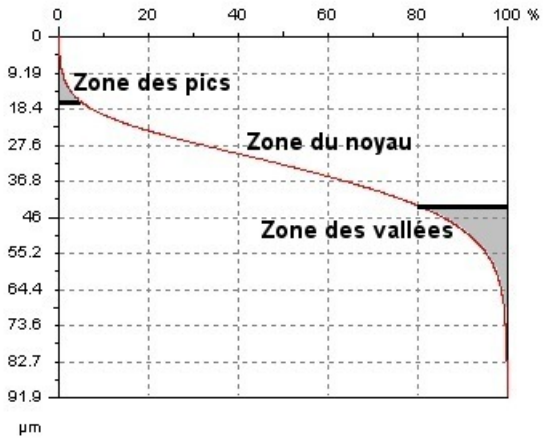


FIG. 1.14 – La courbe d'Abbott-Firestone et les zones fonctionnelles

S_{bi} : Indice de portance de la surface

C'est le rapport de S_q sur l'altitude de le surface à 5% de la surface portante. Il est compris entre 0,3 et 2.

Plus le S_{bi} sera élevé, plus la surface présentera de bonnes caractéristiques de frottement. Pour une surface gaussienne, S_{bi}=0,61. Quand une surface subit une usure, son indice de portance augmente.

$$S_{bi} = \frac{S_q}{\eta_{0,05}} = \frac{1}{h_{0,05}} \tag{1.10}$$

$\eta_{0,05}$=hauteur correspondant à 5% de la courbe de portance.

Un aspect intéressant de l'utilisation de ce paramètre est la distinction entre les surfaces lisses et rugueuses.

[1]Courbe d'Abbott-Firestone (appelée aussi courbe de taux de portance) : courbe cumulée de la distribution d'altitude en fonction de la profondeur de coupe. Elle représente le pourcentage de la surface réelle qui porterait sur une surface plane après une usure hypothétique au niveau de coupe spécifié

S_{ci} : Indice de rétention de fluide du noyau

C'est le rapport du volume de vide par unité de surface dans le noyau, divisé par S_q.

$$S_{ci} = \frac{1}{S_q}.\frac{V_v(h_{0,05}) - V_v(h_{0,8})}{(M-1).(N-1).\Delta x.\Delta y} \tag{1.11}$$

$0 \prec S_{ci} \prec 0{,}95(h_{0,05}\text{-}h_{0,8})$

Un grand S_{ci} indique une bonne propriété de rétention des fluides dans le noyau. Pour une surface gaussienne, cet indice est d'environ 1,56. Une surface qui subit une usure voit son indice de rétention de fluide du noyau augmenter.

S_{vi} : Indice de rétention de fluide des vallées

C'est la rapport du volume de vide par unité de surface dans les vallées, divisé par S_q.

Un grand S_{vi} indique une bonne propriété de rétention des fluides dans les vallées. Pour une surface gaussienne, $S_{vi} = 0{,}11$. Une surface qui subit une usure a un indice de rétention de fluide des vallées qui diminue.

S_{bi}, S_{ci} et S_{vi} sont faiblement influencés par les valeurs extrêmes, mais sont sensibles au pas d'acquisition. Ils ne sont pas corrélés avec S_{sk}. En effet, une valeur de S_{sk} proche de 0 ne veut pas forcément dire une propriété de rétention de fluide des vallées importantes.

Les études de Boscaino [11] cherchent une interprétation unifiée de l'ensemble des paramètres de rugosité pour une application aux rugosités des chaussées. Les paramètres ont été classés par catégorie de stationnarité, spectralité et sensibilité. Les liens existant entre les paramètres et les performances fonctionnelles ont été établis. Cette recherche a accentué l'importance des paramètres spectraux (comme la densité spectrale de puissance) dans la caractérisation des états de surface.

L'ensemble de ces paramètres 3D proposé dans le rapport EUR15 178 de la commission européenne nous semble intéressant à étudier du fait que ces paramètres prennent en compte toutes les propriétés de la surface, notamment la texture spatiale. Ils seront pris en compte dans ce travail.

1.1.2.2 Evaluation sensorielle

L'évaluation sensorielle offre des possibilités de caractérisation que les méthodes de caractérisation instrumentale ne prennent pas en compte.

1.1.2.2.1 Evolution dans le temps L'évaluation sensorielle a été développée dans les années 30 dans le domaine agroalimentaire. Elle trouve son origine dans la nécessité de méthodes de contrôle de qualité des produits alimentaires en l'absence de méthodes instrumentales efficaces [106]. Le but est de mesurer objectivement les caractéristiques du produit à l'aide des sens. L'homme est utilisé comme « instrument de mesure ». Cet outil

particulier nécessite des protocoles de tests rigoureux afin d'obtenir une bonne fiabilité des résultats. La première méthodologie a été publiée aux USA en 1964. Depuis, de nouvelles méthodes ont été développées et de nouvelles techniques statistiques et mathématiques ont été appliquées. Les méthodes plus anciennes ont été normalisées ainsi que le cadre dans lequel se déroulent les épreuves [22].

L'application au toucher n'a été initiée qu'en 2001, année où une nouvelle commission AFNOR s'est créée pour développer des normes sur l'analyse sensorielle tactile des matériaux. Son objectif est de transférer, garantir et généraliser les pratiques d'analyses sensorielles au sein d'autres professions que celles de l'agroalimentaire [26]. Un référentiel de bonnes pratiques traitant des recommandations méthodologiques pour l'évaluation sensorielle de la matière première au produit fini présente les principes, les différents tests [3] et des applications pratiques au travers du référentiel [4].

1.1.2.2.2 Les différents types de tests sensoriels Il existe deux types de tests sensoriels indépendants :

- les tests analytiques : permettent de déterminer si une différence sensorielle est perçue entre les produits et de préciser objectivement la nature et l'intensité des différences observées à partir de « descripteurs sensoriels », à l'exclusion de tout aspect plus ou moins plaisant des produits. On distingue, classiquement, deux grandes catégories d'épreuves : les épreuves discriminatives dont l'objectif est de déterminer si deux ou plusieurs produits sont ou non différents et les épreuves descriptives dont l'objectif est de mettre en évidence des ressemblances et différences entre produits. Ces types de tests font intervenir essentiellement des spécialistes appelés « panel expert » qui sont spécifiquement entraînés à positionner les produits sur une échelle de notation et à réaliser le profil sensoriel du produit.
- les tests hédoniques : cherchent à préciser les préférences ou rejets des consommateurs. Les épreuves sont les mêmes que celles des tests analytiques sauf que seuls les descripteurs hédoniques (aspect plus ou moins plaisant des produits) interviennent. Ces types de tests font intervenir l'expression des consommateurs appelés « panel naïf », un nombre minimum de 60 consommateurs est requis.

Ces deux techniques relèvent de connaissances fondamentales et de mécanismes physiologiques distincts. Le premier relève de la physiologie sensorielle, le second de la physiologie des mécanismes neuro-métaboliques déterminant l'ingestion alimentaire. Ces méthodes sont expliquées en détail dans les oeuvres de Sauvageot et SSHA [100, 106].

1.1.2.2.3 Evaluation sensorielle tactile des matériaux

Dans le secteur automobile L'analyse sensorielle tactile est beaucoup utilisée dans le secteur automobile pour la caractérisation des pièces d'habitacle dans la recherche de confort des consommateurs au contact de ces matériaux. A titre d'exemple, on peut citer la réalisation de « cartographie de préférence » appliquée aux matériaux de sièges et planches de bord afin de déterminer les caractéristiques sensorielles optimales pour satisfaire la clientèle. Il y a aussi la démarche sensorielle visant la compréhension de l'impact d'un additif ajouté aux matières premières sur l'aspect tactile du matériau fini : une ana-

lyse sensorielle avec un panel entraîné permet une quantification directe des similitudes et différences tactiles des produits obtenus par formulation vis-à-vis de la cible [25, 81].

Le technocentre de Renault a mis au point un premier référentiel tactile dédié aux matériaux. Ce référentiel propose une décomposition du toucher global en dix perceptions simples regroupées selon trois procédures tactiles : orthogonale, tangentielle et thermique [27, 25]. La rugosité de surface pourrait être reliée au descripteur « relief » de ce référentiel. Le relief fait ainsi partie de la composante du toucher « tangentielle », définie en ces termes : « décrit les différentes hauteurs perçues à la surface du produit ».

Le geste de la main impliqué dans l'évaluation sensorielle de la rugosité est un geste parallèle à la surface touchée. Il concerne toutes les orientations en X et Y et à des vitesses différentes.

Dans le secteur textile Parmi tous les secteurs industriels, c'est probablement le secteur textile qui a la plus longue expérience de mesure du toucher car les sensations tactiles sont des éléments déterminants de la qualité perçue des étoffes. Différents appareils de mesure ont été développés dont la machine de mesure Kawabata [16]. Celle-ci consiste à construire des modèles prédictifs reliant :

- des paramètres physiques pouvant prédire les propriétés haptiques des textiles (traction, cisaillement, flexion, compression, état de surface, thermique). Pour caractériser l'état de surface, le paramètre de rugosité SMD (écart linéaire moyen de l'épaisseur de la surface), le coefficient de frottement MIU et la déviation par rapport au coefficient de frottement moyen (MMD) ont été utilisés.
- des classifications humaines selon des sensations dites « mains primaires » (NUMERI : mêlant « lisse », « soyeux », « souple », « doux », SHARI : mêlant « ferme », « rugueux », « fraîcheur », etc.)

Dans le domaine de l'usinage du bois et de l'ameublement Les évaluations sensorielles sur le matériau bois ne sont pas aussi développées que dans le domaine automobile et textile. Aucun panel d'experts n'a été mis en place pour le moment. En sortie d'usine, les panneaux sont certes évalués à l'aide d'une méthode visio-tactile par les opérateurs, l'éprouvette est comparée à des échantillons étalons au moyen de la vue et du toucher. Mais il n'y a pas de normes ni d'indications bien précises. L'évaluation sensorielle reste subjective, car elle est fonction de l'appréciation de l'examinateur.

Quelques travaux tentent d'expliquer, à travers les analyses sensorielles, les facteurs influençant des sensations tactiles de rugosité du bois. Selon les travaux de Sadoh, Leban, Mothe et Triboulot [75, 84, 97, 110], les sensations tactiles de rugosité seraient dues aux vaisseaux du bois pour les feuillus et aux ondulations provoquées par les cernes annuels pour les résineux.

Pour résumer, une avancée importante a été effectuée pour les analyses sensorielles tactiles dans les secteurs tels que le textile, l'automobile ou l'industrie des cosmétiques. L'analyse sensorielle est une pratique plus nouvelle dans le domaine du bois. Il serait ainsi intéressant de pouvoir se servir des avancées des autres secteurs pour aider à avancer plus rapidement. Nous allons ainsi mener des tests sensoriels sur les échantillons de

bois étudiés, en prenant soin de respecter certaines recommandations du référentiel et des normes, notamment en ce qui concerne le nombre de sujets, l'ordre de présentation des échantillons et les conditions opératoires. La connaissance des différentes démarches d'analyse sensorielle est primordiale dans le choix des tests sensoriels adaptés pour notre étude en fonction des objectifs poursuivis.

1.1.2.3 Tribologie

La tribologie est définie comme « la science et la technologie des surfaces en contact par déplacements relatifs, en relation avec les caractéristiques des matériaux » [114].

Les chercheurs de l'Institut supérieur des matériaux et de la construction mécanique (ISMCM-CESTL) ont développé un système tribologique par le contact d'un doigt d'un sujet avec le matériau à tester telle que les trois variables (force normale, vitesse, aire de contact) sont maîtrisées. Ce système mesure la force tangentielle qui correspond au frottement du doigt sur le matériau et la force normale qui correspond à la force d'appui du doigt sur le matériau. La corrélation entre le coefficient de frottement fourni par ce tribomètre et les notes sensorielles correspondant au descripteur « glissant » est correcte aux extrémités mais moins forte pour des notes sensorielles moyennes. Une optimisation de cette application est requise [86].

L'école nationale supérieure des industries textiles de Mulhouse a mené des recherches sur la mesure de la douceur des surfaces textiles. Une nouvelle méthode d'évaluation de l'état de surface des textiles a été développée. Cette méthode est basée sur le principe du tribomètre de type « lamelle-disque ». Une étoffe formant un disque circulaire est en rotation et une lamelle frotte sa surface. Les signaux perçus sont traités par une analyse de Fourrier. Le fonctionnement du capteur est basé sur la théorie des vibrations, l'excitation par frottement de la lamelle induisant une vibration de ses modes propres. L'amplitude et l'énergie de ces modes propres seraient reliées à la perception de douceur des tissus éponges [15, 43].

1.2 La rugosité : génératrice de sensations

Après l'étude de la phénoménologie et de la métrologie de la rugosité, on peut s'interroger sur la perception tactile au contact des surfaces rugueuses. Ce paragraphe est composé de trois parties, la première partie explique les différentes séquences aboutissant à la perception tactile et visuelle des matériaux. La deuxième partie présente les différentes approches pour caractériser le toucher. En dernière partie sont enfin étudiées les approches de corrélation entre les mesures instrumentales et les sensations tactiles dans divers domaines (bois, textile, automobile, etc.).

1.2.1 La perception tactile humaine au contact d'un matériau

La perception de notre environnement fait appel à une succession de processus d'analyses de signaux des milieux intérieurs ou extérieurs (les stimuli). La stimulation de nos organes des sens par le milieu provoque l'élaboration d'un message sensoriel, décodé puis interprété par le système nerveux central. La somme des impressions provenant des organes sensoriels entraîne une sensation qui, après interprétation en référence à ce que nous avons pu apprendre, constitue la perception.

Chaque organe sensoriel est à l'origine d'une sensibilité particulière appelée « modalité sensorielle ». Au sein d'une modalité sensorielle, il est possible de distinguer plusieurs qualités. La vision, par exemple, est constituée de trois qualités : la brillance, la couleur et la profondeur. La sensation de l'une de ces qualités apparaît lorsque les facteurs de l'environnement stimulent les récepteurs correspondant à cette qualité. Chaque récepteur est spécifique d'un stimulus physique ou chimique particulier [6].

Le toucher est l'une des modalités sensorielles qui définissent la somesthésie, la somesthésie étant l'ensemble des sensations corporelles avec pour modalités : le toucher, la pression, la température et la douleur. La séquence des événements aboutissant à la sensation tactile de rugosité peut être résumée dans la figure 1.15.

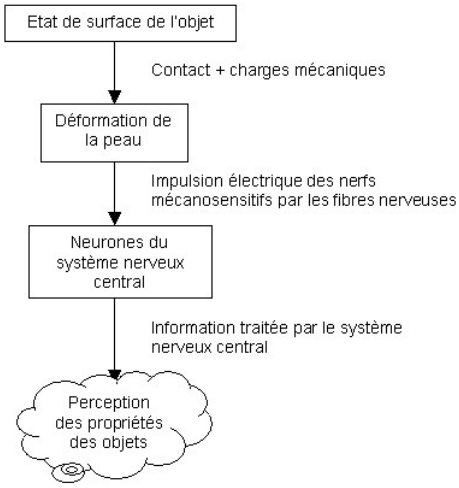


FIG. 1.15 – Séquence des évènements aboutissant à la sensation tactile

1.2.1.1 Contact de la surface de l'objet avec la peau

Le contact s'opère de la manière suivante : la surface entre en contact avec la peau (stimulus), la peau est déformée, les charges mécaniques sont distribuées sur la surface de la peau et atteignent les tissus sous-cutanés.

1.2.1.2 Traduction en impulsions nerveuses par l'intermédiaire des récepteurs

Les informations de la déformation mécanique de la partie de la peau stimulée sont codées par des récepteurs cutanés. Ces récepteurs se situent dans les différentes couches de la peau. Au moins six types sont identifiés (figure 1.16) :

- dans l'épiderme se trouvent les récepteurs du tact : les disques de Merkel et corpuscules de Meissner,
- dans le derme sont les récepteurs thermiques : corpuscules de Krause (pour le froid) et les corpuscules de Ruffini (pour le chaud),
- dans l'hypoderme se trouvent les récepteurs de pression : corpuscules de Golgi-Mazzoni (percevant les pressions légères) et les corpuscules de Paccini (pour les fortes pressions).

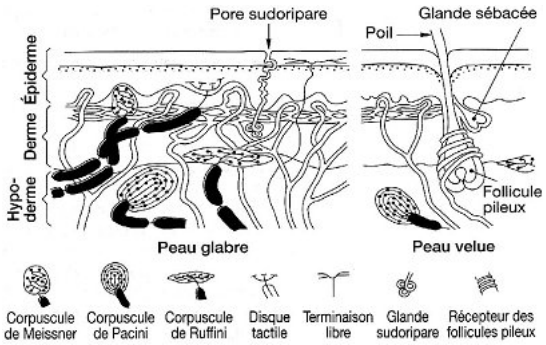


FIG. 1.16 – Coupe schématique de la peau : les récepteurs cutanés [30]

1.2.1.3 Transmissions des pulsions neurales et réception au niveau du cerveau

Les récepteurs sensoriels transforment l'énergie naturelle (mécanique, ondulatoire, thermique, etc.) en activités neuroniques. Les messages, d'abord transmis par les nerfs, pénètrent dans la névraxe où ils suivent des voies dirigées vers les centres spécialisés (aire corticale primaire et secondaire) après avoir franchi plusieurs relais cellulaires. L'aire corticale primaire, dite somatosensitive, perçoit les sensations élémentaires (lisse, rugueux, froid, etc.). L'aire corticale secondaire dite somatopsychique, réalise la construction de l'image mentale.

1.2.1.4 Perception du toucher

La reconnaissance par le toucher des objets ou stéréognosie est fondée sur les apprentissages antérieurs grâce à une aire corticale appelée stéréognosique située derrière les aires de la sensibilité et où sont stockés les souvenirs.

Deux caractéristiques différencient le toucher des autres sens. D'une part, les récepteurs sont en interaction directe avec l'objet. D'autre part, les signaux imposés au doigt peuvent être modifiés en bougeant le doigt. De nombreuses espèces animales sont supérieures à l'homme du point de vue de leurs perceptions olfactives (les chiens par exemple), visuelles

(les oiseaux), auditives (les chauves souris) mais aucune n'atteint la qualité perceptive du toucher de l'homme [74].

1.2.2 Les différentes approches pour mesurer, caractériser ou simuler le toucher des matériaux rugueux

La sensation tactile a été étudiée sous différents angles : la neurophysiologie, la psychophysique et la biomécanique.

1.2.2.1 Approche neurophysiologique

Il s'agit d'enregistrer les réponses des nerfs périphériques et des mécanorécepteurs à des stimulations. Dans ce travail de thèse, nous parlerons plus spécialement du toucher au contact d'un matériau rugueux. Les mécanorécepteurs [2] qui interviennent dans la perception de la rugosité seraient alors les disques de Merkel et les corpuscules de Meissner, les corpuscules de Ruffini et les corpuscules de Paccini.

Les travaux de Johansson [63, 64] renseignent sur les caractéristiques des unités récepteurs des mécanorécepteurs, leur localisation et leur densité au niveau des doigts. La stimulation utilisée est constituée par une indentation à une vitesse de 4 mm/s avec une sonde arrondie de diamètre de 400 μm. La réponse des nerfs a été enregistrée avec des électrodes sous-cutanés insérés dans le nerf médian sur le bras supérieur du sujet. 17 000 fibres liées à des mécanorécepteurs innerveraient la peau de la main. Leur densité au niveau de la main est présentée dans la figure 1.17. La densité est cinq fois plus importante au niveau des doigts que de la paume de la main. Les mécanorécepteurs sont classifiés en quatre catégories principales par rapport à la nature de leur réponse à une indentation soutenue et par rapport à la taille des champs récepteurs selon le tableau 1.3. Les récepteurs de la colonne de gauche ont une adaptation rapide, leurs unités réceptrices sont ainsi nommées respectivement FAI et FAII en référence à « fast adapting ». SA fait référence à « slow adapting ».

[2] Mécanorécepteurs : récepteurs aux terminaisons des nerfs

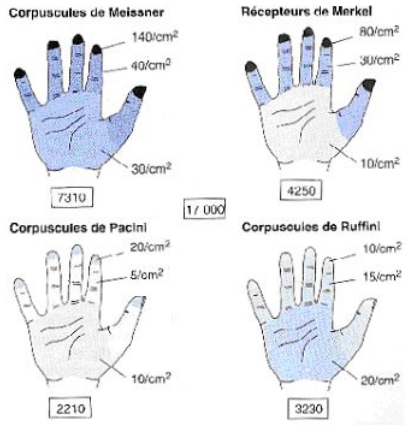


FIG. 1.17 – Densité de répartition de quatre types de récepteurs cutanés intervenant dans la sensation de rugosité sur la surface interne de la main [112]

	Meissner	Pacini	Merkel	Ruffini
Adaptation	Rapide		Lente	
Nom des unités réceptrices	FAI	FAII	SAI	SAII
Taille des champs récepteurs (mm^2)	Réduit (12,6)	Etendu (191)	Réduit (11)	Etendu (59)
Nombre de récepteurs par fibre	12-17	1	4-7	1
Sensibilité maximale (Hz)	20-40	100-300	$\prec 8$	$\prec 8$

TAB. 1.3 – Propriétés des quatre mécanorécepteurs de la peau [25]

1.2.2.2 Approche psychophysique

Il s'agit d'observer le comportement global du sujet en réponse à des stimuli tactiles, y compris la perception finale subjective.

Ces travaux incluent les travaux sur la perception de la rugosité [76], sur la résolution spatiale [9] et sur la perception de la douceur [105]. Srinivassan [8, 104] résume l'ensemble des travaux qui visent à déterminer les seuils de perception des sujets en réponse à divers types de stimulations tactiles (tableau 1.4). Ces informations ont permis de calculer le procédé de filtrage du profil de rugosité adapté pour cette étude (paragraphe 2.2.1.2.1).

Selon Lederman [76], la rugosité serait perçue sous la forme d'une énergie de vibration de la peau. Elle a étudié la perception de la rugosité sur une plaque d'aluminium rainurée en faisant varier la profondeur des rainures (de 0,125 à 1 mm), l'espacement entre les rainures (0,175 à 1 mm) et la force de pression du doigt (28 à 448 g). Les analyses statistiques ont permis de mettre en évidence un effet significatif de ces trois paramètres

Indentation	
Statique	20 μm
10 Hz	10 μm
250 Hz	0,1 μm
Détection de texture	
Texture	0,06 μm
Point	2 μm
Force normale	0,4 - 1,1 N
Résolution spatiale	
Localisation latérale	0,15 mm
Deux pointes d'un compas	1 mm

TAB. 1.4 – Seuil de sensibilité tactile liée à la rugosité, selon Raju [94] et Srinivasan [104]

sur la sensation de rugosité. Pour ces plages de variation des trois paramètres, la rugosité perçue serait d'autant plus forte que :

- la profondeur de la rainure augmente (seuil $\alpha = 0{,}001$),
- la pression du doigt augmente (seuil $\alpha = 0{,}01$),
- l'espacement entre rainures rétrécit.

Les travaux de Lederman portent sur des surfaces artificielles et paramétrées. Les résultats ne se placent pas dans un contexte réel comme c'est le cas du matériau bois avec une structure anisotrope et hétérogène.

1.2.2.3 Approche biomécanique

Il s'agit des modèles mécaniques de déformation de la peau et des tissus cutanés générée par le contact de la peau avec un objet.

Les chercheurs du Touch Lab du Massachusetts Institute of Technology [103] mènent des recherches pour mesurer les propriétés mécaniques de la peau et des tissus sous-cutanés pour essayer de mieux comprendre les réponses nerveuses associées. En addition, ils ont développé des modèles mécaniques de la peau (indentation) au moyen de la méthode des éléments finis qui prennent en compte les hétérogénéités dans la structure de la peau et la non linéarité de ses attitudes mécaniques (géométrie des structures sous-cutanées, propriétés visco-élastiques de la peau). L'analyse de ces modèles permet de prédire des variables biomécaniques (déplacement de la peau, force de réaction, distribution de la pression de surface, contraintes de surface) générées par le contact du doigt avec une variété de formes d'indentation [29].

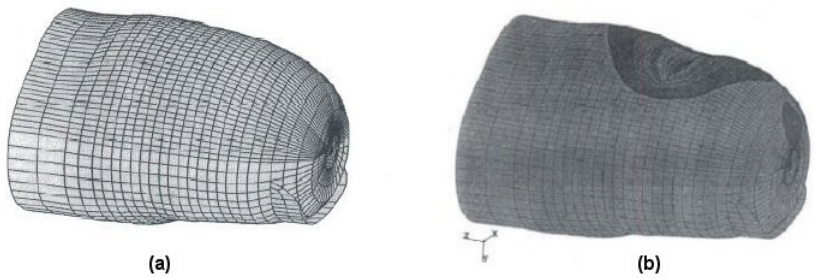


FIG. 1.18 – Vue 3D des maillages d'éléments finis (a) du doigt humain et (b) leur déformation par une indentation à l'aide d'une pointe alignée perpendiculairement à l'axe du doigt [8]

1.2.3 Influence de la vision sur la sensation tactile de rugosité (intermodalité)

Notre perception du monde autour de nous est d'une manière inhérente multisensorielle. Nous évaluons les objets que nous rencontrons à travers plusieurs sens d'une manière simultanée. Les modalités sensorielles sollicitées pour analyser les propriétés tactiles des matériaux sont : le toucher, la vision et dans certains cas l'audition [51]. Dans ce travail, ce sont le toucher et la vision qui nous intéressent. Cette intermodalité peut être illustrée par le fait que les effets de texture qui sont utilisés naturellement dans certains tissus pour faire les drapés ont bien été reproduits dans la peinture de la Renaissance. Les variations de texture des tissus, tapis, sols ont bien été représentées en fonction de la perspective. Le toucher caractérise les propriétés de surface et la vision donne surtout des informations spatiales sur le matériau. Il a été prouvé que dans une situation bimodale, les modalités sensorielles ont un rôle complémentaire plutôt que concurrent [53, 52, 55]. La combinaison des informations fournies par la modalité de la vision et du toucher permet d'arriver à une représentation de l'environnement. Il semblerait cependant que la modalité la plus performante prend le dessus sur l'autre selon la nature de la tache. C'est ce qu'on va vérifier lors de nos essais.

Guest [53] et Heller [56] ont observé que dans le domaine des propriétés spatiales, la vision est beaucoup plus performante que le toucher (exemple : perception de la forme d'un rectangle/triangle). En ce qui concerne la perception des textures rugueuses, il n'y a pas de différence de capacités perceptives entre la vision et le toucher. La perception de la rugosité est une moyenne entre les caractéristiques visuelles de la texture et les caractéristiques tactiles [55]. Pour la discrimination très fine des textures, il y a supériorité du toucher sur la vision. Ainsi, le sujet croit voir ce qu'il a touché alors qu'il a vu une autre texture [52].

Le bois et les composites dérivés du bois sont des matériaux texturés. On peut se demander si les textures visuelles ont des effets sur la perception de la rugosité tactile. Par exemple si l'on touche un matériau plus uni qu'un autre, la perception de la rugosité varie-elle ?. Peu d'études ont été réalisées dans ce sens. On peut citer celle de Mothe [83] sur

l'effet de la lumière sur les classements tactiles de rugosité. Il a conclu que les classements dans une pièce éclairée par la lumière du jour et ceux obtenus dans une obscurité presque complète seraient similaires.

Dans ce travail de thèse, on se servira des bois de pins maritimes et des panneaux dérivés du bois présentant des textures couleurs différentes pour étudier cette intermodalité entre la vision et le toucher. Les caractéristiques de la vision étudiés dans ce travail sont donc la couleur du matériau et sa texture couleur, à travers une acquisition d'images couleurs. On étudiera alors si l'image affecte le toucher.

1.2.3.1 Présentation du système visuel

En ce qui concerne la vision de la couleur, la séquence des événements aboutissant à la perception colorée peut être divisée en quatre étapes :

- les rayons lumineux provenant de la source entrent en contact avec l'objet,
- selon la couleur et l'état de surface de l'objet, la quantité de lumière que reçoit l'oeil est différente,
- l'oeil, qui est un récepteur de lumière, transforme ce stimulus en informations interprétables par le cerveau,
- le cerveau, à réception des informations issues de l'oeil, interprète en fonction de données identiques associées à un ou plusieurs termes descriptifs.

Ainsi, trois paramètres interviennent dans la perception de la couleur : le signal lumineux, l'objet, le récepteur de l'oeil (figure 1.19).

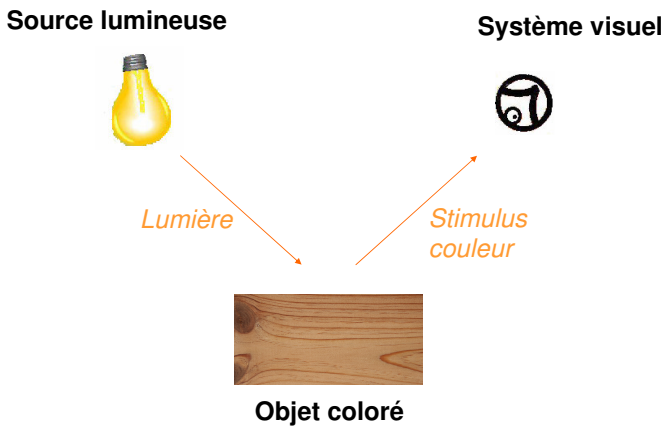


FIG. 1.19 – La vision de la couleur : le triplet lumière-objet-recepteur [71]

L'objet éclairé réémet une partie de la lumière qui l'éclaire et devient à son tour source de lumière secondaire. Le stimulus couleur $S(\lambda)$ en provenance d'un objet coloré et qui atteint l'oeil est défini comme le résultat du produit du spectre d'une source lumineuse $I(\lambda)$ avec le spectre de réflectance de l'objet $R(\lambda)$ selon l'équation 1.12.

$$S(\lambda) = I(\lambda) * R(\lambda) \tag{1.12}$$

L'oeil est sensible aux radiations électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre 380 et 780 nm. Au niveau de l'oeil, le stimulus lumineux vient exciter deux types de photorécepteurs qui sont répartis de façon non uniforme sur la surface de la rétine [96] :

- les bâtonnets : responsables de la vision nocturne ou par faible éclairement. Leur sensibilité spectrale varie en fonction de la longueur d'onde, elle est maximale vers 510 nm. Les bâtonnets ne permettent pas de percevoir la couleur d'un objet. Leur champ d'action est essentiellement photométrique et non chromatique, et fournit une information chromatiquement neutre, blanc, gris et noir.
- les cônes fournissent une réponse photométrique et chromatique. Ce sont des cellules photosensibles qui permettent de distinguer la teinte de l'objet observé. La sensibilité spectrale des cônes présente un maximum vers 560 nm pour une luminosité de l'objet éclairé voisine de celle de la lumière du jour.

L'oeil n'a pas la même sensibilité à la luminosité de la lumière pour toutes les longueurs d'onde. Si l'on représente la sensation lumineuse perçue par un observateur regardant une source d'égale d'énergie par une courbe, le résultat obtenu en fonction de la longueur d'onde dessine un profil en cloche. On trouve un maximum de sensation lumineuse à 550 nm dans le vert et pratiquement pas aux extrémités du spectre (figure 1.20).

La perception spectrale d'un objet coloré est donc le produit de l'énergie émise par le corps $S(\lambda)$ et la sensibilité de l'oeil $V(\lambda)$.

$$P(\lambda) = S(\lambda) * V(\lambda) \tag{1.13}$$

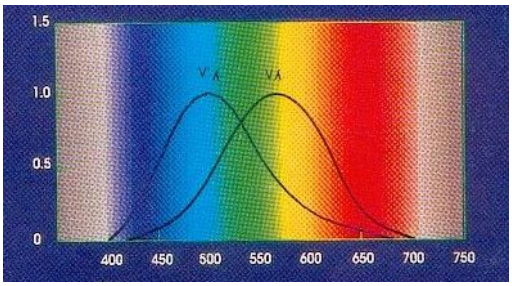


FIG. 1.20 – Sensibilité de l'oeil en vision photopique $V(\lambda)$ et en vision scotopiques $V'(\lambda)$ [19]

1.2.3.2 Définition de l'observateur standard (fonction chromatique $\overline{r}$ $\overline{g}$ $\overline{b}$ de l'observateur)

Les systèmes de mesure de la couleur sont basés sur la théorie trichromatique et le concept d'un observateur de référence. La plupart des stimuli couleurs peuvent être générés par la synthèse additive de trois lumières monochromatiques primaires [37]. Chaque stimulus coloré peut donc être défini par la quantité de chacune des trois lumières primaires utilisées. Afin de définir l'observateur dit « standard », des expériences ont été menées à partir d'observateurs humains normaux. Il a été demandé à ces observateurs, à partir d'une synthèse additive de trois lumières primaires : rouge $\overline{r}$ (700 nm), vert $\overline{v}$ (546,1 nm) et bleu $\overline{b}$ (435,8 nm), de réaliser des égalisations de couleurs par rapport à une lumière

test en modifiant le niveau énergétique de chaque source colorée. La quantité d'énergie ajustée pour chacune des trois lumières primaires à chaque longueur d'onde a permis de connaître les réponses des trois fonctions chromatiques de l'observateur tout au long du spectre visible.

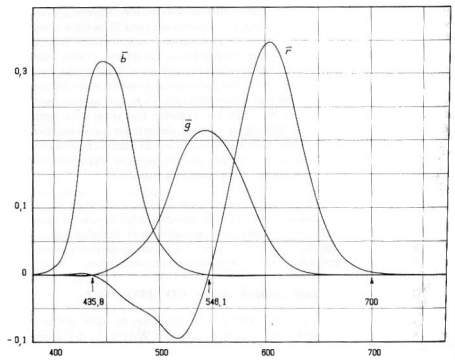


FIG. 1.21 – Fonctions chromatiques $\overline{r}$ $\overline{g}$ $\overline{b}$ de l'observateur humain [101]

La figure 1.21 présente les fonctions chromatiques $\overline{r}$ $\overline{g}$ $\overline{b}$ de l'observateur. Ces courbes se vérifient pour 90% des observateurs. On remarquera que la courbe $\overline{r}(lambda)$ présente une partie négative, ce qui contredit le principe de la synthèse additive.

Si le système de représentation RVB est généralement la base des acquisitions des images couleur, il n'est pas forcément le mieux adapté aux objectifs des études. Aussi existe-il un certain nombre de transformations de l'espace RVB initial en un nouvel espace de représentation. Ces différentes transformations répondent aux besoins d'application spécifiques, mais elles ont toutes en commun le souci d'une meilleure mise en évidence de l'information couleur. On peut citer entre autres, l'espace Lch, l'espace XYZ, les systèmes uniformes CIEL*a*b* et CIELuv.

1.2.3.3 Etude de la texture couleur

Plusieurs études ont été réalisées au niveau industriel mettant en oeuvre des analyses d'images couleur [20, 54, 92]. Mais les analyses sensorielles ont été réalisées uniquement avec des couleurs unies, ce qui ne permet pas de décrire la texture couleur en termes de différence perceptible par l'oeil. Ainsi, comme le soulignent les travaux de Lafon [71], l'étude des seules coordonnées trichromatiques d'une image ne suffit pas pour caractériser une surface texturée (comme le bois par exemple). Il est nécessaire de définir un système qui permet de trouver la correspondance entre la perception et des mesures sur des images texturées colorimétriquement. Plusieurs travaux tentent de caractériser la texture couleur par l'étude de la répartition spatiale des coordonnées chromatiques ou du niveau de gris des pixels composant l'image. Nishimura [87] utilise la transformée de Fourier et le filtrage des images pour analyser l'orientation des fibres sur les surfaces des panneaux dérivés du bois nommés OSB (Oriented Strand Board). N'Dri-Stempfer [85] utilise la méthode des variogrammes pour déterminer la longueur de corrélation de la texture des poudriers. Fujii [45] se sert de la fonction d'autocorrélation (annexe A) des niveaux de gris d'une image. Ce dernier a conclu que la combinaison linéaire des paramètres de la fonction

d'autocorrélation correspond à la perception subjective de « texture » et « régularité » de l'image. Ceci est valable que ce soit pour une texture périodique ou pour une texture aléatoire.

1.2.4 Les travaux concernant la recherche de corrélation entre les paramètres de rugosité et la perception tactile

Dans la démarche de métrologie de la rugosité tactile, le but est d'éliminer la consultation d'experts au cours des séances d'analyses sensorielles. La méthode proposée dans ce travail consiste à évaluer le rôle joué par les paramètres physiques de rugosité dans l'acte d'évaluation sensorielle en proposant un modèle statistique qui permet de relier les paramètres de rugosité avec la perception tactile. Et pour prendre en compte l'influence de la vision sur la perception de rugosité, on va introduire dans le modèle les paramètres de couleur et de textures couleur.

Dans le domaine du bois, comme il a été cité dans le paragraphe 1.1.2.1.2, il existe plusieurs travaux qui traitent de la rugosité de surface des bois usinés. Par contre, peu d'études a examiné la relation entre la rugosité de surface du bois et la perception tactile de rugosité. Ces travaux sont résumés dans le tableau 1.5.

Paramètres représentant la sensation de rugosité	**Méthode d'identification**	**Matériaux**	**Rugosimètre**	**Analyse sensorielle**	**Eclairage**	**Paramètres étudiés**	**Auteurs**
Distribution des pics sur la surface à un seuil donné (%)	Correspondance avec les notes de rugosité senties par la main	Bois massif de 3 feuillus	Palpeur 3D	Comparaison par paire	en aveugle	Distribution des pics sur la surface à un seuil donné	[47] et [46]
NHPic	Corrélation linéaire (r^2=0,62)	32 champs d'éprouvettes issus de panneaux de LVL et de plaque de chêne	Palpeur 2D	16 sujets Comparaison par paire	en aveugle	DPPm, DVm , RzP, Hpic, Hval, Npic, Nval, NHPic, NHVal	[49]
Ra 75	Correspondance avec les notes de rugosité senties par la main	Bois massifs de 4 feuillus, avec des usinages différents	Palpeur 2D	3 sujets	en aveugle	Ra75, Spectre de fréquence, Sk, Ku, Rmax, Rz	[44]
Rz et Ra	Comparaison des classements	Divers placages tranchés, planches rabotées et poncées de Chêne, Douglas, Pin, Merisier	Palpeur 2D	18 sujets Classification suivant le critère de rugosité	dans une pièce éclairée à la lumière naturelle	Rz, Rp, Ra, Rmax, Rt, Wt, Pt	[84]

Paramètres représentant la sensation de rugosité	**Méthode d'identification**	**Matériaux**	**Rugosimètre**	**Analyse sensorielle**	**Eclairage**	**Paramètres étudiés**	**Auteurs**
$\oslash$	AFC	18 éprouvettes provenant de 2 espèces de feuillus (Quercus, Prunus)	Pneumatique et laser	18 sujets Classification suivant le critère de rugosité	dans une pièce éclairée à la lumière naturelle	Rugosité « absolue »	[83]
RMS	AFC	Bois massif de 11 essences de feuillus	Palpeur 2D	50 sujets Choix de l'un ou l'autre de chaque couple de qualificatifs antagonistes proposés (doux/rugueux, fin/grossier, etc.)	dans une pièce éclairée à la lumière naturelle	RMS, Rp	[113]
Hmax, Hrms	Corrélation linéaire (r^2=O,66 pour Hmax, r^2=O,64 pour Hrms)	82 échantillons d'essences diverses (3/4 de feuillus)	Palpeur 2D	30 sujets Notation de la rugosité (1 à 5)	en aveugle	Hrms, Hmax, Coeff. de friction statique et cinétique	[97]

TAB. 1.5 – Les paramètres représentant, dans la bibliographie, la sensation de rugosité sur des matériaux bois

L'observation du tableau 1.5 permet de tirer quelques conclusions :
- la plupart de ces études concernent les espèces de feuillus,
- l'étude de la relation entre les données sensorielles et les données instrumentales est réalisée à travers une corrélation linéaire, une analyse factorielle des correspondances ou une comparaison entre le rang de classement sensoriel et le rang des paramètres de rugosité,
- peu de paramètres correspondent aux rugosités tactiles et dans certains cas, aucune corrélation n'est observée,
- les paramètres étudiés sont essentiellement des paramètres 2D d'amplitude mesurés sur un seul profil. L'hétérogénéité spatiale du bois n'est donc pas prise en compte.

Il parait donc intéressant d'avancer dans les recherches en poursuivant les investigations avec des paramètres 3D.

Ce sont les travaux de Fujiwara [46, 47] qui ont le plus abouti. Ils ont développé des méthodes de traitement (filtrage) du profil brut de rugosité acquis par le rugosimètre afin d'en extraire des données en lien avec les sensations humaines tactiles sur des échantillons de bois de Mizunara, Hinoki, Urihadakaede. Trois méthodes de filtrage ont été étudiés : ISO 4287, ISO 13565-1 et filtre LOVE. Le filtre ISO 4287 supprimerait les grandes longueurs d'onde, le filtre ISO 13565-1 négligerait les vallées profondes locales (figure 1.22a). Le filtre LOVE serait le plus adapté au matériau bois car une correspondance a été trouvée entre les notes de rugosité données par un panel et le paramètre « distribution des pics sur la surface au seuil de 6 μm » calculé grâce à ce type de filtre (figure 1.22b).

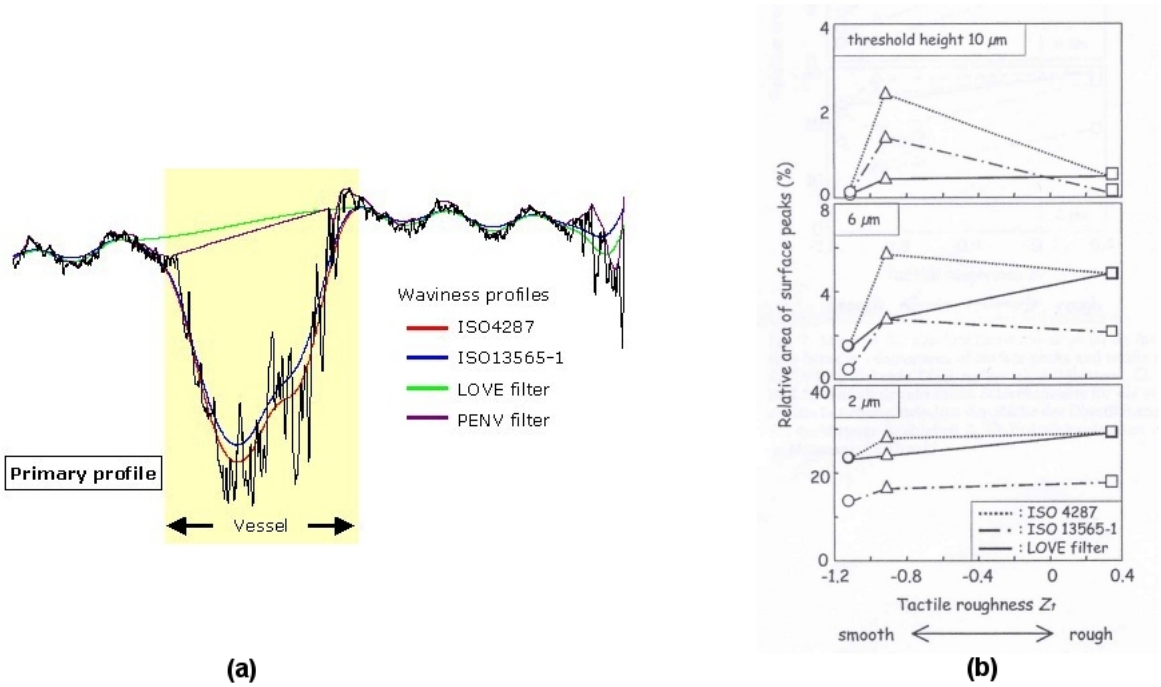


FIG. 1.22 – Etude de trois méthodes de filtrage du profil brut : a) présentation des filtres, b) corrélations avec la rugosité tactile [47]

1.3 Conclusions

Due à l'action conjointe de sa structure anatomique (d'origine biologique), ses modes de fabrication et son traitement de surface, la surface du bois est complexe à étudier (que ce soit d'un point de vue physique ou sensoriel). En effet, le matériau bois est un matériau hétérogène car les cellules qui le composent sont de nature et de forme différentes, sa densité est irrégulièrement répartie et des singularités de croissance différencient chaque pièce. Ses propriétés varient entre arbres et au sein d'un même arbre. Pour pouvoir étudier l'état de surface du bois, il faut prendre soin de faire un échantillonnage adéquat qui soit représentatif de la surface entière à étudier.

Peu de travaux a examiné la relation entre la rugosité de surface et la perception tactile de rugosité. Les quelques tentatives de corrélation concernent essentiellement des paramètres 2D et n'ont pas permis d'extraire de manière explicite les paramètres pertinents qui contribuent à la rugosité tactile, ce qui justifie la démarche de ce travail.

Pour caractériser la rugosité de surface du bois, plusieurs types d'instruments sont déjà utilisés pour relever les profils topographiques et calculer les paramètres associés de rugosité. Le rugosimètre confocal nous semble le plus adapté pour cette étude car d'une part, il permet de dresser les cartes d'altitudes, ne présente pas de contact entre le capteur et la surface du matériau à étudier. D'autre part, le rugosimètre confocal n'est pas sensible à la variation de la couleur du matériau. Enfin, il permet de calculer les paramètres 3D qui nous semblent plus intéressants à prendre en compte que les paramètres 2D, notamment pour des matériaux anisotropes comme le bois. Le rugosimètre laser sera utilisé pour valider les mesures avec le rugosimètre confocal.

Les études sur les seuils de sensibilité du doigt et le comportement du sujet face aux matériaux nous amènent à prendre en compte le seuil de sensibilité du doigt dans le calcul des paramètres de rugosité à travers l'intégration de ces valeurs dans le cut-off des filtres. Il serait intéressant de mener une réflexion sur le moyen d'extraire des paramètres qui représentent la fréquence des pics au contact du doigt lors du toucher.

Pour les matériaux colorés, la couleur semble être une perception complémentaire du toucher. Il nous a donc semblé intéressant d'étudier l'influence de la vision sur la perception de rugosité tactile sur le bois et ses dérivés.

Chapitre 2

Matériels et méthodes

2.1 Création d'une gamme de textures rugueuses pour générer les sensations

2.1.1 Choix des matériaux à base de pin maritime

2.1.1.1 Par la diversité des textures colorées et des états de surface

Dans l'objectif de relier les paramètres physiques instrumentaux et les résultats sensoriels, nous avons choisi de réaliser l'étude sur huit différents types de matériaux dérivés du bois de pin maritime. Ils peuvent être regroupés selon quatre types :

- matériau brut : bois massif (noté BM), bois rétifié (noté RET),
- plaquage : contreplaqué (noté CP),
- matériau recomposé par mélange de fibres et de liant : panneau de fibres ou Medium Density Fiber Board (noté MDF), Oriented Strand Board (noté OSB), panneau de particules (noté PP), bois reconstitué (noté PSL),
- matériau artificiel : revêtement avec du papier décor reproduisant des photographies à échelle 1/1 du bois de pin maritime (noté PD).

Les procédés de fabrication ainsi que les caractéristiques de chacun des panneaux sont présentés en annexe B. Leur choix a été motivé d'une part par la diversité de leur état de surface générée par leurs constituants et d'autre part par la variété de texture colorée liée à l'agencement des constituants, qui permettraient d'analyser l'influence de la vision sur la perception tactile de rugosité.

La figure 2.1 présente la position des différents matériaux étudiés dans l'espace défini par la rugosité et la taille des structures. Par rapport à la texture colorée, les échantillons peuvent être répartis en trois groupes :

- unie : si on exclut le défaut flammé au bout de ce panneau, CP présente une seule teinte,
- orientée : BM et RET étant dérivés du bois massif et PD imitant le bois massif, ils présentent des textures en rayures, issues de l'arrangement des fibres de bois dans la direction longitudinale,
- aléatoire : MDF, PP, OSB. Ces panneaux présentent des caractéristiques de couleur uniformes dans toutes les directions.

FIG. 2.1 – Position des matériaux étudiés dans l'espace défini par la rugosité de surface et l'hétérogénéité de la texture couleur

Les panneaux ont été fournis par différents fabricants de panneaux des Landes. Il est à remarquer qu'avant usinage, les panneaux de bois massifs étaient à l'état hygrométrique ambiante car ils ont été stockés à l'extérieur.

2.1.1.2 Par usinage d'un même matériau

Pour avoir différents types de texture rugueuse, et substituer des textures « aléatoires » aux textures naturelles du bois, nous avons décidé de créer des rugosités par ponçage sur les surfaces de deux matériaux choisis parmi les huit cités précédemment :

- le bois massif : pour l'intérêt dans l'usinage du bois,
- le MDF : car c'est le matériau le plus homogène parmi les huit étudiés, ce qui faciliterait le calcul des paramètres de rugosité, en réduisant le nombre de modalités.

Le ponçage est une opération d'usinage par abrasion destinée à obtenir un état de surface déterminé. Chaque grain du papier abrasif se comporte comme une arête de coupe qui détache un copeau lors de son passage sur le bois. Dans l'industrie du bois, le ponçage est la dernière opération de surface avant revêtement.

Les différentes étapes pour créer ces états de surface consistent à choisir les papiers de ponçage, à régler les autres paramètres de ponçage et à préparer les échantillons.

2.1.1.3 Choix des grains de ponçage

L'usinage des panneaux a été réalisée à l'IUT de Tarbes. Leur laboratoire « bois » dispose d'une machine à poncer qui permet de contrôler les paramètres de ponçage et par conséquent de contrôler aussi la reproductibilité des expériences (figure 2.2). Plusieurs types de papiers abrasifs sont couramment utilisés dans l'industrie du bois. Les principaux sont l'oxyde d'alumine et le carbure de silicium. Pour cette étude, nous avons opté pour les corindons (cristal d'alumine Al2O3) sur support papier 1919 SIAWOOD car ce sont les plus utilisés au niveau industriel. Le papier en forme de ceinture mesure 2250 mm x 150 mm.

Parmi les gammes de dimensions de grains de papier abrasif existantes, les dimensions courantes pour le travail du bois brut sont P60 à P180. Pour la finition des plaquages, on utilise couramment P120 à P180 [91]. Nous avons ainsi sélectionné six dimensions pour cette étude : P60, P80, P100, P120, P220 et P320. Le choix a été motivé par le fait que ce sont des tailles communément utilisées dans l'industrie. Mais surtout, elles permettent de générer des états de surface assez proches les uns des autres afin pouvoir déterminer des seuils de détection ou de confusion du doigt au toucher. La correspondance entre ces codes et la taille moyenne des grains des papiers abrasifs est donnée dans le tableau 2.1. Rappelons que le nombre de un à quatre chiffres après la lettre P représente le nombre de mailles par pouce (25,4 mm) du tamis le plus serré dans lequel les grains ainsi définis peuvent passer. Un nombre élevé désigne des grains fins, inversement un nombre faible désigne des grains grossiers.

Codes FEPA	Grosseur moyenne des grains (μm)	
P60	240	Gros
P80	180	Moyens
P100	145	Moyens
P120	110	Fins
P220	60	Très fins
P320	46	Très fins

TAB. 2.1 – Correspondance entre les codes FEPA et la grosseur moyenne des grains des papiers abrasifs [38]

2.1.1.4 Réglage des autres paramètres de ponçage

Le reste des variables d'entrée qui peuvent avoir une influence sur la rugosité de surface a été maintenu constant tout au long de l'usinage :

- le temps de ponçage est maintenu à 20 secondes, c'est le temps requis pour enlever toutes les marques précédentes,
- la vitesse de ponçage est fixée à 25 m/mn,
- la pression a été appliquée au moyen d'un poids sur l'échantillon testé de telle sorte que la pression résultante soit égale à 40 N,
- le sens du ponçage est à la fois en long et à travers des fils du bois par un mouvement longitudinal et radial du papier (figure 2.2).

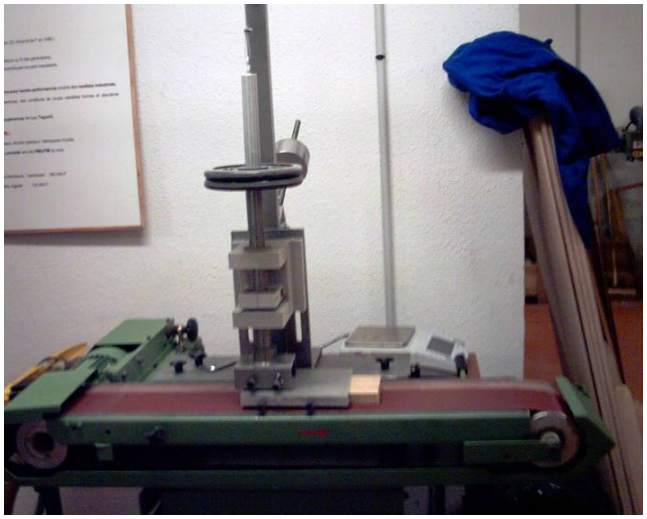


FIG. 2.2 – Machine à poncer utilisée

2.1.2 Préparation des échantillons

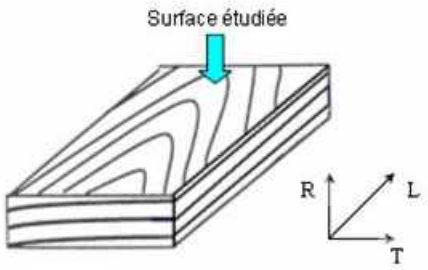
Les planches de bois fournies par les entreprises sont de taille variable. Les éprouvettes de l'étude, prélevées de ces planches, ont donc été découpées à la même taille. En raison de la configuration de la machine à poncer de l'IUT de Tarbes, la dimension des échantillons a été fixée à 200 mm (L) x 100 mm (l) x 8 mm (e). Cette taille nous paraît convenable par rapport aux dimensions de la main (lors de l'expérience sur le toucher).

Les éprouvettes de MDF ont été découpées dans les grandes planches de manière aléatoire sachant que c'est un matériau composite relativement homogène. Une fois prélevées, les éprouvettes de MDF ont tout de suite été poncées sans aucun traitement préalable.

En revanche, comme le bois massif est un matériau hétérogène et anisotrope, une direction de coupe a été définie. Dans un souci de limiter l'hétérogénéité des propriétés des plaques, les échantillons ont été prélevés dans la partie « bois de duramen » du plan L-T des panneaux (figure 2.3). Les défauts visibles tels que les nœuds ont été éliminés. Les éprouvettes ont ensuite été mises à l'étuve pendant trois semaines afin de les stabiliser autour d'une valeur d'humidité d'environ 12%. Ainsi réagiront-ils uniformément à l'usinage (figure 2.4). Les plaques ont ensuite été rabotées avant de procéder au ponçage.

Pour les divers matériaux dérivés du bois, leurs surfaces n'ont pas été traitées, nous les avons laissées telles qu'elles étaient fournies par les entreprises.

(a)



(b)

FIG. 2.3 – La surface étudiée : a) planches de bois massif desquelles ont été prélevés les échantillons, b) le plan L-T

Quatre échantillons de chaque nature ont été poncés par papier abrasif pour vérifier la reproductibilité. Un nombre total de 24 échantillons de MDF et 24 échantillons de bois massif a donc été prélevé et poncé. Pour plus de clarté, nous avons illustré en figure 2.5 la nomenclature de tous les échantillons étudiés.

FIG. 2.4 – Mise à l'étuve des échantillons de bois massif

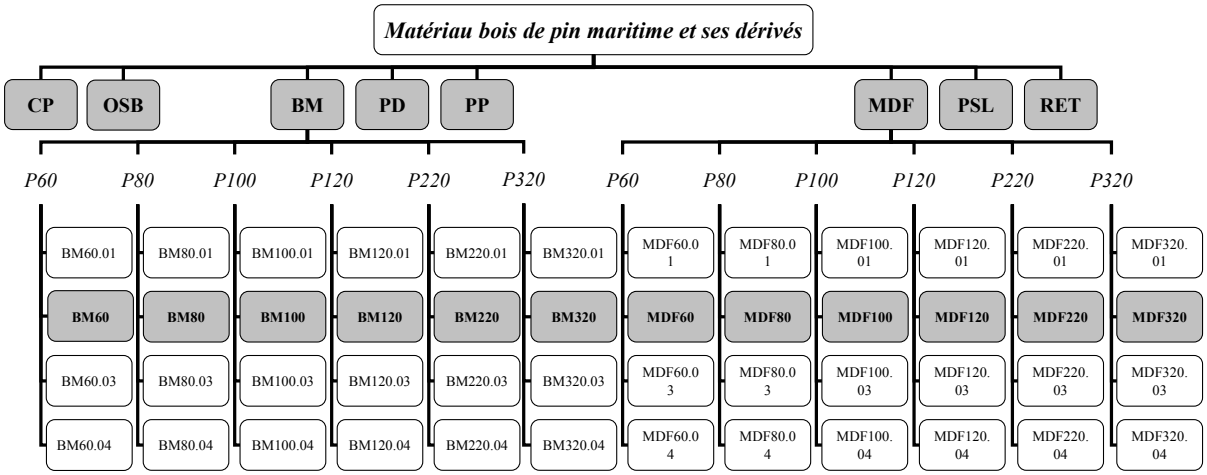
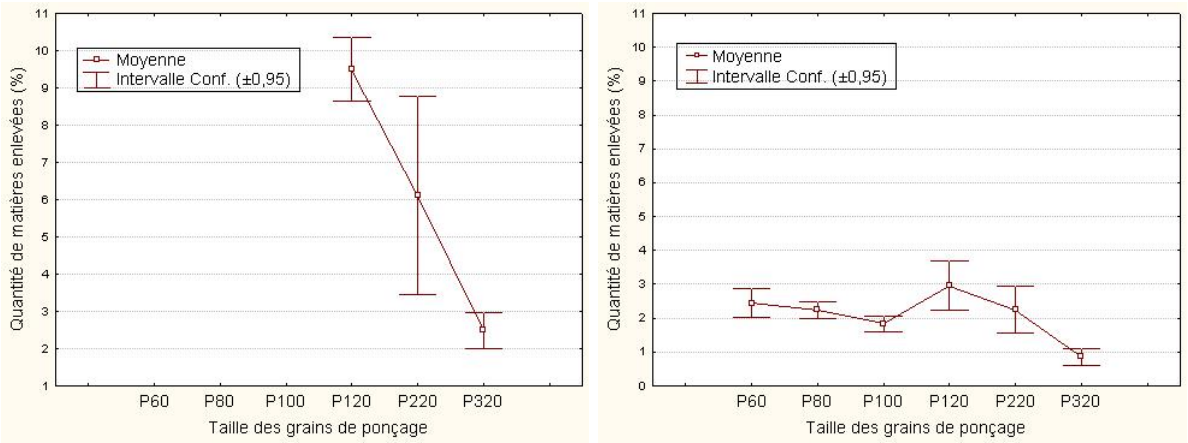


FIG. 2.5 – Nomenclature des échantillons.
Cellules grisées : les échantillons sur lesquels les tests sensoriels ont été effectués

2.1.2.1 Relevé des poids des plaques

Les poids des échantillons sont relevés avant et après le ponçage afin d'estimer la quantité de matières enlevées par les grains de ponçage et de suivre son évolution en fonction de l'usure du papier abrasif. Ceci permettra de vérifier si l'opération de ponçage s'est bien déroulée. Les poids n'ont pas été enregistrés pour les MDF60, MDF80, MDF100. Les résultats sont présentés dans le tableau 2.6 où la quantité de matières enlevées est exprimée en pourcentage du poids initial de la plaque. Sa valeur va de 2,49% (P320) à 9,50% (P120) pour le MDF et de 0,85% (P320) à 2,95% (P120) pour le bois. On s'aperçoit que les deux types de matériaux réagissent différemment au ponçage. En effet, plus de matières sont enlevées pour le MDF. Un problème de cohésion dans la matière peut être une explication à ce résultat. Les MDF sont constitués de fibres déstructurées et ensuite collées, donc il y moins de cohésions entre les constituants par rapport au bois.

On voit que d'une manière générale, la quantité de matières enlevées diminue au fur et à mesure que la taille des grains diminue, comme on peut l'attendre. Pour le bois cependant, on observe une perte de poids anormalement élevée au passage de P100 à P120. Ce décalage entre le premier groupe avec P60, P80, P100 et le second groupe avec P120, P220, P320 traduirait un artefact expérimental dû au fait que les deux groupes n'ont pas été poncés le même jour. Même si nous avons pris soin de contrôler les paramètres de ponçage, il apparaît que le réglage de la machine a été modifié durant le second jour de ponçage. La pression appliquée au matériau a pu être augmentée (par une autre personne qui aurait pu utiliser la machine entre temps). Ce phénomène n'est pas observé dans le cas des MDF étant donné qu'il manque des données. Il y a donc besoin de mener des études complémentaires pour étudier l'effet de la pression sur la quantité de matières enlevées. Dans le sens où on cherche à relier les paramètres de rugosité avec les perceptions sensorielles, le fait que le deuxième groupe soit décalé n'est pas très grave. On peut ainsi s'attendre à ce qu'il ait aussi un décalage au niveau des paramètres de rugosité ou de perception sensorielle de rugosité pour ces deux groupes de matériaux.



(a) (b)

FIG. 2.6 – Quantité de matières enlevées pour chaque taille des grains de ponçage étudiée. a) MDF poncés b) Bois poncés

2.2 Caractérisation instrumentale des paramètres physiques de rugosité de surface

2.2.1 Méthode d'acquisition de la topographie de surface

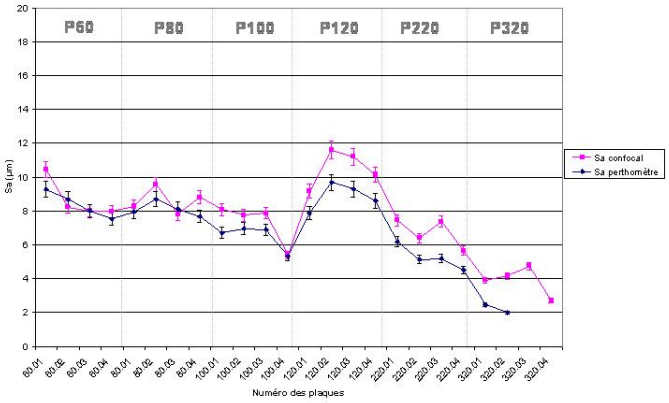
2.2.1.1 Techniques d'acquisition de la topographie de surface

Afin de dresser les cartes d'altitude des surfaces, nous avons d'abord comparé deux méthodes d'acquisition :

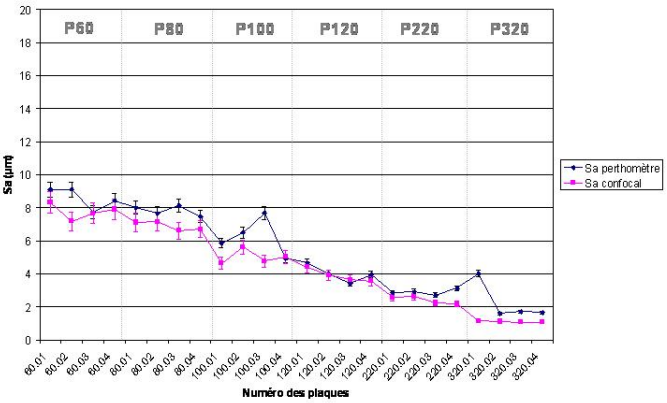
1. la station Micromesure développée par STIL qui réalise la numérisation 3D de la surface. Cet équipement est constitué d'un capteur point CHR 150 fonctionnant sur le principe de l'imagerie confocale à champ étendu dont le principe est présenté au paragraphe 1.1.2.1.2. L'échantillon est déplacé sous le capteur par l'intermédiaire d'un système orthogonal de tables de translation motorisées pilotées depuis un ordinateur PC suivant deux axes (X et Y). Le capteur est composé d'un crayon optique CHR avec un objectif à chromatisme axial et d'un coffret optoélectronique contenant la source lumineuse (émettant dans la gamme de 400 à 800 nm), le spectromètre d'analyse et le processeur de traitement. L'objectif et le coffret optoélectronique sont reliés entre eux par une fibre optique de 2 m. Nous avons utilisé le crayon optique de profondeur de champ de mesure de 300 μm car l'amplitude de la rugosité du bois rentre bien dans ce champ. Le logiciel d'interface Surface Map (Stil) permet de paramétrer librement les pas d'échantillonnage (Δx, Δy), la vitesse de balayage, la cadence d'acquisition et les régions à mesurer.
2. le perthomètre laser disponible à l'IUT de Tarbes afin de valider les mesures réalisées avec le rugosimètre confocal. La station de mesure est constituée d'un capteur laser qui fonctionne selon le principe de focalisation dynamique d'un rayonnement infrarouge. Le rayonnement infrarouge d'une diode laser est réuni en un faisceau lumineux et guidé vers l'objectif. Cet objectif focalise le faisceau de manière à former un foyer de 2 μm de diamètre à une distance de 10 mm de l'orifice de sortie. Le faisceau réfléchi par la surface est dirigé vers un détecteur qui reçoit un signal maximal quand la surface de la pièce à mesurer est positionnée au point de focalisation. Un système de réglage en hauteur et de nivelage permet de positionner l'objectif de façon à ce que le rayon laser soit toujours focalisé correctement sur la surface.

Les caractéristiques du crayon optique du rugosimètre confocal et du palpeur optique du perthomètre sont présentées dans le tableau 2.2. En termes de caractéristiques techniques (notamment la résolution), ces deux techniques sont comparables, les deux fonctionnant en mode sans contact. Ce sont les longueurs d'ondes qui diffèrent : le rugosimètre confocal utilise la lumière blanche tandis que le rugosimètre laser utilise l'infrarouge. Afin de vérifier la performance de ces deux appareils, nous avons réalisé des essais en comparant les valeurs du paramètre de rugosité S_a calculés avec les deux appareils sur les surfaces des plaques de MDF et de bois. Un même protocole expérimental a été adopté : même taille de la surface d'acquisition (17,5 mm x 17,5 mm), même intervalle d'acquisition (2,17 μm x 350 μm) et même filtrage (gaussien avec un « cut-off » de 2,5 mm). Mais les mesures n'ont pas été faites à la même position *(x, y)* dans le plan de la surface, les zones mesurées ne sont donc pas forcément les mêmes. Les résultats sont résumés dans les figures 2.7.

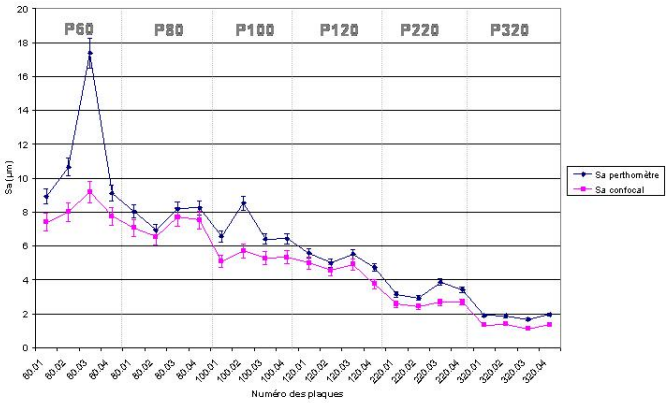
Que ce soit pour le MDF ou pour le bois, on observe une évolution similaire des valeurs de S_a pour tous les différents degrés de papiers de ponçage. Les coefficients de corrélation r^2 sont de 0,93 pour le MDF et de 0,95 pour le bois. Il y a juste un léger déphasage de l'ordre de 1 μm. On peut ainsi dire que les mesures peuvent être reproduites et les paramètres ont un sens. Cependant, le déphasage est inverse pour le MDF et le bois (que ce soit la surface tangentielle ou radiale). Deux hypothèses peuvent être formulées : soit les deux appareils ne définissent pas le plan moyen de la même manière, soit les différences de mesure proviennent des acquisitions des profils dans les zones de vallées. Pour expliquer ce déphasage, examinons les paramètres de distribution statistique des altitudes topographiques autour de la moyenne S_{sk} et S_{ku} (figure 2.8). On observe des



(a) MDF

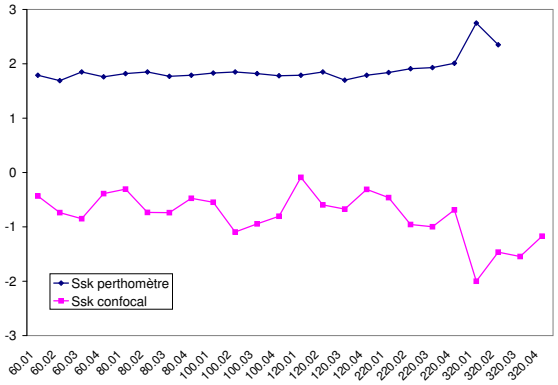


(b) Bois tangentiel

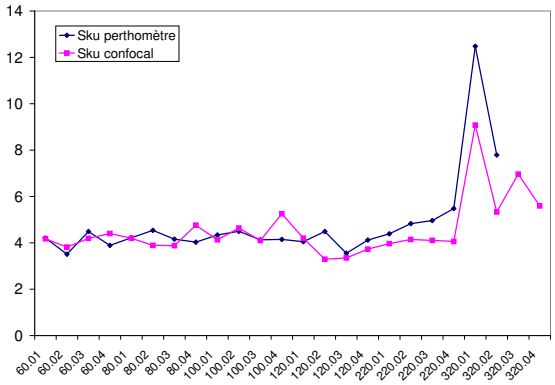


(c) Bois radial

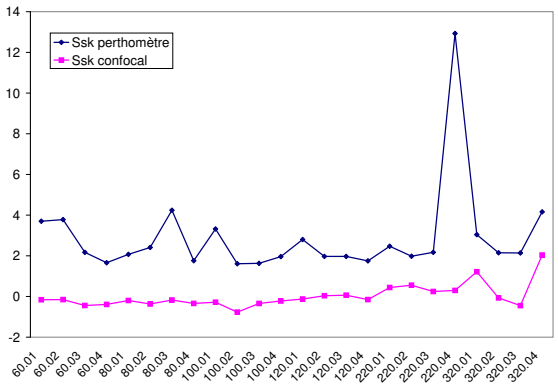
FIG. 2.7 – Comparaison des valeurs de S_a calculées à partir du rugosimètre laser et du rugosimètre confocal a) sur les surfaces des plaques de MDF poncées, b) sur les surfaces tangentielles des plaques de bois poncées, c) sur les surfaces radiales des plaques de bois poncées



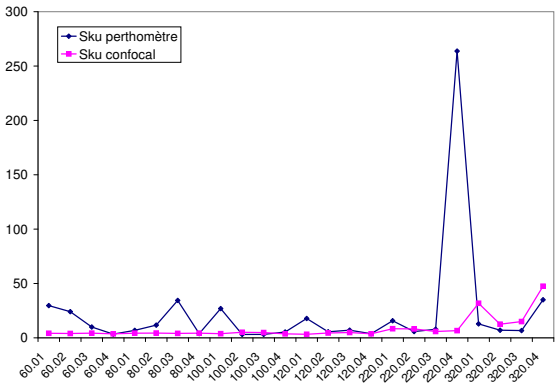
(a) MDF



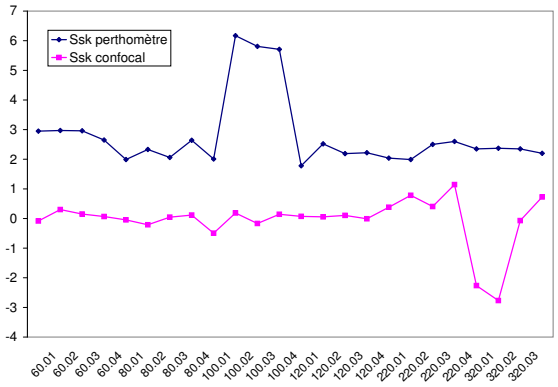
(b) MDF



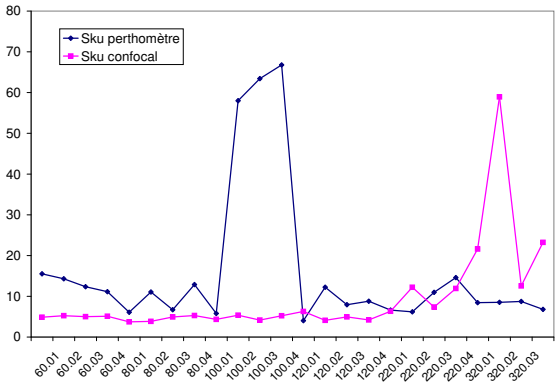
(c) Bois tangentiel



(d) Bois tangentiel



(e) Bois radial



(f) Bois radial

FIG. 2.8 – Comparaison des valeurs de S_{sk} et S_{ku} calculées à partir du rugosimètre laser et du rugosimètre confocal : sur les surfaces des plaques de MDF poncées (a, b), sur les surfaces tangentielles des plaques de bois poncées (c, d), et sur les surfaces radiales des plaques de bois poncées (e, f)

Caractéristiques	Crayon (Rugosimètre confocal)	Laser (Perthomètre)
Plage de mesure « en Z »	300 μm	500 μm
Distance de travail	4.5 mm	10 mm
Angle limite	+/-30°	+/-13°
Précision	100 nm	200 nm
Résolution latérale	2 μm	2 μm
Résolution axes X et Y	0.1 μm	2 μm
Focale	8 mm	
Diamètre du spot	4 μm	2 μm
Ouverture numérique	0,5	
Longueur d'onde	400 - 800 nm	780 nm

TAB. 2.2 – Caractéristiques du crayon optique « 300 μm » du rugosimètre confocal et du palpeur optique LS10 du perthomètre

différences significatives entre les paramètres S_{sk} et S_{ku} calculés avec les deux instruments. Pour tous les types de surfaces étudiés, le paramètre S_{sk} mesuré par le perthomètre est systématiquement supérieur à 1, ce qui veut dire que la surface comporte plus de pics que de creux par rapport au plan moyen. Le rugosimètre confocal trouve l'inverse : la distribution des altitudes est symétrique pour les surfaces radiales et tangentielles du bois ($S_{sk} \approx 1$), la surface comporte plus de creux que de pics pour les surfaces de MDF ($S_{sk} \prec -1$). En ce qui concerne le paramètre S_{ku}, les mesures des deux appareils ne sont pas corrélées mais les valeurs de S_{ku} sont tous supérieures à 3, ce qui traduit une distribution des altitudes resserrée autour du plan moyen (cf. figure 1.12, paragraphe 1.1.2.1.5). On peut ainsi supposer que la différence de comportement des deux appareils réside dans la récupération des faisceaux réfléchis provenant des nombreuses vallées serrées sur les surfaces des matériaux étudiés. On sait que la surface du matériau bois est une surface complexe pouvant présenter un problème de mesure à cause de l'existence des zones des fibres sectionnées, des arrachements de fibres ou paquets de fibres. Les dimensions de ces éléments sont plus grandes que le diamètre du faisceau. Les signaux peuvent ainsi se perdre dans les vallées et mal renseigner le capteur des rugosimètres.

Des mesures supplémentaires ont montré que les paramètres S_v, S_p, S_k, S_{vk}, et S_{pk} mesurés par les deux appareils sont aussi corrélés [95]. Ainsi, malgré des valeurs différentes des paramètres de distribution des altitudes topographiques autour de la moyenne, on peut dire le choix d'échantillonnage qui a été adopté ici est bon, car même avec un prélèvement différent sur la surface et deux appareillages différents, des résultats similaires des paramètres de rugosité (exceptés S_{ku} et S_{sk}) sont obtenus. Puisque les deux méthodes sont reproductibles, nous avons utilisé les deux pour réaliser cette thèse.

2.2.1.2 Définitions des paramètres d'acquisition de la topographie de surface

2.2.1.2.1 Choix du filtre et du pas d'acquisition Dans ce travail où les sujets évaluent les propriétés sensorielles de la surface du bois, le stimulus est représenté par la pression provoquée par le déplacement du doigt sur la surface du matériau. Dans ce sens, nous avons émis une hypothèse selon laquelle le stimulus provoqué par le contact des pics de rugosité sur le doigt peut être assimilé à une vibration avec une fréquence donnée. Le doigt agirait comme s'il filtre le signal de rugosité de surface. Ce signal filtré est ensuite interprété par le cerveau. Tout stimulus au-dessous du seuil de sensibilité du doigt ne serait pas perçu. La définition de ce seuil est présentée ci-après. Nous avons ainsi décidé de filtrer le profil brut de rugosité en choisissant un filtre en fonction de la sensibilité du doigt.

En considérant que lors des évaluations sensorielles, le doigt est déplacé sur la surface à une vitesse d'environ 9 cm/s (ce chiffre équivaut à celui calculé par Hollins [58]) et sachant que le doigt peut percevoir des vibrations d'environ 0.1 μm à 300 Hz [9], on peut en déduire le seuil de sensibilité du doigt à la vibration selon l'équation 2.1.

$$Longueur = \frac{\text{Vitesse}}{\text{Fréquence}} \tag{2.1}$$

Le seuil de sensibilité du doigt à la vibration s'élève ainsi à 300 μm. C'est pourquoi nous avons choisi de réaliser un filtrage passe-haut du profil brut, avec un filtre gaussien de « cut-off » de 300 μm. Nous avons décidé de prendre un pas d'acquisition dix fois plus petit que le « cut-off » (Δx = 30 μm, Δy = 30 μm), afin de ne pas perdre des informations et de voir le maximum de détails. Ce seuillage est adopté afin de concilier la pertinence de l'information avec le temps d'acquisition qui peut être très long dès lors qu'on réduit le pas d'acquisition.

2.2.1.2.2 Définition de la taille et du nombre de surfaces d'analyse La taille et le nombre des surfaces à étudier par plaque dépendent de l'objectif poursuivi, de la variabilité observée et de la précision demandée. C'est la raison pour laquelle une analyse préliminaire a été réalisée afin de définir l'échantillonnage adapté à notre étude. Les paramètres de rugosité S_a et S_q ont été calculés sur un nombre croissant d'acquisitions sur des surfaces mesurant 17,5 mm x 17,5 mm pour chaque plaque de MDF étudiée. L'évolution de leur moyenne et leur écart-type a ensuite été analysée (figure 2.9) afin de déterminer le nombre d'acquisitions nécessaires pour représenter la surface entière de la plaque avec une précision de 95% [1].

[1] L'intervalle de confiance à 95% (valeur de l'erreur de première espèce égale à 0,05) représente l'intervalle où la valeur de la médiane pourrait varier dans l'hypothèse où il serait possible de répéter l'expérience un nombre infini de fois

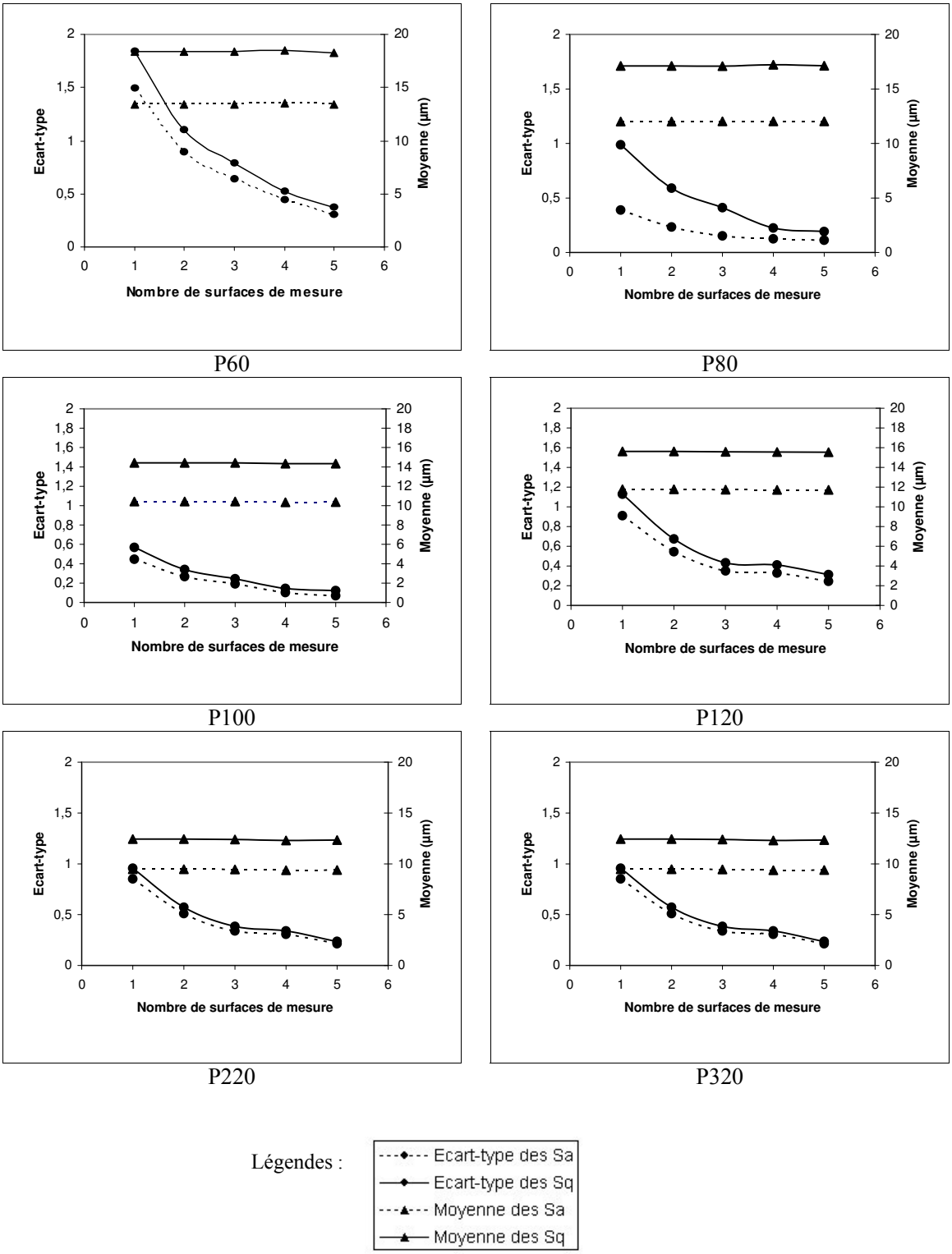


FIG. 2.9 – Evolution des moyennes et écart-types de S_a et S_q en fonction du nombre d'acquisitions sur les plaques de MDF poncés avec des grains différents. Taille de la mesure : 17,5 mm x 17,5 mm, Pas d'acquisition : 30 μm x 30 μm

Selon la figure 2.9, c'est à partir d'un nombre d'acquisitions égal à 5 (pour une surface d'acquisition de taille 17,5 mm x 17,5 mm) que les écart-types de S_a et S_q se stabilisent. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de réaliser quatre acquisitions de taille légèrement supérieure 20 mm x 20 mm. Il est évident que le nombre de modalités devrait augmenter pour des surfaces plus hétérogènes que celle du MDF pour obtenir la même précision de la variabilité. Mais en raison de la durée que nécessite l'acquisition de la topographie d'une surface de 20 mm x 20 mm (une acquisition dure 2 heures), nous avons décidé de limiter le nombre d'acquisitions à 4, même pour les échantillons de bois.

2.2.1.2.3 Récapitulatifs des opérations appliquées sur chaque fichier brut de carte d'altitude Le tableau 2.3 présente l'ensemble des plaques étudiées ainsi que les cartes d'altitudes qui ont été établies dans le cadre de ce travail. Avec 56 surfaces et 4 acquisitions par surface, on a un nombre total de 224 fichiers bruts de carte d'altitudes à étudier. Et pour chaque carte d'altitudes, plusieurs opérations ont été appliquées avant le calcul des paramètres de rugosité. La figure 2.10 résume l'historique de ces opérations.

Types de plaques	Nombre de plaques	Répétitions	Nombre d'acquisitions par plaque	Nombre total de cartes d'altitudes à étudier
MDF	6 plaques (poncées avec des tailles de grains différents)	4	4	96
Bois	6 plaques (poncées avec des tailles de grains différents)	4	4	96
Divers	8 plaques	-	4	32

TAB. 2.3 – Récapitulatifs du nombre de cartes d'altitudes à étudier

2.2.2 Extraction des paramètres de rugosité

2.2.2.1 Définition des paramètres de rugosité de surface étudiés

Un nombre total de 38 paramètres rugosimétriques (figure 2.11) caractérisant la rugosité de surface ont pu être calculés grâce au logiciel de post-traitement : Mountains Map (Stil). Ils incluent les paramètres définis selon le rapport EUR 15 178 et d'autres paramètres proposés par le logiciel. Ils ont été mesurés sur le profil brut et le profil filtré à 300 μm. Les définitions des paramètres de rugosité qui n'ont pas été présentés précédemment dans le paragraphe 1.1.2.1.5 sont présentées en annexe C.

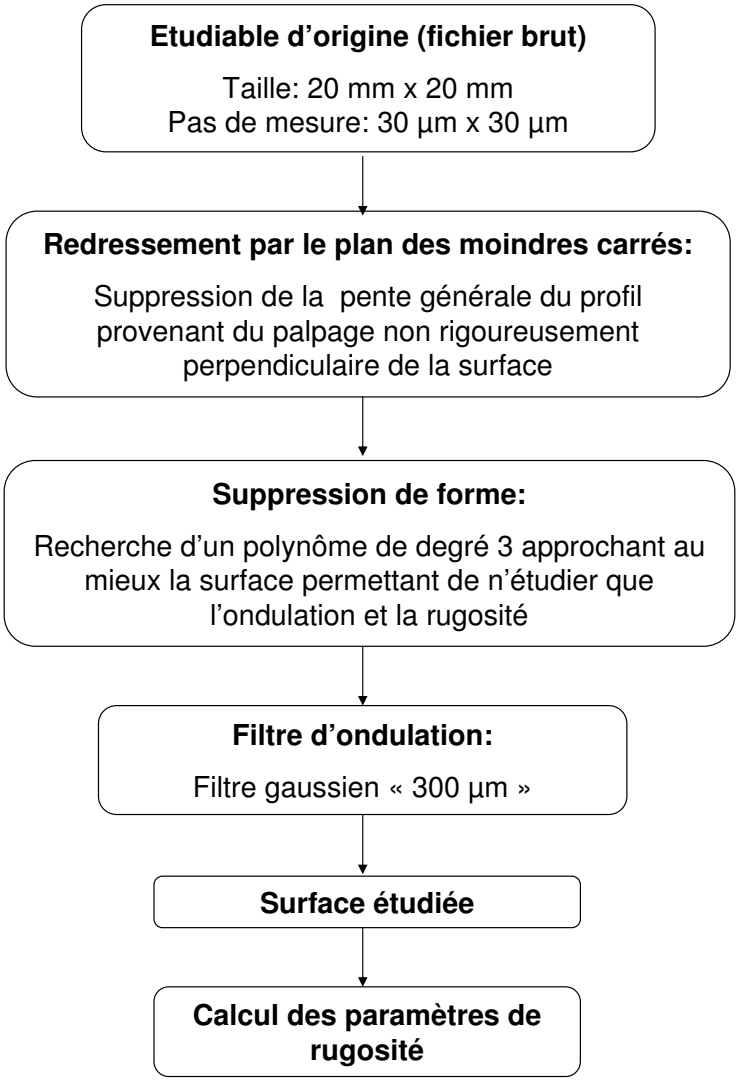


FIG. 2.10 – Algorithme des opérations appliquées sur chaque fichier brut de carte d'altitudes

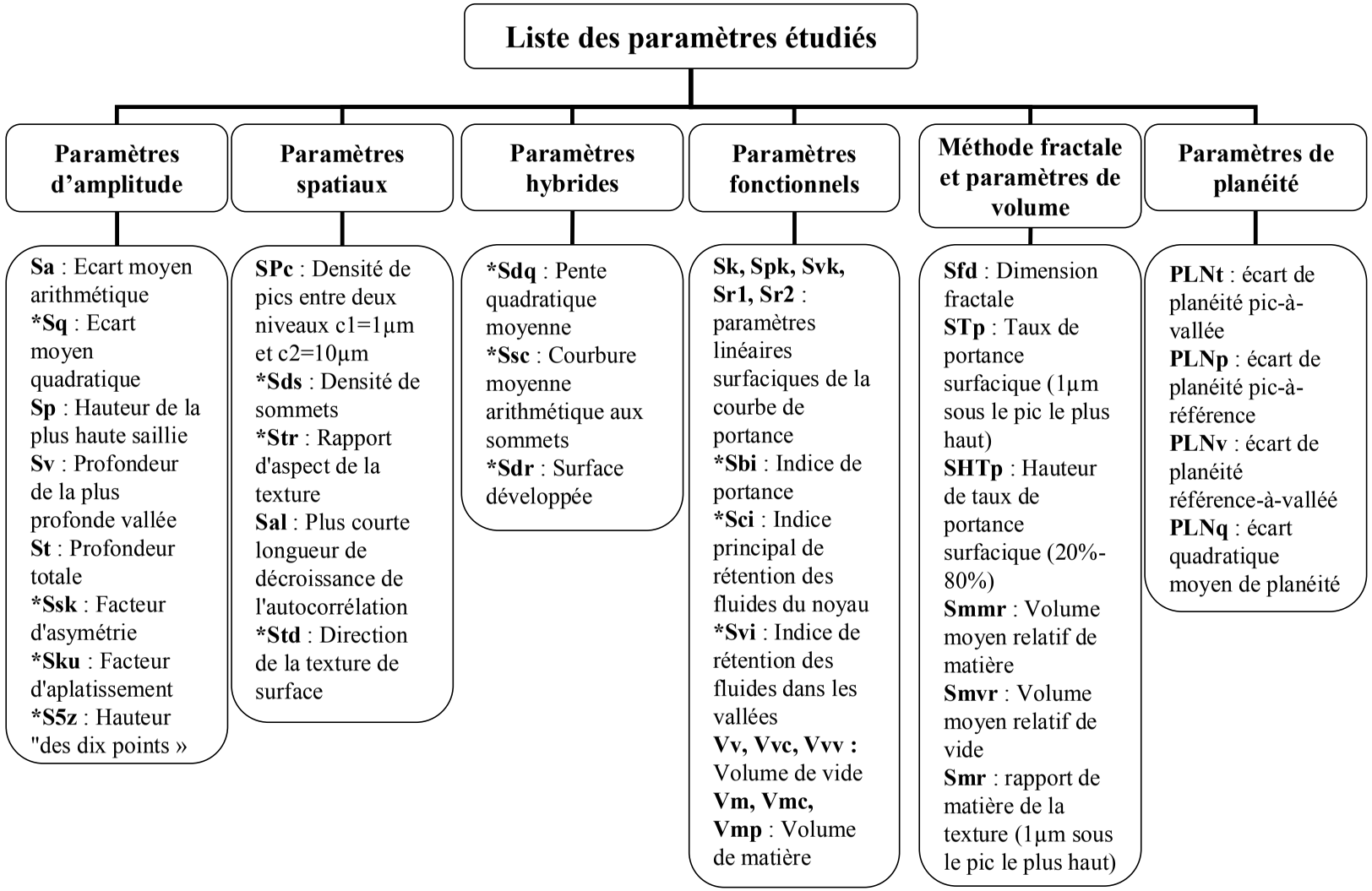


FIG. 2.11 – Liste des paramètres de rugosité étudiés, leur définition est présentée dans l'annexe C
* : les 13 paramètres inclus dans le rapport EUR 15 178 [10] définis dans le paragraphe 1.1.2.1.5

2.3 Caractérisation instrumentale des paramètres physiques liés à la vision

Nous voulons mesurer des paramètres qui sont directement reliés à l'appréciation visuelle de l'effet produit par les plaques de bois de pin maritime et ses dérivés. Nous nous sommes intéressés à un seul des attributs de la perception visuelle qui est la couleur. La couleur se décompose en deux parties : la part chromatique et la part achromatique. La caractérisation de l'information couleur portée par les plaques requiert trois étapes : l'acquisition des images en couleur, le traitement et l'analyse de ces images afin d'extraire les informations sur leur contenu perceptuel.

2.3.1 Spécification du signal lumineux capturé par des valeurs (trois composantes trichromatiques)

2.3.1.1 Acquisition d'images

La couleur des échantillons a été mesurée grâce à des acquisitions d'images sur toutes les plaques de bois étudiées. Les conditions de prise de vue ont été maintenues constantes pour toutes les acquisitions d'images, il en est de même pour l'échelle.

- Le système d'acquisition d'images est constitué d'un appareil photo numérique couleur Minolta Dimage7 positionné verticalement au-dessus de l'échantillon.
- L'image de la totalité de la surface de l'échantillon est capturée avec l'appareil photo avec une focale de 50 mm équiv. 135, à sa résolution maximale (2560 x 1920 pixels).
- On sait que le pouvoir séparateur de l'oeil est l'écart angulaire $\beta = 3 * 10^{-4} rad$ [6]. A une distance D de 30 cm correspondant à la distance moyenne de vue des échantillons par les sujets, l'oeil est apte à distinguer des points de l'image séparés d'une distance d = 90 μm selon l'équation 2.2.

$$d = \beta * D \tag{2.2}$$

  Pour l'acquisition d'image, l'appareil photo est rapproché à une distance de 50 cm de l'échantillon de telle sorte qu'avec cette résolution, un pixel mesure au maximum 90 μm x 90 μm, correspondant au pouvoir séparateur de l'oeil à une distance de 30 cm de l'échantillon. La résolution exacte est alors de 75 μm x 75 μm.
- La balance des blancs [2] de l'appareil photo numérique a été réalisée manuellement en utilisant le carré achromatique le plus clair sur une mire couleur Macbeth.
- Les conditions d'éclairage ont été maintenues constantes durant tout l'essai. L'échantillon est illuminé à l'aide de deux lampes néons (de 60 cm de longueur) situées de part et d'autre de l'échantillon, avec une température couleur de 5400 K (Orsam, Daylight, 18 W, 1000 lm) et un indice de rendu de couleur (Ra) d'environ 98 %.

[2] Le terme blanc correspond à une couleur sans teinte (achromatique) et de luminosité élevée

2.3.1.2 Transposition de l'espace initial des données dans un espace Lab

Les images acquises par l'appareil photo numérique sont codées dans un espace couleur RVB dépendant du système d'acquisition employé (caractéristiques des capteurs, réglages optiques, vitesse de prise de vue, etc.). Pour cette étude, où nous voulons relier des perceptions sensorielles à des mesures physiques, nous avons décidé d'utiliser l'espace Lab pour mesurer les couleurs des matériaux bois car cet espace permet de résoudre les problèmes liés à :

- la dépendance de la mesure vis-à-vis du système d'acquisition,
- l'uniformité de la répartition des couleurs dans l'espace au sens de la discernabilité des écarts de couleur. Un espace uniforme est un espace dans lequel des distances égales représentent des différences d'égale amplitude en termes de perception [115].

Comme représenté dans la figure 2.12, dans le système Lab :

- L correspond à la luminosité d'une surface estimée par rapport à la luminosité d'une surface « blanche » éclairée de la même façon.
- a représente la composante chromatique rouge-vert (négatif pour le vert, positif pour le rouge).
- b représente la composante chromatique jaune-bleu (négatif pour le bleu, positif pour le jaune).

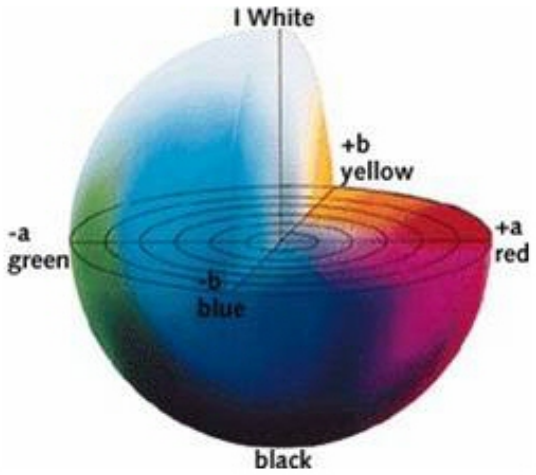


Fig. 2.12 – Espace couleur uniforme Lab

Le passage de l'espace RVB à l'espace Lab est réalisé en calibrant le système d'acquisition (figure 2.13) - procédé élaboré en collaboration avec D. Lafon [71, 70]. Il s'agit de rechercher la fonction de transfert qui permet de passer de l'espace RVB à l'espace XYZ. Cette fonction de transfert est une transformation affine, son calcul s'effectue d'abord par la mesure des valeurs (R, V, B) moyennes de chacun des 24 carrés de couleur uniforme de la charte Greta Macbeth à l'aide de l'appareil photo numérique. Ensuite avec le spectroradiomètre Spectrascan PR650, nous faisons de nouvelles mesures des valeurs (X, Y, Z) de la CIE [3] de ces mêmes carrés, dans les mêmes conditions d'éclairage que la prise de vue.

[3]CIE : Commission Internationale de l'Eclairage : c'est l'organisme officiel et international chargé de tous les problèmes de normalisation et définition de l'éclairage, et donc de la colorimétrie.

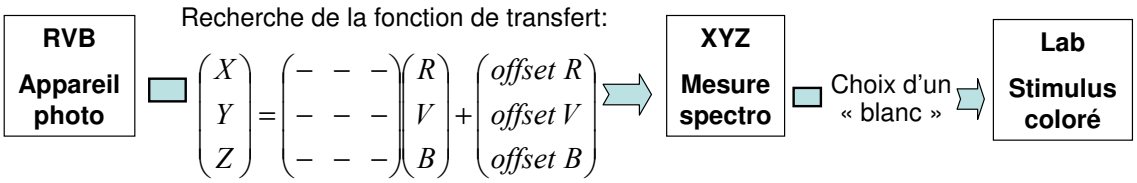


FIG. 2.13 – Schéma explicatif du calibrage

La transformation mathématique non linéaire qui permet de passer de l'espace XYZ à l'espace Lab est donnée par les équations 2.3 qui dépendent d'un choix d'un « blanc de référence » exprimé par ses coordonnées trichromatiques (X_n, Y_n, Z_n) sous les mêmes conditions d'éclairage.

$$\begin{array}{rcll} L & = & 116 f(\frac{Y}{Y_n}) - 16 & \\ a & = & 500[f(\frac{X}{X_n}) - f(\frac{Y}{Y_n})] & \\ b & = & 200[f(\frac{Y}{Y_n}) - f(\frac{Z}{Z_n})] & \\ \text{avec} & & & \\ f(\alpha) & = & \alpha^{1/3} & \text{si } \alpha \geq 0,008856 \\ f(\alpha) & = & 7,787\alpha + \frac{16}{116} & \text{si } \alpha \prec 0,008856 \end{array} \tag{2.3}$$

où α désigne tout à tour l'un des rapports $\frac{X}{X_n}$, $\frac{Y}{Y_n}$, $\frac{Z}{Z_n}$, (X_n, Y_n, Z_n) sont les valeurs tristimulaires d'un stimulus blanc sous un illuminant standard donné.

2.3.2 Analyse des coordonnées trichromatiques (L, a, b) des couleurs des images

L'analyse de la couleur et de la texture couleur des plaques de bois étudiées est basée sur l'analyse statistique et l'analyse spatiale des coordonnées trichromatiques des couleurs des images de ces plaques.

2.3.2.1 Analyse statistique

Afin de caractériser quantitativement la couleur de chaque éprouvette, une stratégie marginale a été employée, c'est-à-dire que la nature vectorielle des images couleur n'est pas exploitée. Pour cela une analyse statistique des composants L, a et b de tous les pixels constituant l'image a été réalisée afin d'obtenir des informations sur la couleur moyenne de la surface et la distribution statistique des couleurs autour de la moyenne. Ainsi, les valeurs moyennes (L_{mean}, a_{mean}, b_{mean}), les écarts-types (L_{std}, a_{std}, b_{std}), les minima (L_{min}, a_{min}, b_{min}), les maxima (L_{max}, a_{max}, b_{max}), les coefficients de symétrie (L_{sk}, a_{sk}, b_{sk}) et les coefficients d'aplatissement (L_{ku}, a_{ku}, b_{ku}) liés à la distribution des composants L, a, b des pixels dans l'image ont été calculés pour chaque éprouvette.

2.3.2.2 Analyses spatiales

Les matériaux utilisés dans cette étude ne sont pas de couleur unie mais présentent des textures, d'où la nécessité d'analyser la répartition spatiale des couleurs des pixels dans l'image pour compléter l'analyse statistique usuelle. Trois approches ont été utilisées pour caractériser la texture couleur des images : calcul des paramètres statistiques spatiaux, calcul des semi-variogrammes et établissement des courbes d'écart de couleur. Les deux premières approches relèvent d'une stratégie marginale alors que la troisième approche rend compte de la nature multicomposante de la couleur.

2.3.2.2.1 Paramètres de texture Nous voulions tester si les méthodes de calcul des paramètres de texture, comme utilisés pour caractériser la rugosité de surface peuvent être appliqués à la couleur des pixels d'une image. Nous avons ainsi calculé les paramètres de texture sur les valeurs du composant L des pixels des images.

Trois propriétés spatiales ont été étudiées :

- Périodicité de la texture : cela consiste à déterminer si la texture couleur est directionnelle ou isotrope. Une texture est dite directionnelle quand elle contient des détails orientés dans une direction spatiale privilégiée de l'image. Il s'agit donc de calculer, comme pour la rugosité de surface, le paramètre S_{tr} à partir de la fonction d'autocorrélation (équation 1.6). Une valeur de $S_{tr} \succ 0,5$ indique une répartition des couleurs d'une manière isotrope et une valeur de $S_{tr} \prec 0,3$ indique une répartition anisotrope.
- Orientation de la texture : si la texture est directionnelle, le paramètre S_{td}, comme défini dans l'équation 1.7, donne l'angle d'orientation privilégié de la texture couleur par rapport à l'axe Y.
- Taille de la structure : il s'agit de déterminer la taille moyenne des éléments structurels de la texture couleur. La taille moyenne de la structure est liée au paramètre S_{al} qui représente la distance entre l'origine et l'abscisse du pic maximal du profil d'autocorrélation, c'est-à-dire la fréquence dominante.

2.3.2.2.2 Semi-variogramme Des études géostatistiques ont été utilisées pour caractériser les autotocorrélations spatiales des composants couleur L, a, b des pixels des images. A l'origine, la géostatistique s'est développée pour des applications minières, avec les travaux de D. Krige sur l'estimation des teneurs dans les mines d'or sud-africaines. Le formalisme et la théorie ont été développés sous l'impulsion de G. Matheron. Progressivement, ces techniques ont été utilisées dans d'autres domaines. L'approche géostatistique est utilisée généralement pour un objectif d'estimation locale, c'est à dire pour prévoir la valeur de la variable en un point en se servant des données existantes. Dans ce travail, la géostatistique sera utilisée dans un but de caractérisation physique.

La structuration spatiale de la variable est estimée à l'aide de l'analyse de la semi-variance (γ), qui est une mesure de la variance entre couples de points séparés par une distance donnée. Si l'on dispose de *N(h)* couples de données distantes de h, l'expression de la semi-variance expérimentale dans une direction donnée et pour la distance spécifique h

est définie par l'équation 2.4.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_{i+h}) - Z(x_i)]^2 \tag{2.4}$$

- où $Z(x_i)$ représente la valeur de la variable associée au point x_i
- $Z(x_{i+h})$ est la valeur de la variable à la distance h
- h : pas
- *N(h)* : nombre de paires séparées de h dans la direction considérée.

Le graphique montrant l'évolution de γ en fonction de la distance entre les couples de points s'appelle « semi-variogramme ». Le semi-variogramme est calculé pour chacun des composants L, a et b. Pour une direction donnée, le semi-variogramme indique ainsi si l'écart entre les valeurs prises par la variable dépend ou non de la distance entre les points « de mesure ».

Très souvent, la semi-variance $\gamma(h)$ augmente jusqu'à atteindre une valeur limite (appelée *palier*) correspondant à une valeur de la distance h (appelée *portée*), à partir de laquelle la variance est maximum et demeure constante. Les couples de points séparés par une distance inférieure à la portée sont statistiquement dépendants, au-delà ils deviennent indépendants (figure 2.14). Un modèle statistique $\gamma(h)$ peut être ajusté à ce semi-variogramme de manière à décrire la structure spatiale de la variable analysée.

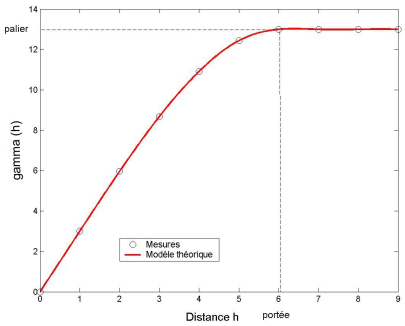
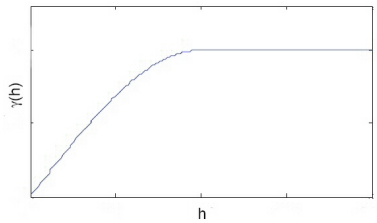
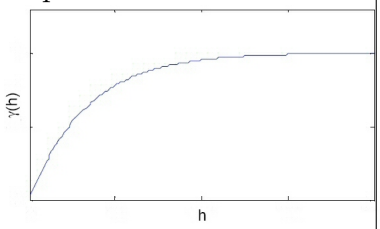
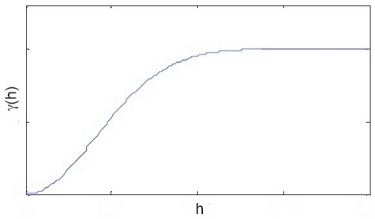
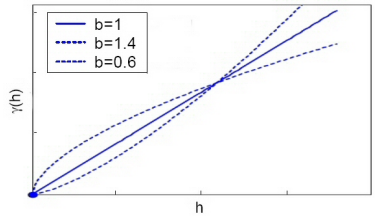
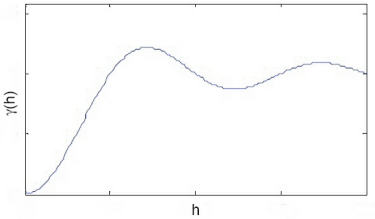


FIG. 2.14 – Forme générale d'un semi-variogramme

Les trois principales caractéristiques d'un semi-variogramme sont :
- le comportement à l'origine : régulier ou pas,
- le comportement à l'infini : l'existence ou non d'un palier,
- le comportement entre l'origine et l'infini.

On classe ainsi les schémas théoriques d'usage courant en trois types [67] : le schéma à palier, le schéma sans palier, le schéma à effet de trou. Le tableau 2.4 donne quelques schémas de base. Ces schémas peuvent être combinés pour modéliser un semi-variogramme expérimental. Pour plus de détails, on peut se référer à la bibliographie [5, 31, 67].

Le calcul des semi-variogrammes peut être effectué suivant plusieurs directions. Ainsi, si les semi-variogrammes présentent des allures différentes dans chaque direction, leur comparaison permet de révéler et de préciser certaines anisotropies.

Schéma à palier		
avec comportement linéaire à l'origine		avec comportement parabolique à l'origine
Sphérique	Exponentiel	Gaussien
		
$\gamma(h) = C(1,5h/a - 0,5(h/a)^3)$ si $0 \prec h \prec a$	$\gamma(h) = C(1 - exp(-3h/a)$	$\gamma(h) = C(1 - exp(-3(h/a)^2)$
Schéma sans palier		Schéma à effet de trou
h^b 		Effet de trou 
$\gamma(h) = C(\|h\|/a)^b$ $\|h\| \succ 0, 0 \leq b \prec 2$		$\gamma(h) = 1 - sin(h)/h,\ h \geq 0$

TAB. 2.4 – Schémas de base des semi-variogrammes

2.3.2.2.3 Courbe d'écart de couleur L'analyse spatiale a été complétée par une approche globale qui consiste à étudier l'écart de couleur moyen noté ΔE entre couples de pixels séparés par une distance donnée h. L'intérêt de cette approche globale est qu'elle intègre les informations portées par les trois coordonnées trichromatiques des couleurs des pixels. En effet, l'observateur ne distingue pas séparément les informations apportées par L, a et b. L'écart de couleur moyen renseigne ainsi sur la structuration des couleurs reconnues comme différentes par l'observateur. Le calcul de ΔE en fonction de la distance est similaire à celui du semi-variogramme selon l'équation 2.5.

$$\Delta E(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[\sqrt{(L_{i+h} - L_i)^2 + (a_{i+h} - a_i)^2 + (b_{i+h} - b_i)^2} \right] \tag{2.5}$$

- où L_i, a_i, b_i représentent les valeurs des coordonnées colorimétriques associées au point x_i
- L_{i+h}, a_{i+h}, b_{i+h} est la valeur des coordonnées colorimétriques à la distance h
- h : pas
- *N(h)* : nombre de paires de points séparés par la distance h.

La comparaison entre les semi-variogrammes et les courbes d'écart de couleur fait l'objet de travaux en cours en collaboration avec O. Eterradossi. Le passage d'un espace

couleur à l'autre, l'analyse statistique des valeurs de L, a et b et le calcul des courbes d'écart de couleur ont été réalisés sous Matlab R13 (MathWorks, EU) [82]. Le calcul des semi-variogrammes a été réalisé avec le logiciel libre R [62, 89].

2.4 Analyse sensorielle

2.4.1 Objectifs poursuivis

Nous nous sommes fixés six objectifs pour les tests sensoriels :
- Objectif 1 : Observation du comportement du consommateur
- Objectif 2 : Connaître les descripteurs du toucher du bois
- Objectif 3 : Déterminer le seuil de discernabilité des échantillons
- Objectif 4 : Déterminer les produits favorablement perçus d'un point de vue tactile
- Objectif 5 : Impact du visuel sur le toucher par rapport à un critère de rugosité
- Objectif 6 : Déterminer les produits favorablement perçus d'un point de vue visuel

2.4.2 Choix des tests sensoriels

Fig. 2.15 – Les conditions du test sensoriel

Les types de tests appropriés à cette étude ont été déterminés en fonction des objectifs précités. Ils sont présentés dans le tableau 2.5. En raison de l'importance du travail que cela nécessite, nous avons décidé de réaliser les tests sensoriels uniquement sur une partie des échantillons :
- six échantillons de bois de pin poncés avec les six grains de P60 à P320 (notés BM60, BM80, BM100, BM120, BM220, BM320),
- six échantillons de MDF poncés avec les six grains de P60 à P320 (notés MDF60, MDF80, MDF100, MDF120, MDF220, MDF320),
- huit échantillons de divers matériaux dérivés du bois avec un état de surface tels qu'ils ont été fournis par les entreprises (notés BM, OSB, BM, PP, CP, PD, PSL,

RET).

Les tests hédoniques [4] sont réalisés en premier avant que les notions de rugosité soient introduites dans les tests, cela permettra d'éviter que les sujets soient influencés par le critère de rugosité. Les tests tactiles sont organisés après. Les tests visuels sont faits en dernier.

Nous avons ainsi demandé au sujet de toucher la surface de la plaque avec la face interne des doigts, sans aucune spécification particulière quant au nombre de doigts à utiliser ni au sens d'exploration. Les sujets ont été autorisés à utiliser les deux mains s'ils le souhaitent et à réessayer pour s'assurer de leur réponse. Aucune limitation dans le temps n'a été imposée. Les échantillons et les procédures durant les tests tactiles, visuels et hédoniques sont similaires, excepté que les sujets ne touchent pas les échantillons durant les tests visuels. Ils ont les yeux bandés pendant les tests tactiles et hédoniques pour limiter les interactions entre les deux modalités : toucher et vision. La figure 2.15 représente un sujet en train de faire une évaluation tactile des échantillons.

[4]hédonique : désigne la sensation de plaisir

Objectifs du test sensoriel	**Type de test**	**Descriptions**	**Panneaux à présenter**
Objectif 1 : Observation du comportement du consommateur		Noter la taille de la surface explorée et le sens de l'exploration tactile pour chaque échantillon évaluée	
Objectif 2 : Connaître les descripteurs du toucher du bois	Test descriptif (en aveugle)	Présenter à chaque sujet un à un les panneaux et leur demander de décrire librement (sans limitation du nombre de descripteurs) leurs sensations au contact des échantillons et ce que le toucher leur évoque, en utilisant un à trois descripteurs, sans décrire verbalement la signification des descripteurs	BM, OSB, BM, PP, CP, PD, PSL, RET
Objectif 3 : Déterminer le seuil de perception tactile d'un échantillon à un autre	Test triangulaire (en aveugle)	Présenter aux sujets deux produits à comparer, l'un étant doublé, l'autre pas. La tâche consiste à désigner l'échantillon perçu comme différent. Une réponse doit être donnée même en cas d'incertitude	– Séance 1 : MDF60, MDF80, MDF100, MDF120, MDF220, MDF320 – Séance 2 : BM60, BM80, BM100, BM120, BM220, BM320

Objectifs du test sensoriel	Type de test	Descriptions	Panneaux à présenter
Objectif 4 : Impact du visuel sur le toucher par rapport au critère de rugosité	Test de classement suivant le critère « rugosité tactile » (en aveugle)	Les échantillons sont disposés sur la table. Il est demandé au sujet de les ranger, sur le critère « rugosité tactile », par ordre d'intensité croissante ou décroissante. Le rang 1 est ensuite affecté pour le matériau le plus rugueux et le rang 6 pour le matériau le moins rugueux	– Séance 1 : MDF60, MDF80, MDF100, MDF120, MDF220, MDF320 – Séance 2 : BM60, BM80, BM100, BM120, BM220, BM320 – Séance 3 : BM, OSB, BM, PP, CP, PD, PSL, RET
	Test de classement visuel suivant le critère « impression de rugosité à la vue » (sans toucher)	Les échantillons sont disposés sur la table. Il est demandé au sujet de les ranger, sur le critère « rugosité tactile », par ordre d'intensité croissante ou décroissante. Le rang 1 est donné au matériau qui semble plus rugueux à la vue et le rang 6 au matériau qui semble le moins rugueux	
Objectif 5 : Déterminer les produits favorablement perçus d'un point de vue visuel	Test de classement hédonique (sans toucher)	Les échantillons sont présentés simultanément aux sujets et il leur a été demandé de les classer sur la base de leur caractère agréable à la vue. Le rang 1 est donné au matériau le plus apprécié et le rang 6 au le matériau le moins apprécié	BM, OSB, BM, PP, CP, BR, PSL, RET

Objectifs du test sensoriel	**Type de test**	**Descriptions**	**Panneaux à présenter**
Objectif 6 : Déterminer les produits favorablement perçus d'un point de vue tactile	Test de classement hédonique (en aveugle)	Les échantillons sont présentés simultanément aux sujets et il leur a été demandé de les classer sur la base de leur caractère agréable au toucher. Ils donnent le rang 1 au matériau le plus apprécié et le rang 6 au matériau le moins apprécié	– Séance 1 : MDF60, MDF80, MDF100, MDF120, MDF220, MDF320 – Séance 2 : BM60, BM80, BM100, BM120, BM220, BM320 – Séance 3 : BM, OSB, BM, PP, CP, BR, PSL, RET

TAB. 2.5 – Description des tests sensoriels avec la liste des panneaux à présenter pour chaque type de test

2.4.3 Mode de présentation des échantillons

Les échantillons sont présentés sous forme de plaques d'épaisseur de 8 mm et de dimensions 10 cm x 20 cm. Pour éviter le risque d'identification du produit, les échantillons sont codés grâce à un nombre de trois chiffres pris dans une « table des nombres au hasard » [106]. Chaque série de matériaux est étudiée indépendamment les unes des autres. Nous avons d'abord réalisé les tests sensoriels sur les échantillons les plus homogènes avant de travailler avec les échantillons qui sont plus hétérogènes. Ainsi, les tests sur les MDF poncés sont réalisés en premier, ensuite les tests sur la série des bois massifs poncés et enfin les tests sur la série des matériaux divers.

Pour les tests triangulaires, l'influence de l'ordre de présentation des échantillons est évitée en modifiant la position de l'échantillon non doublé d'un sujet à l'autre et d'une répétition à l'autre pour un même sujet. Pour les tests de classement, le choix des ordres de présentation est déterminé d'une manière aléatoire.

2.4.4 Les sujets

L'effectif de groupe nécessaire a été défini selon SSHA [106] et Sauvageot [100]. Le choix dépend du type d'épreuves et de la fiabilité attendue des résultats. L'effectif minimum nécessaire est calculé dans le tableau 2.6.

Pour cette étude, nous voulons caractériser le comportement de « l'observateur naïf ». C'est pourquoi, nous avons décidé de recruter des sujets naïfs, sans formation préalable sur les analyses sensorielles ni sur les sciences du bois, plutôt que d'utiliser un panel d'experts. Un panel d'experts aura des aptitudes sensorielles avancées et sera déjà entraîné à l'utilisation et à la quantification des descripteurs sensoriels. Selon le tableau 2.6, le nombre minimum de sujets requis pour que les tests sensoriels soient significatifs varie de 15 à 21 personnes selon le type de test.

Objectifs	**6 MDF poncés**	**6 bois poncés**	**8 divers panneaux**
Objectif 2 : Connaître les descripteurs du toucher du bois	6 panneaux 6 descriptions/pers. 15 descriptions/panneau ***15 personnes***	6 panneaux 6 descriptions/pers. 15 descriptions/panneau ***15 personnes***	8 panneaux 8 descriptions/pers. 15 descriptions/panneau ***15 personnes***
Objectif 3 : Déterminer la discernabilité des échantillons	3 panneaux 6 tests/pers. 18 tests/panneau ***18 personnes***	3 panneaux 6 tests/pers. 18 tests/panneau ***18 personnes***	8 panneaux 6 tests/pers. 18 tests/panneau ***21 personnes***
Objectif 4 : Déterminer les produits favorablement perçus d'un point de vue tactile	6 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***	6 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***	8 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***
Objectif 5a : Classer les matériaux suivant leur rugosité tactile	6 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***	6 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***	8 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***
Objectif 6 : Déterminer les produits favorablement perçus d'un point de vue visuel	6 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***	6 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***	8 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***
Objectif 5.b : Classer les matériaux suivant leur rugosité visuelle	6 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***	6 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***	8 panneaux 20 répétitions ***20 personnes***

TAB. 2.6 – Calcul de l'effectif minimum nécessaire du panel sensoriel pour chaque test réalisé

Ainsi pour cette étude un groupe de 22 sujets a été recruté pour les tests sur les séries de MDF, un autre groupe de 22 sujets pour les tests sur les séries des bois de pin et un dernier groupe de 22 sujets pour les tests sur les divers composites à base de bois, ce qui fait un total de 66 sujets naïfs différents. Les caractéristiques de chaque groupe sont similaires (tableau 2.7), ils sont tous droitiers, 20% font partie du personnel du laboratoire « Propriétés psychosensorielles des matériaux » de l'Ecole des Mines d'Alès ; 25% font partie du centre des matériaux de grande diffusion de l'Ecole des Mines d'Alès (mais n'ont pas encore pratiqué de tests sensoriels auparavant). Ce sont des sujets volontaires, non rémunérés.

Age	**Fréquence** (%)	**Genre**	**Fréquence** (%)
$\prec$20	4,55	Homme	54,55
20-30	31,82	Femme	45,45
30-40	40,91		
40-50	13,64		
$\succ$50	9,09		

TAB. 2.7 – Caractéristiques des panels

2.4.5 Conditions opératoires

Les tests se déroulent dans une pièce éclairée à la lumière naturelle, sans que la température ni l'humidité relative ne soient contrôlées. Nous avons pris soin à ce que les tests se fassent pendant les temps ensoleillés avec une température ambiante aux environs de 22° pour que les tests se fassent tous dans des conditions similaires. Les évaluations pour chaque type de matériaux sont réalisées sur une période de deux semaines. Les tests sont menés individuellement à raison d'environ deux à trois personnes par jour. Une séance d'évaluation dure entre 20 et 30 minutes.

La durée de chaque type de test, le mode de toucher et l'ordre de passage de chaque sujet sont notés au fur et à mesure.

Chapitre 3

Caractérisations physiques de la rugosité et de la couleur des matériaux bois et ses dérivés

Ce troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats instrumentaux de caractérisation de la rugosité de surface des matériaux à base de bois de pin maritime étudiés et de caractérisation de l'impact visuel des produits sur les sujets . Il s'agit des analyses des paramètres de rugosité et des analyses statistiques et spatiales des coordonnées trichromatiques des couleurs des images des échantillons.

3.1 Caractérisation instrumentale de la rugosité de surface

Il s'agit donc ici d'analyser les paramètres de rugosité de surface calculés à partir des altitudes topographiques acquises à l'aide du rugosimètre confocal et du perthomètre laser.

3.1.1 Effet du filtrage du profil brut sur les paramètres de rugosité

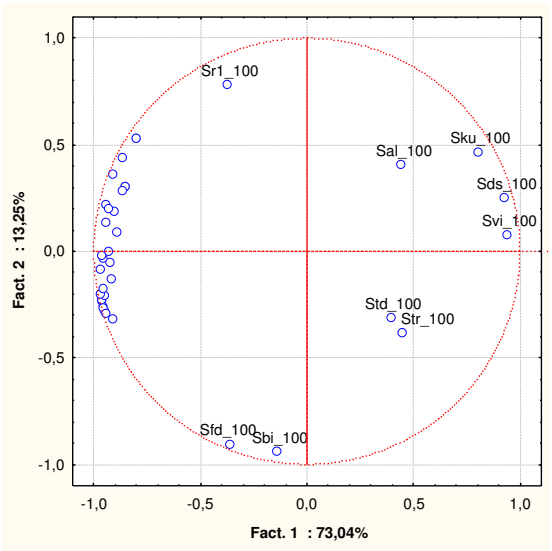
Comme exposé au chapitre 2, nous avons émis l'hypothèse que lors de l'appréciation au toucher d'une surface, le doigt agit comme s'il filtrait le signal de rugosité de surface et c'est ce signal filtré qui est ensuite interprété par le cerveau. Tout stimulus au-dessous du seuil de sensibilité du doigt ne serait pas perçu. Nous avons ainsi décidé de filtrer le profil brut de rugosité en choisissant un filtre en fonction de la sensibilité du doigt, c'est-à-dire avec un « cut-off » de 300 μm. Dans ce paragraphe, nous voulons vérifier si cette valeur du « cut-off » a un sens et si les valeurs des paramètres calculés avec ce « cut-off » diffèrent des paramètres calculés dans le cas où on prenait en compte un « cut-off » de 100 μm ou de 200 μm. Si les valeurs sont différentes, elles seront une à une comparée avec les résultats de l'analyse sensorielle pour voir lesquelles conviennent le mieux pour prédire les résultats sensoriels.

Les données sont présentées sous forme d'un tableau croisant un ensemble de 24 ou 8 lignes représentant les individus (24 lignes pour les éprouvettes de MDF poncés ou de Bois poncés, 8 lignes pour les éprouvettes de divers matériaux à base de bois) et un ensemble

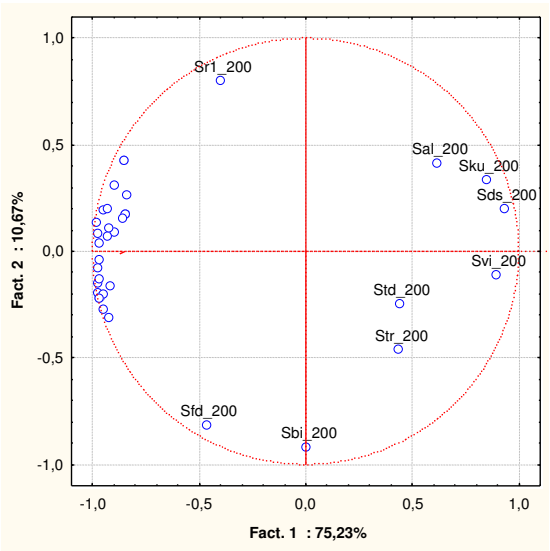
de 38 colonnes représentant les variables (paramètres de rugosité). Comme nous sommes en présence d'un nombre important de variables, il n'a pas été possible de les comparer une à une. Une analyse en composantes principales (ACP) a donc été employée.

Une ACP est une méthode statistique multivariée qui permet d'obtenir une représentation synthétique d'un ensemble de données, donc de représenter les points d'un espace possédant de très nombreuses dimensions dans un espace de dimensions plus réduites. Elle permet d'une part d'explorer les relations entre les paramètres sur le cercle de corrélation et d'autre part de visualiser les différences et similitudes entre les échantillons dans l'espace des individus [99].

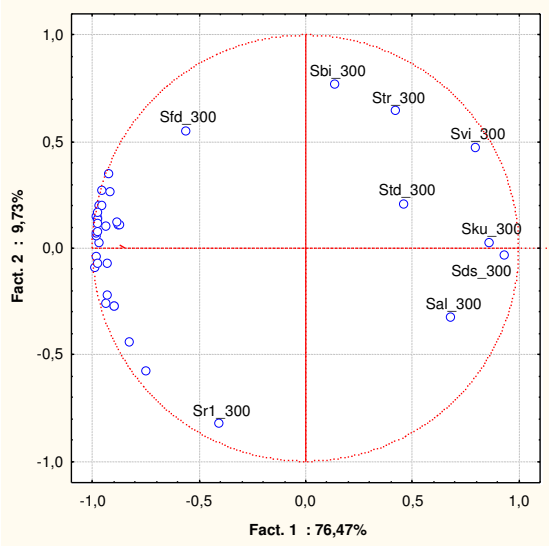
La comparaison de la répartition des paramètres dans le plan factoriel 1x2 de l'ACP est présentée dans les figures 3.1 et 3.2. On s'aperçoit que pour les deux séries de matériaux, les paramètres calculés avec un filtrage à 100 μm, à 200 μm et à 300 μm sont répartis de la même manière dans le cercle de corrélation, ce qui veut dire qu'ils traduisent le même phénomène. Seuls seront donc pris en compte les paramètres calculés avec un filtrage à 300 μm dans la suite des analyses.



(a)

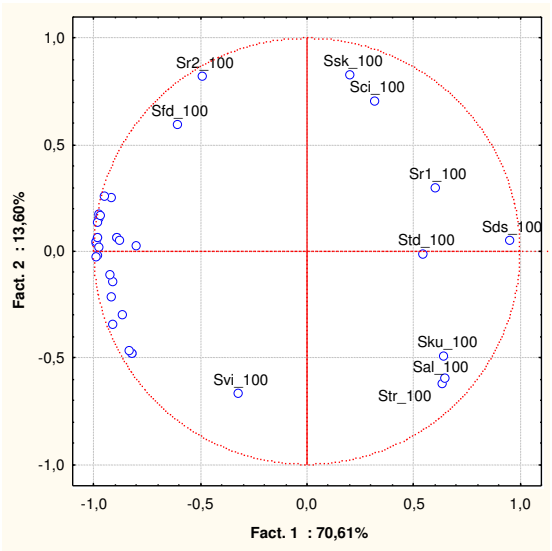


(b)

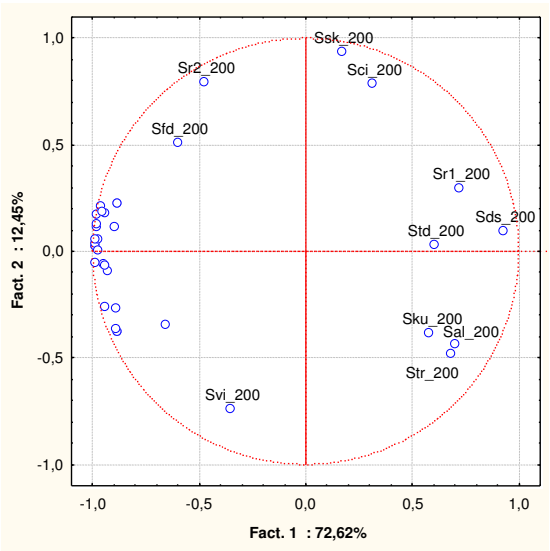


(c)

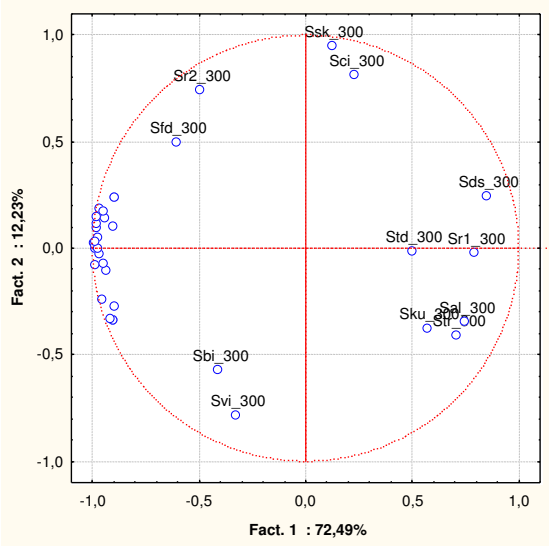
FIG. 3.1 – Projection sur le plan factoriel principal des paramètres de rugosité calculés sur les plaques de MDF, a) avec un filtrage à 100 μm, b) avec un filtrage à 200 μm, c) avec un filtrage à 300 μm



(a)



(b)



(c)

FIG. 3.2 – Projection sur le plan factoriel principal des paramètres de rugosité calculés sur les plaques de bois, a) avec un filtrage à 100 μm, b) avec un filtrage à 200 μm, c) avec un filtrage à 300 μm

3.1.2 Corrélation entre les paramètres

Les figures 3.1 et 3.2 mettent en évidence un nuage de points confondus sur le côté gauche de l'axe 1, ce qui traduit que la majorité des paramètres de rugosité sont fortement corrélés entre eux. Nous avons donc examiné la corrélation linéaire entre les paramètres calculés avec le filtrage à 300 μm. Ceux qui sont corrélés entre eux ne seront pas considérés dans la suite des analyses car ils apportent des informations redondantes. La matrice de corrélations de toutes les variables a été produite et les relations significatives ont été examinées (annexe D). Selon le test de Fisher, pour un nombre total d'acquisition de 96 (24 éprouvettes x 4 acquisitions par éprouvette), le coefficient de corrélation linéaire r de Pearson est significatif au seuil de 1% à partir de 0,75 [28]. On se rend ainsi compte que plusieurs paramètres sont linéairement liés entre eux pour les trois séries de matériaux étudiés. Le paramètre de rugosité S_a par exemple, qui est le plus souvent utilisé pour caractériser la rugosité de surface [88, 114] est corrélé significativement avec 22 autres paramètres de rugosité dans le cas des bois massifs poncés, avec 23 paramètres dans le cas des MDF poncés, et avec 21 paramètres dans le cas des divers matériaux dérivés du bois. Le tableau 3.1 donne la liste des paramètres de rugosité non corrélés entre eux, qui seront considérés pour la suite des analyses.

MDF	S_a	S_v	S_{sk}	S_{tr}	S_{td}	S_{r1}	S_{r2}	S_{bi}	S_{vi}	S_{al}			
Bois massif	S_a	S_v	S_{sk}	S_{tr}	S_{td}	S_{r1}	S_{r2}	S_{bi}	S_{vi}		S_{ku}	S_{fd}	
Divers bois	S_a	S_v	S_{sk}	S_{tr}	S_{td}	S_{r1}	S_{r2}	S_{bi}	S_{vi}	S_{al}			S_{ds}

TAB. 3.1 – Liste des paramètres non corrélés entre eux pour chaque groupe de matériaux

On peut noter qu'on retrouve quasiment les mêmes paramètres quel que soit le groupe de matériaux étudié. On observe que chaque classe de paramètres de la figure 2.11 (paragraphe 2.2.2.1) est bien représentée : on a des paramètres d'amplitude (S_a, S_v, S_{sk}, S_{ku}), des paramètres spatiaux (S_{ds}, S_{tr}, S_{al}, S_{td}), des paramètres fonctionnels (S_{r1}, S_{r2}, S_{bi}, S_{ci}) et un paramètre de volume (S_{fd}), ce qui fait un nombre total de 13 paramètres à étudier.

3.1.3 Effet de l'ordre et de la taille de ponçage sur les paramètres de rugosité

On sait que les toiles abrasives s'usent avec le temps de passage. Afin de vérifier si l'ordre de passage (avec 4 échantillons de MDF et 4 échantillons de bois poncés par bande), la taille des grains de ponçage (6 tailles allant de P60 à P320) et leur interaction ont un effet significatif sur les paramètres de rugosité, une analyse de variance à deux niveaux a été réalisée sur tous les échantillons de MDF et de bois massifs poncés. Les tableaux E.1 et E.2 présentés en annexe E résument les effets principaux des deux facteurs : taille des grains et ordre de ponçage sur les 13 paramètres de rugosité. La table de signification est présentée dans le tableau 3.2 dans lequel un astérisque représente un effet significatif au seuil de 0,05, deux astérisques au seuil de 0,01 et trois astérisques au seuil de 0,001.

Que ce soit pour les MDF poncés ou pour les bois poncés, les analyses montrent un effet significatif au seuil de 0,1% de la taille des grains de ponçage sur tous les paramètres

	MDF			Bois		
	Effet Grains[1]	Effet Ordre[2]	Interaction Grains*Ordre	Effet Grains[1]	Effet Ordre[2]	Interaction Grains*Ordre
d.d.l.	*3*	*5*	*15*	*3*	*5*	*15*
S_a	293,46***	26,88***	8,06***	127,97***	2,23NS	2,18NS
S_v	23,96***	1,40NS	3,43***	16,27***	0,59NS	0,49NS
S_{sk}	61,95***	2,56NS	1,83*	8,09***	0,45NS	1,27NS
S_{tr}	252,43***	2,09NS	2,43**	55,06***	2,52NS	1,21NS
S_{td}	12,50***	5,98**	3,42***	20,58***	19,14***	5,39***
S_{r1}	52,87***	54,81***	3,84***	4,80***	0,53NS	0,38NS
S_{r2}	332***	4**	1NS	29,99***	1,45NS	1,13NS
S_{bi}	6,35***	51,97***	2,90**	5,55***	1,55NS	1,55NS
S_{vi}	55,63***	2,20NS	2,01*	5,03***	0,93NS	1,48NS
S_{ku}	45,70***	7,57***	0,95NS	2,60*	0,28NS	0,56NS
S_{fd}	48***	37***	4***	91,73***	0,90NS	2,34**
S_{al}	47,89***	2,39NS	2,65**	106,03***	2,70NS	1,63NS
S_{ds}	235,4***	44,7***	8,5***	15,15***	1,20NS	1,23NS

TAB. 3.2 – Analyse de variance : F (valeur du test de Fisher) et niveau de signification ; NS aucune différence significative ; * différence significative au seuil de P≺0,05 ; ** différence significative au seuil de P≺0,01 ; *** différence significative au seuil de P≺0,001
[1] Effet de la taille des grains de ponçage ; [2] Effet de l'ordre de ponçage

de rugosité, excepté pour S_{ku} (significatif au seuil de 5%). Taylor [108] a fait une étude similaire sur des bois de pins, de mérisiers, d'érables et de chênes. Les valeurs des paramètres de rugosité qu'il a trouvé ne pourront pas être comparées à celles trouvées ici car les paramètres ont été calculés avec une démarche expérimentale différente, c'est-à-dire une taille de la surface d'acquisition, un pas d'acquisition et un filtrage différents. Par contre, on peut dire qu'ils ont abouti à la même conclusion sur l'effet significatif de la taille des grains de ponçage (P100-P150-P220) sur le paramètre de rugosité S_a.

L'effet de l'ordre de ponçage est peu ou pas significatif. Pour les plaques de bois poncées, l'effet significatif est observé uniquement sur le paramètre S_{td}, il n'a aucun effet sur tous les autres paramètres. Pour les MDF poncés, une différence significative a été observée sur le paramètre S_a et sur tous les paramètres spatiaux S_{td}, S_{fd}, S_{al}, S_{ds}. Puisque l'analyse sensorielle prend beaucoup de temps, nous n'avions étudié qu'une seule plaque de MDF et de bois par papier abrasif malgré que l'effet de l'ordre de ponçage sur les paramètres de rugosité soit significatif sur les plaques de MDF. Cela réduit le nombre d'éprouvettes à analyser d'un nombre initial de 56 à un nombre final de 20 éprouvettes (6 éprouvettes de MDF poncés, 6 éprouvettes de bois poncés et 8 éprouvettes de divers matériaux dérivés de bois).

3.1.4 Exemple typique de représentation surfacique de la topographie de surface des plaques étudiées

Les résultats qui suivent concernent uniquement les 20 éprouvettes avec lesquels les analyses sensorielles ont été réalisées. Afin de se faire une idée sur leurs états de surface, les figures 3.3, 3.4, 3.5 présentent les images de ces 20 plaques avec un exemple typique des cartes d'altitudes topographiques respectives acquises avec le rugosimètre confocal. Comme précisé dans le paragraphe 2.2.1.2.2 concernant les démarches expérimentales, quatre zones notées A, B, C, D ont été analysées. Pour tous les matériaux étudiés, la zone A se situe toujours à 4 cm en tous sens du coin inférieur gauche, la zone B est distante de 2 cm en haut de la zone A, la zone C est distante de 2 cm à droite de la zone A et la zone D est à 2 cm en haut de la zone B.

Pour interpréter les cartes d'altitude, on considère que le plan moyen se trouve à la limite jaune-vert, les altitudes plus élevées sont dans le rouge tandis que les creux sont dans le vert.

Que ce soit pour les MDF poncés ou pour les bois de pin poncés, les images des altitudes présentent deux types de textures caractéristiques. Dans certains cas (MDF60, MDF80, MDF100, BM60, BM80, BM100, BM120, BM220), les images révèlent des textures alignées orientées dans le sens des abscisses (correspondant au sens du ponçage). Ce sont donc les rayures dues au passage des grains abrasifs. Dans les autres cas (MDF120, MDF220, MDF320, BM320), on a des textures aléatoires. On peut dire que les plaques de MDF poncées ne marquent pas de profil systématique quand la rugosité varie tandis que pour les plaques de bois de pin poncées, on observe progressivement l'apparition de rayures générées par le ponçage avec l'augmentation de la grosseur des grains. On peut ainsi s'attendre à ce que la perception de ces deux types de matériaux soit différente malgré qu'ils aient été poncés avec les mêmes papiers abrasifs.

Pour les divers matériaux dérivés du bois, on a des états de surface très variés, notamment en termes d'amplitude et d'homogénéité de la texture en fonction de l'arrangement des fibres constituant le matériau :

- pour RET et BM : les caractéristiques les plus marquantes de leur topographique de surface consistent en des ondulations (en rouge sur les cartes d'altitude) dans le sens des abscisses. Elles sont probablement créées par les traces de rabotage,
- pour CP : on trouve les textures parallèles le long de l'abscisse de l'image de la carte d'altitude, elles sont probablement créées par les fibres allongées dans la direction longitudinale de la plaque,
- pour MDF, PP et OSB : on retrouve un état de surface constitué par des éraflures orientées aléatoirement correspondant à l'enchevêtrement de fibres de petite taille pour les MDF et des copeaux de plus grande taille pour PP et OSB,
- pour PSL : on remarque une texture parallèle correspondant aux fibres constituant les copeaux de bois et on observe une vallée profonde qui représente l'espacement entre les copeaux,
- pour PD : l'état de surface est régulière et de faible amplitude comparé aux autres matériaux car c'est l'état de surface du papier qui revêt le matériau.

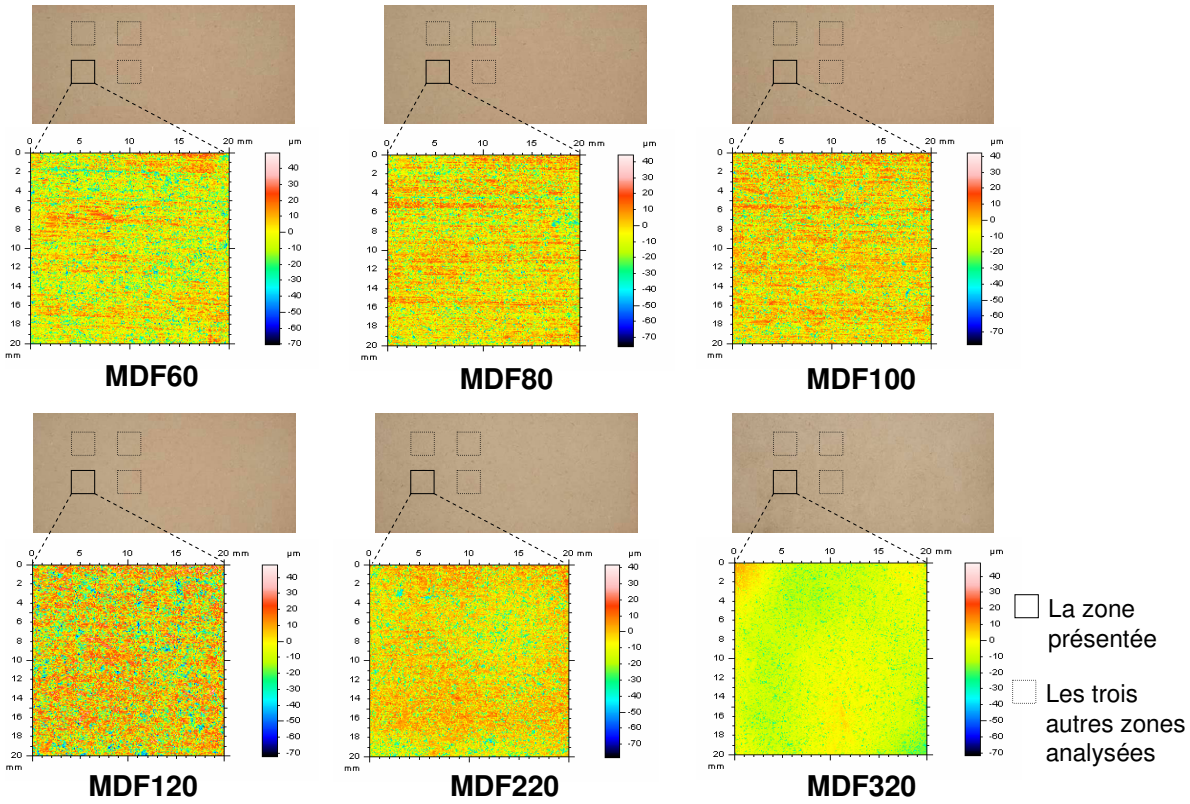


FIG. 3.3 – Exemple typique de représentation surfacique de la topographie de surface des plaques de MDF étudiées

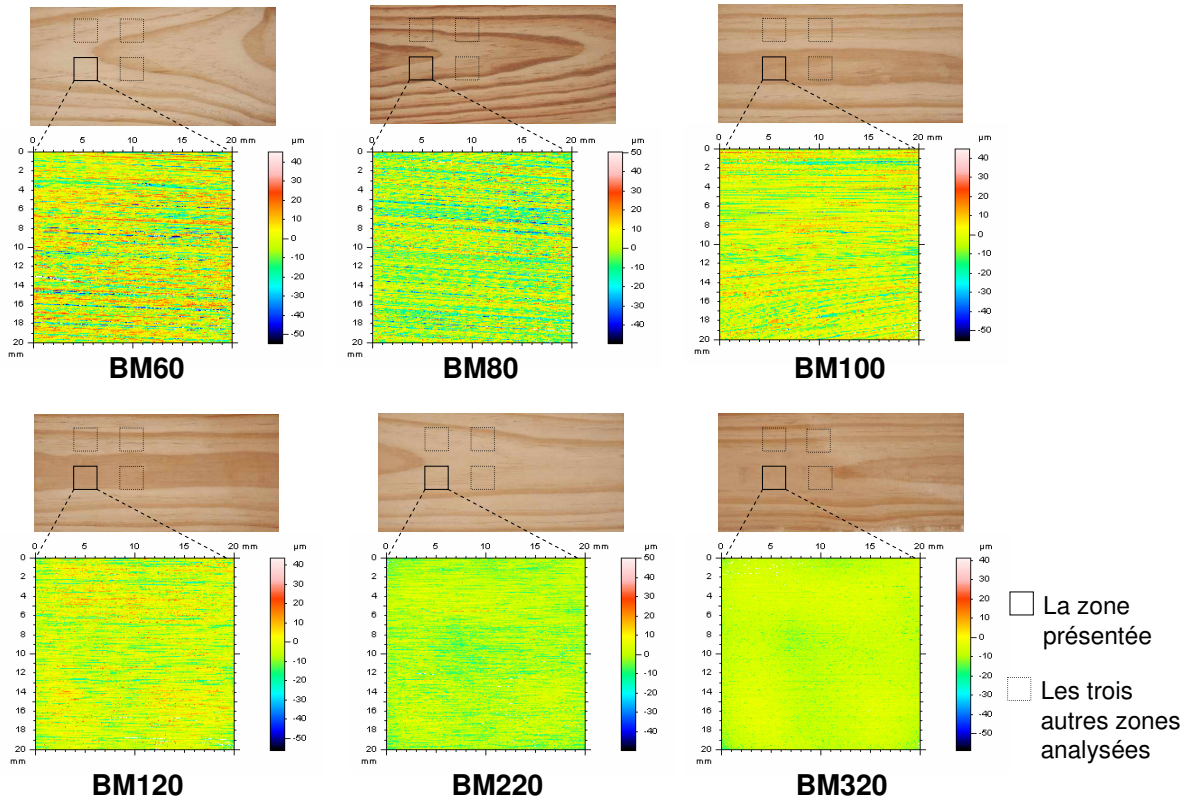


FIG. 3.4 – Exemple typique de représentation surfacique de la topographie de surface des plaques de bois massif étudiées

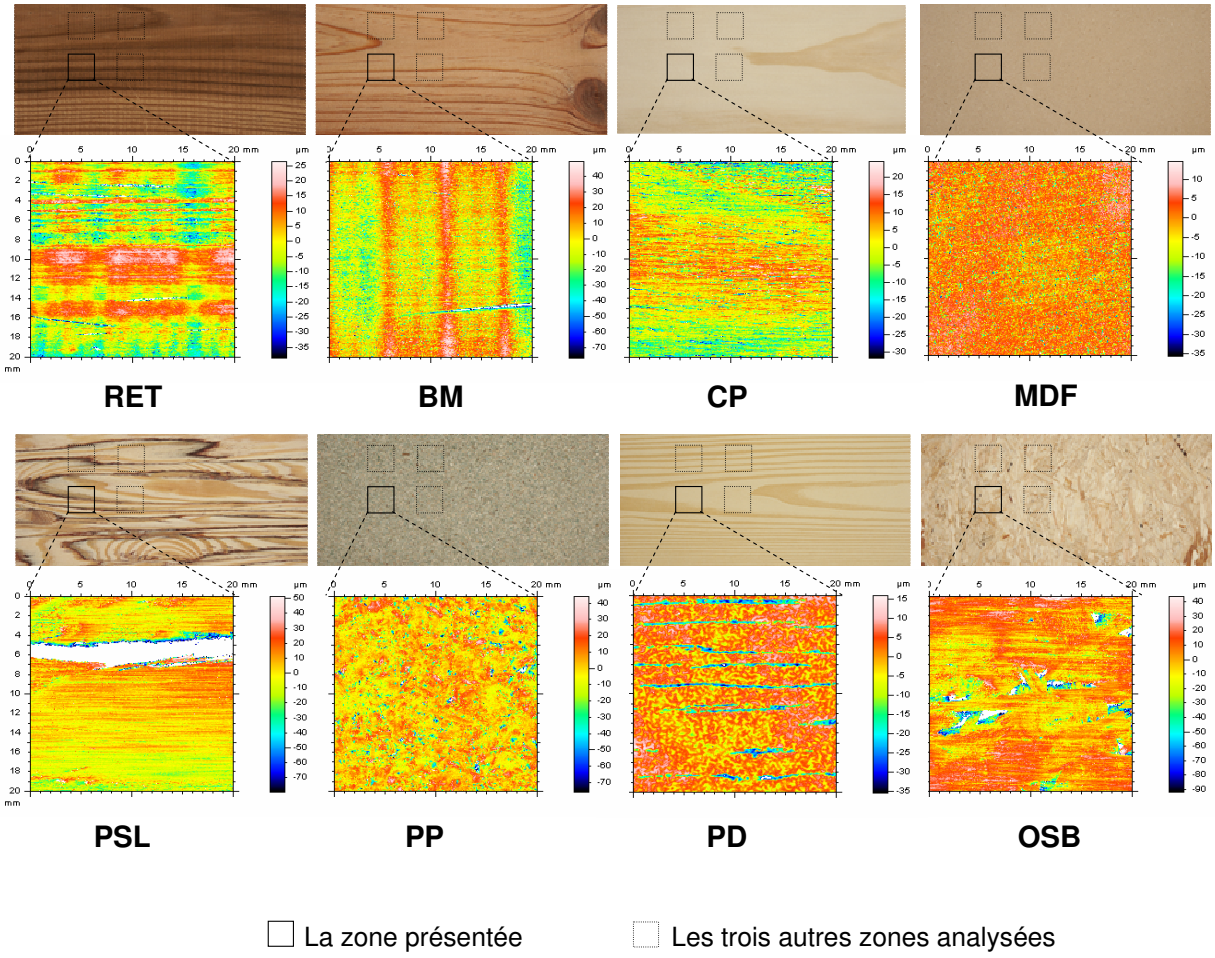


FIG. 3.5 – Exemple typique de représentation surfacique de la topographie de surface des plaques des matériaux dérivés du bois étudiées (pour PSL et OSB : les zones en blanc sont hors de la dynamique verticale du crayon optique utilisé)

3.1.5 Etude de la différence et de la similitude entre les échantillons en termes de paramètres de rugosité

La représentation graphique des moyennes et intervalles de confiance à 95% des paramètres de rugosité calculés sur l'ensemble des plaques étudiées dans ce travail se trouve en annexe F.

Afin d'étudier la différence et la similitude entre les échantillons en termes de paramètres de rugosité, nous avons réalisé une analyse en composantes principales sur l'ensemble des variables (13 paramètres de rugosité) et sur l'ensemble des individus (les éprouvettes étudiées). Les résultats sont présentés sous forme de trois graphiques :

- le graphique des valeurs propres : permet d'apprécier la perte d'informations subie et de savoir combien de facteurs retenir dans un sous-espace de dimension faible,
- la projection des variables : permet de visualiser les relations entre les variables et d'expliquer la signification des composantes principales,
- la projection des individus : permet de visualiser l'existence éventuelle de groupes d'individus et d'expliquer les différences et les similitudes entre les groupes d'individus.

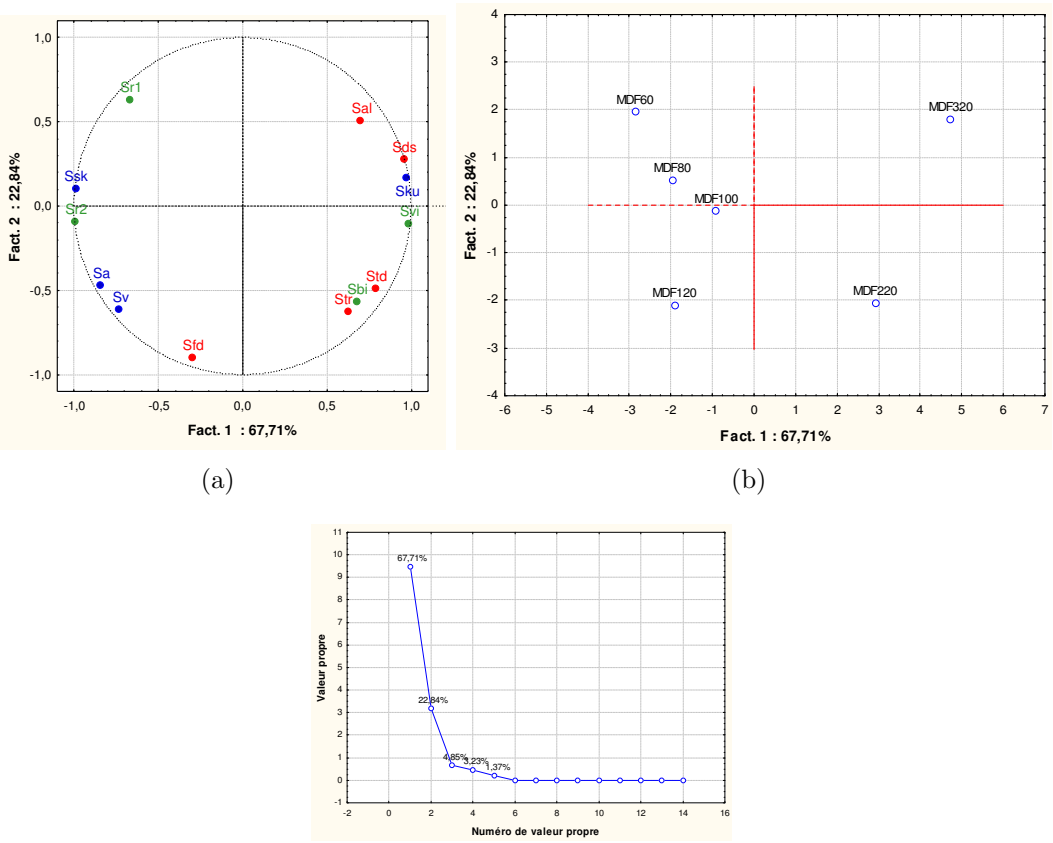
3.1.5.1 MDF poncés

Le graphique des valeurs propres (figure 3.6c) montre que deux composantes principales suffisent pour représenter plus de 91,59 % de l'inertie, ainsi aucune autre dimension n'est interprétée. On obtient alors les représentations des variables (figure 3.6a) et des individus (figure 3.6b) dans l'espace défini par ces deux composantes.

La composante principale 1 (notée CP1) oppose les échantillons poncés avec des grains grossiers (P60 à P120) aux échantillons poncés avec des grains fins (P220 et P320) selon les paramètres S_{vi}, S_{ku}, S_{sk} et S_{r2}. Selon la représentation des individus, les surfaces poncées avec des grains fins présentent plus de creux que de pics (valeur plus faible de S_{sk} et de S_{r2}). La distribution des altitudes devient resserrée autour de la moyenne (valeur élevée de S_{ku}) et la surface a une meilleure propriété de rétention de fluide (valeur élevée de S_{vi}).

La composante principale 2 (CP2) est plus corrélée au paramètre fonctionnel S_{r1}. Les échantillons s'échelonnent le long de cet axe dans l'ordre MDF220-MDF120-MDF100-MDF80-MDF320-MDF60. S_{r1} est la fraction de la surface qui consiste en des pics au dessus du plateau principal.

La figure 3.6b montre que la plaque poncée avec P120 pose toujours problème. La valeur du paramètre S_a de cet échantillon est plus élevée que celle des plaques poncées avec les autres bandes de ponçage. Il a déjà présenté une perte de poids anormalement élevée au ponçage (cf. figure 2.6). Cela confirme une fois de plus qu'il y a eu un problème lors de la mise en place des expérimentations. Nous n'avons pas retiré les données correspondantes dans les analyses car dans le sens où l'on se fixe comme objectif d'étudier les corrélations entre les mesures physiques et sensorielles. Cet échantillon nous permettra de valider les résultats, tout en étant conscient que cet éprouvette ne représente pas le papier abrasif P120.



(a) (b)

(c)

FIG. 3.6 – Projection sur le plan factoriel principal a) des variables, b) des individus (surfaces des MDF poncés), c) valeurs propres

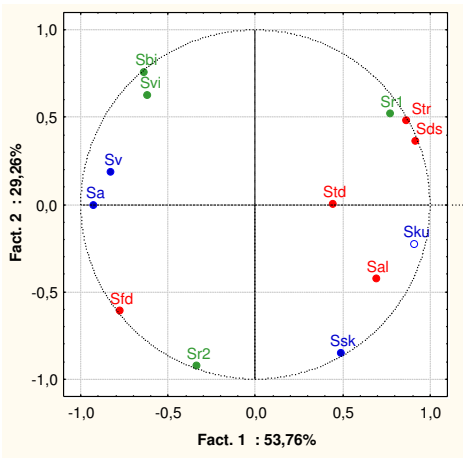
3.1.5.2 Bois de pin poncés

La figure 3.7c montre que la première composante principale contient 53,76 % de la variance totale et la seconde composante principale 29,26 %. Puisque la représentation sur ces deux composantes concerne 83,02 % de l'information totale, il suffit donc d'étudier les deux.

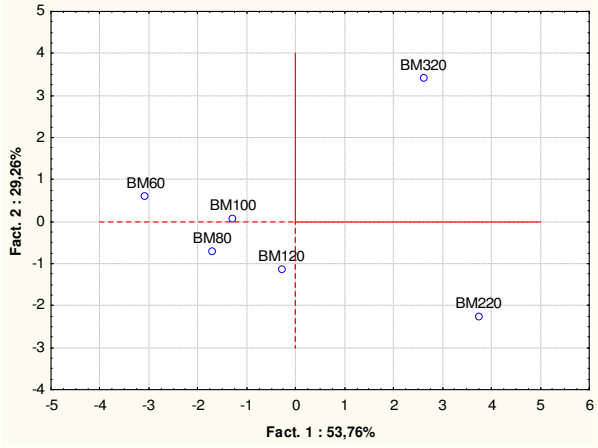
Sur le cercle de corrélation (figure 3.7a), S_{ku} est corrélé à CP1 et S_a, S_v sont anticorrélés à cet axe (comme précédemment avec le MDF). Ce sont donc les paramètres d'amplitude qui expliquent cet axe. La projection des individus dans le plan défini par ces deux axes (figure 3.7b) indique que l'axe 1 oppose les bois poncés avec des grains grossiers à ceux poncés avec des grains fins. Cette constatation est conforme à notre attente car les grains grossiers ont créé des rayures plus profondes à la surface, ce qui a pour effet d'augmenter la valeur de S_a (moyenne arithmétique des écarts à la moyenne) et la profondeur des vallées S_v. L'altitude devient élargie autour de la moyenne (faible valeur de S_{ku}). Dans le cas des bois, la position de la plaque poncée avec P120 est correcte : entre P100 et P220.

Seul le paramètre fonctionnel S_{r2} est anticorrélé à CP2. S_{r2} est la surface portante inférieure, c'est-à-dire le pourcentage de la matière à la fin de la zone des 40% de la

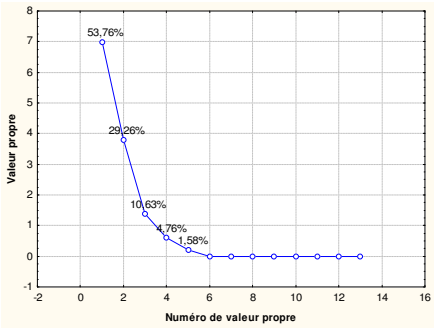
courbe d'Abbott-Firestone. Ce paramètre caractérise ainsi les vallées. Les individus sont rangés sur l'axe 2 par valeur croissant de S_{r2} suivant l'ordre : BM320-BM60-BM100-BM80-BM120-BM220.



(a)



(b)



(c)

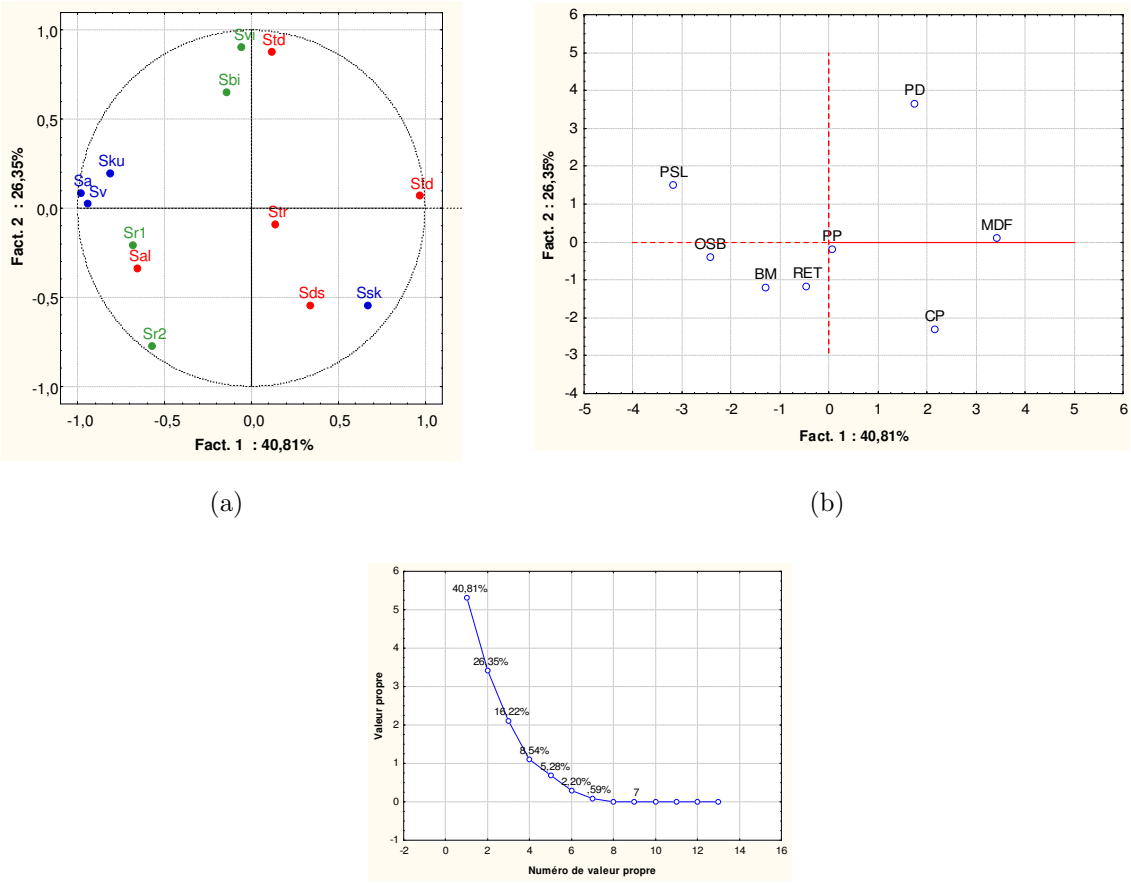
FIG. 3.7 – Projection sur le plan factoriel principal a) des variables, b) des individus (surfaces de bois poncés), c) valeurs propres

3.1.5.3 Divers matériaux dérivés du bois

La figure 3.8c montre que les deux premiers axes portent une inertie totale élevée de 67,16 %, seuls ces deux axes seront étudiés .

En observant les figures 3.8a et 3.8b représentant la projection des variables et des individus dans le plan factoriel 1x2, on s'aperçoit que S_a, S_v, S_{td} décrivent principalement la variation entre les échantillons sur le premier axe, ce qui indique que ce premier axe met en évidence l'opposition qui existe entre PSL, OSB, BM et RET (caractérisés par une valeur élevée de S_a et S_v) et MDF, PD, PP et CP (caractérisés par une valeur faible de S_a et S_v). Ce résultat est prévisible étant donné que les surfaces de OSB et PSL sont constituées de copeaux de grande taille (50 mm x 10 mm et 240 mm x 20 mm), et le collage entre ces copeaux crée des espaces entre ces derniers, d'où l'élévation des valeurs de S_a et

de S_v. BM et RET montrent des traces de rabotage et présentent donc plus d'irrégularités que la surface de MDF constituée de fibres de bois de petite taille (de l'ordre de 2 mm x 30-40 μm) ou une surface de PD qui est un papier décor. On s'attendrait ainsi à ce que les surfaces de PSL, OSB, BM et RET soient perçues comme rugueuses lors des tests sensoriels. Le second axe est décrit par deux paramètres : S_{vi} et S_{td}. On sait que S_{td} n'a de sens que si $S_{tr} \prec 0{,}5$. Ceci n'est pas vérifié pour MDF et PP, ces derniers présentent alors une texture aléatoire. La condition est vérifiée pour les six échantillons restants, ces derniers présentent donc une texture privilégiée. PD, PSL et CP qui sont éloignés de l'origine ont une direction privilégiée proche de 90°. Les échantillons s'échelonnent le long de l'axe 2 dans l'ordre croissant : CP, BM, RET, PP, MDF, PSL, PD. On peut ainsi dire que OSB, PD et PSL retiennent mieux les fluides.



(a) (b)

(c)

FIG. 3.8 – Projection sur le plan factoriel principal a) des variables, b) des individus (surfaces des divers matériaux dérivés du bois), c) valeurs propres

3.1.6 Récapitulatif et discussions

Le filtrage avec un « cut-off » de 300 μm a été adopté car on a remarqué que la valeur du « cut-off » a un effet négligeable sur la répartition des paramètres de rugosité dans le

cercle de corrélation lors de l'analyse en composantes principales. Sur les 38 paramètres de rugosité calculés par éprouvette, seuls 13 paramètres indépendants entre eux ont été retenus pour la suite de l'étude.

Par ailleurs, il a été montré que la taille des grains de ponçage a un effet significatif sur les valeurs des paramètres de rugosité contrairement à l'ordre de ponçage. Ce résultat est rassurant car il justifie le choix fait au paragraphe 2.4.2 de réaliser les tests sensoriels uniquement sur une seule éprouvette par grain de ponçage.

Pour les trois groupes de matériaux étudiés, les analyses en composantes principales montrent que deux axes suffisent pour interpréter la variation entre les échantillons :

- L'axe 1 est essentiellement corrélé avec les paramètres d'amplitude séparant les surfaces poncées avec des grains grossiers à celles poncées avec des grains fins (dans le cas des MDF poncés et des bois poncés) et les surfaces constituées de particules de grandes tailles à celles constituées de particules de plus petite taille (dans le cas des divers matériaux dérivés du bois).
- L'axe 2 est expliqué soit par des paramètres fonctionnels soit par des paramètres spatiaux.

3.2 Caractérisation instrumentale de l'aspect visuel

Nous nous sommes servis des images des surfaces des éprouvettes étudiées pour apprécier la couleur perçue des plaques. Toutes images sont présentées dans les figures G.1, G.2, G.3 situées en annexe G. On observe que l'aspect visuel des plaques de MDF poncées est uniforme et constant d'une plaque à l'autre. Pour les plaques de bois massifs poncées (figure 3.4), les couleurs sont bien évidemment hétérogènes, mais la différence de couleur n'est pas très importante grâce à l'échantillonnage guidé des éprouvettes. Seule l'éprouvette poncée avec P80 semble plus foncée que les autres.

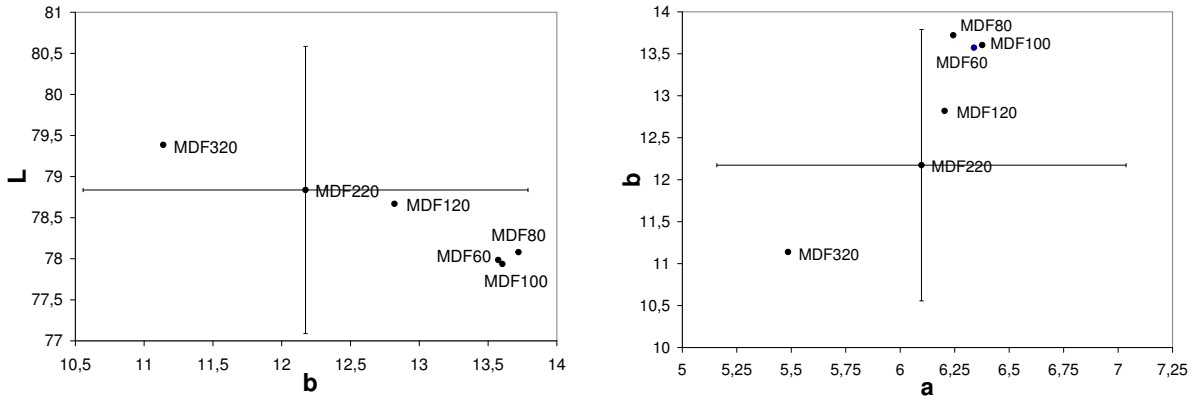
Du fait que les images acquises ne sont pas exemptes de bruit et que le calibrage est peu fiable pour les valeurs très faibles du signal d'entrée (limite de détection du système d'acquisition), certaines images converties en fichiers de triplets (L, a, b) font apparaître des triplets aberrants (L négatif, a et b incohérents). C'est le cas des images des plaques BM60, MDF320, BM, OSB, PP, PSL et RET, avec une proportion de triplets aberrants de 2 à 12997 sur 3128544. Pour y remédier, nous avons interpolé la valeur des coordonnées (L, a, b) des pixels à L négatif avec la moyenne des coordonnées (L, a, b) des huit plus proches voisins.

Cette partie a pour but de caractériser avec des mesures physiques la couleur perçue des plaques, c'est-à-dire le stimulus de couleur (produisant une sensation de couleur). Nous rappelons que les paramètres de l'aspect visuel que nous avons décidé de calculer sont les paramètres statistiques et de répartition spatiale des coordonnées trichromatiques des couleurs des images. Les résultats sont présentés ci-après.

3.2.1 Analyse statistique des valeurs de (L, a, b)

Les paramètres statistiques des coordonnées trichromatiques L, a, b des couleurs des pixels des images des bois et des matériaux dérivés du bois sont présentés dans l'annexe H. Les moyennes, écart-types, minima et maxima des coordonnées L, a et b y sont présentés. Les produits étudiés ont une couleur dominante marron. Le marron est une couleur non spectrale, on peut l'assimiler à du jaune-orangé désaturé. L'information est ainsi portée essentiellement par les composants L et b. Les projections 2D dans les plans (L, b) et (a, b) sont présentées dans les figures 3.9, 3.12 et 3.13. La distribution de L, a, b ne suit pas une loi normale, nous ne pouvons donc pas représenter l'intervalle de confiance sans faire une transformation adaptée. Cette analyse statistique n'ayant pas pour but de faire une comparaison des moyennes, nous avons décidé de représenter les écart-types pour chaque éprouvette dans un but d'illustration. Pour cela, l'intervalle représente -1 * écart-type et 1 * écart-type de part et d'autre de la moyenne. Un seul écart-type est présenté pour les groupes des bois et des MDF poncés car leurs valeurs sont proches (cf. annexe H). Si on représente les écart-types pour toutes les éprouvettes, la figure est surchargée.

3.2.1.1 MDF poncés

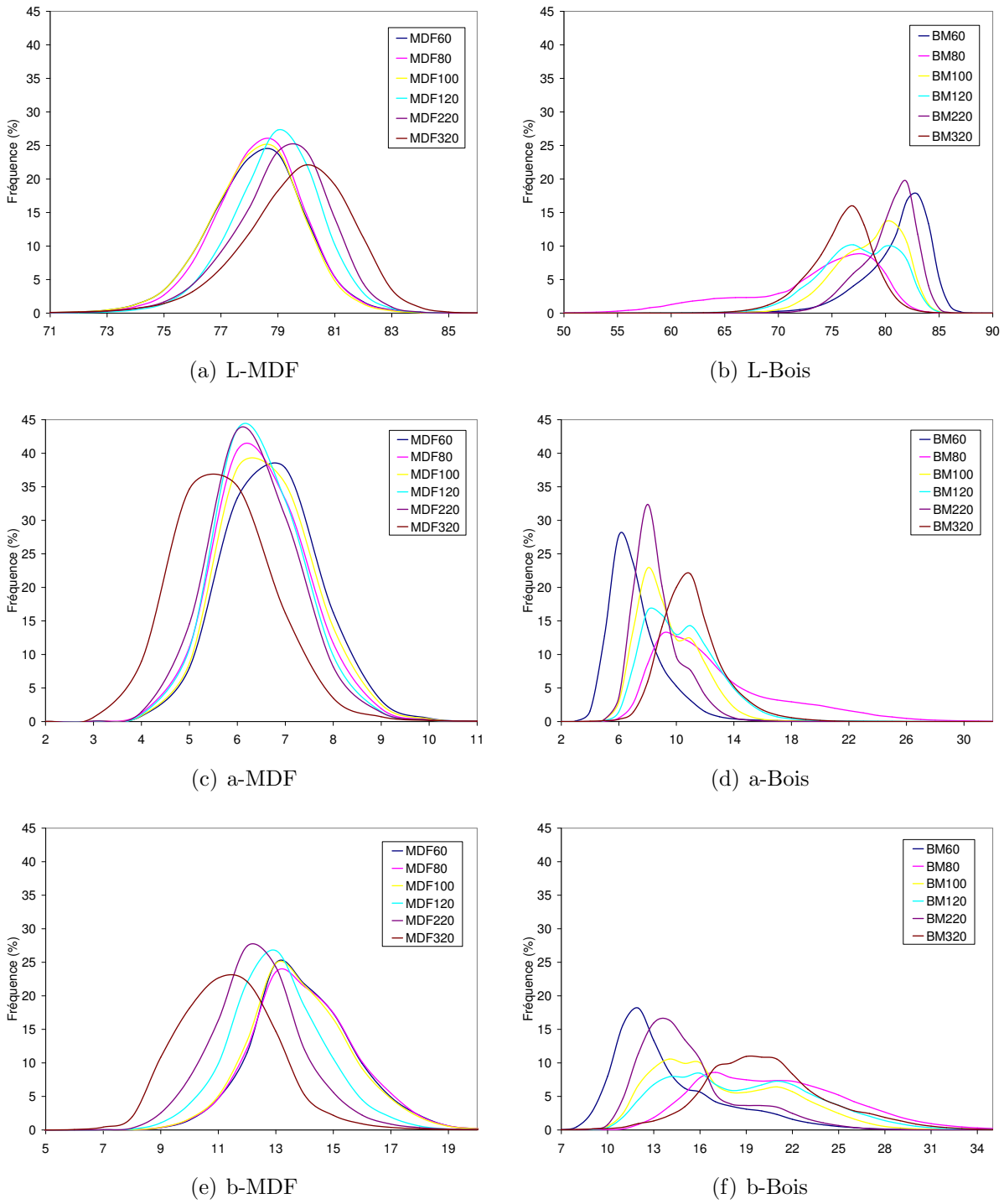


(a) (b)

FIG. 3.9 – Représentation des MDF poncés dans l'espace couleur : moyenne ± écart-type a) dans le plan (L, b) : clarté/bleu-jaune, b) dans le plan (a, b) : chromacité

L'observation des figures 3.9 et du tableau H.1 (annexe H) montre que les surfaces des MDF poncés présentent des valeurs moyennes de L, a, b proches avec des valeurs allant respectivement de 77,9 à 79,3, de 5,4 à 6,3, de 11,1 à 13,7. Si l'on se réfère à la variabilité intra-éprouvette, on peut constater que L, a, b varient faiblement dans l'éprouvette. Nous avons représenté la distribution des valeurs de L, a, b dans les images (figure 3.10) car celles-ci semblent discriminer les couleurs des plaques malgré des valeurs moyennes des coordonnées trichromatiques des couleurs proches. On peut noter un comportement systématique de la courbe de distribution de L : elle est dissymétrique à gauche pour MDF60, MDF80, MDF100, symétrique pour MDF120 et dissymétrique à droite pour MDF220 et MDF320. La symétrie est inversée pour a et b. Cela peut s'expliquer par le

fait que lors du ponçage avec des grains fins (MDF220 et MDF320), les copeaux de fibres et de colle (de couleur claire) libérés par le ponçage sont de petite taille et s'incrustent entre les fibres constituant la surface du MDF. Par la suite, le passage à plusieurs reprises des bandes de ponçage a tendance à lustrer la surface et maintient les copeaux là où ils sont. De ce fait, la couleur de la surface est dominée par la couleur claire des poussières. Par contre, pour un ponçage avec des grains grossiers, les copeaux ne peuvent pas se placer entre les fibres, d'où la dominance de la couleur foncée de certaines fibres. Pour illustrer ces hypothèses, les images des surfaces des six plaques de MDF poncées vues à la loupe binoculaire sont présentées dans la figure 3.11. On y distingue bien le mélange de fibres arrachées et de colle de couleur blanche qui se loge entre les fibres de la surface des plaques de MDF220 et MDF320. Ce qui contribue à une couleur plus claire pour ces deux éprouvettes.

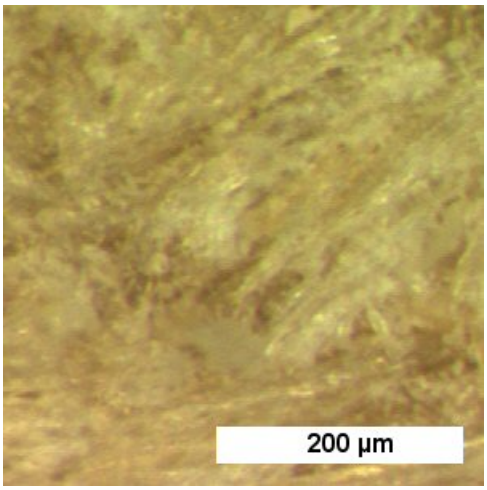


(a) L-MDF (b) L-Bois

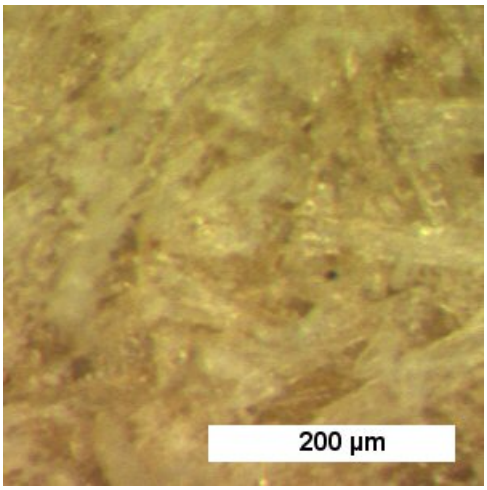
(c) a-MDF (d) a-Bois

(e) b-MDF (f) b-Bois

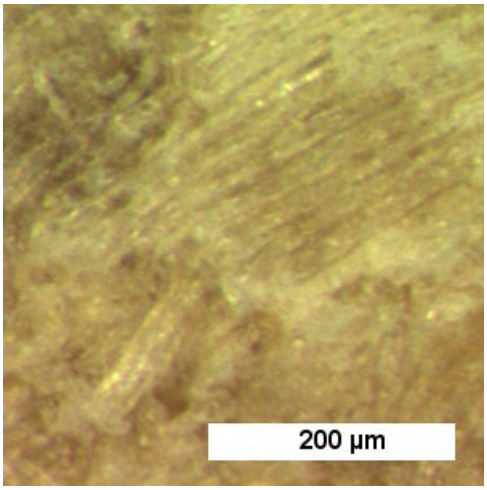
FIG. 3.10 – Distribution de la valeur de L, a, b des pixels composant les images des plaques de MDF poncées et de bois massifs poncées



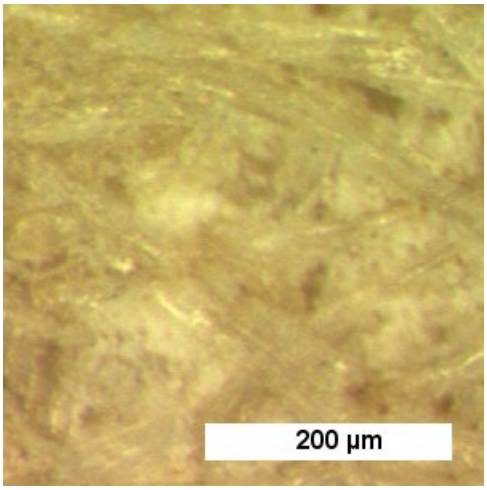
(a) MDF60



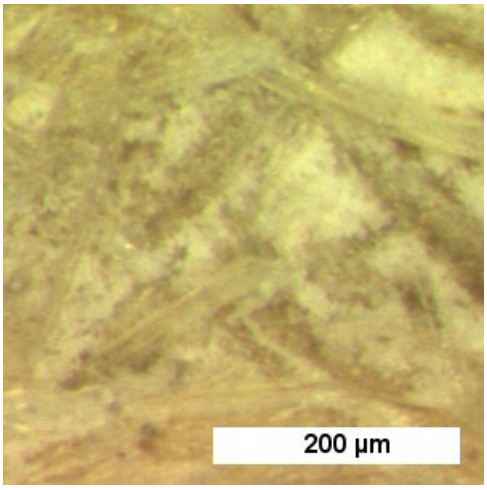
(b) MDF80



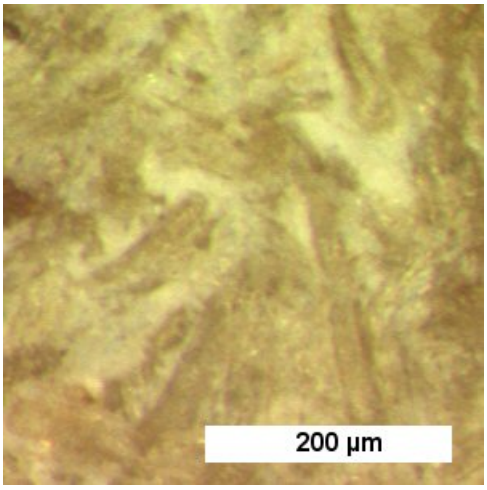
(c) MDF100



(d) MDF120



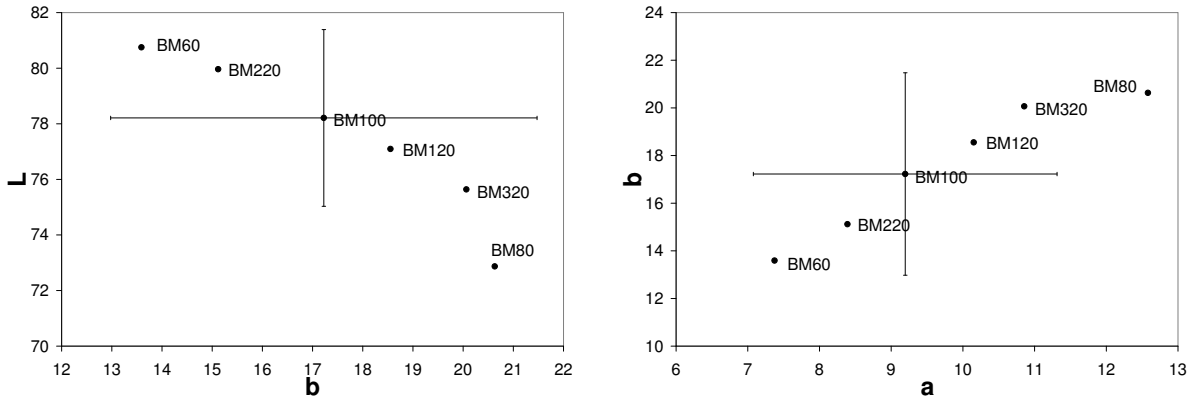
(e) MDF220



(f) MDF320

FIG. 3.11 – Images des surfaces des six plaques de MDF poncées prises à la loupe binoculaire

3.2.1.2 Bois poncés



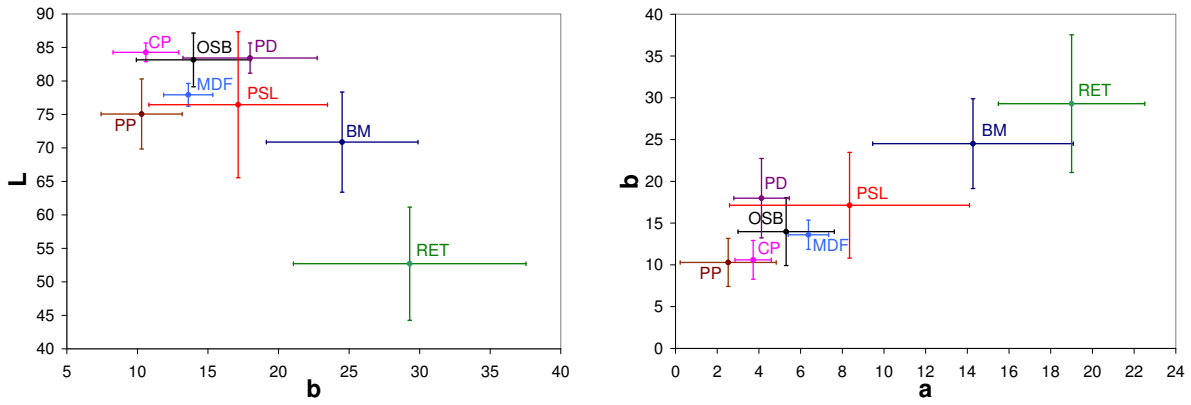
(a) (b)

FIG. 3.12 – Représentation des bois poncés dans l'espace couleur : moyenne ± 1 écart-type a) dans le plan (L, b) : clarté/bleu-vert, b) dans le plan (a, b) : teinte

L'analyse statistique des couleurs des pixels des images des bois poncés (figure 3.9 et tableau H.1 (annexe H)) montre qu'il y a une dépendance entre les composants L et b. Leur corrélation est représentée par une droite de pente négative. Les composants a et b sont correlés positivement. On trouve que les moyennes et écart-types de L, a, b sont proches pour toutes les surfaces étudiées. BM80 présente la valeur de L la plus faible. Les faibles valeurs des écarts-types traduisent une faible variabilité de la couleur à l'intérieur de chaque plaque, excepté pour BM80 qui a un écart-type plus élevé par rapport aux autres plaques.

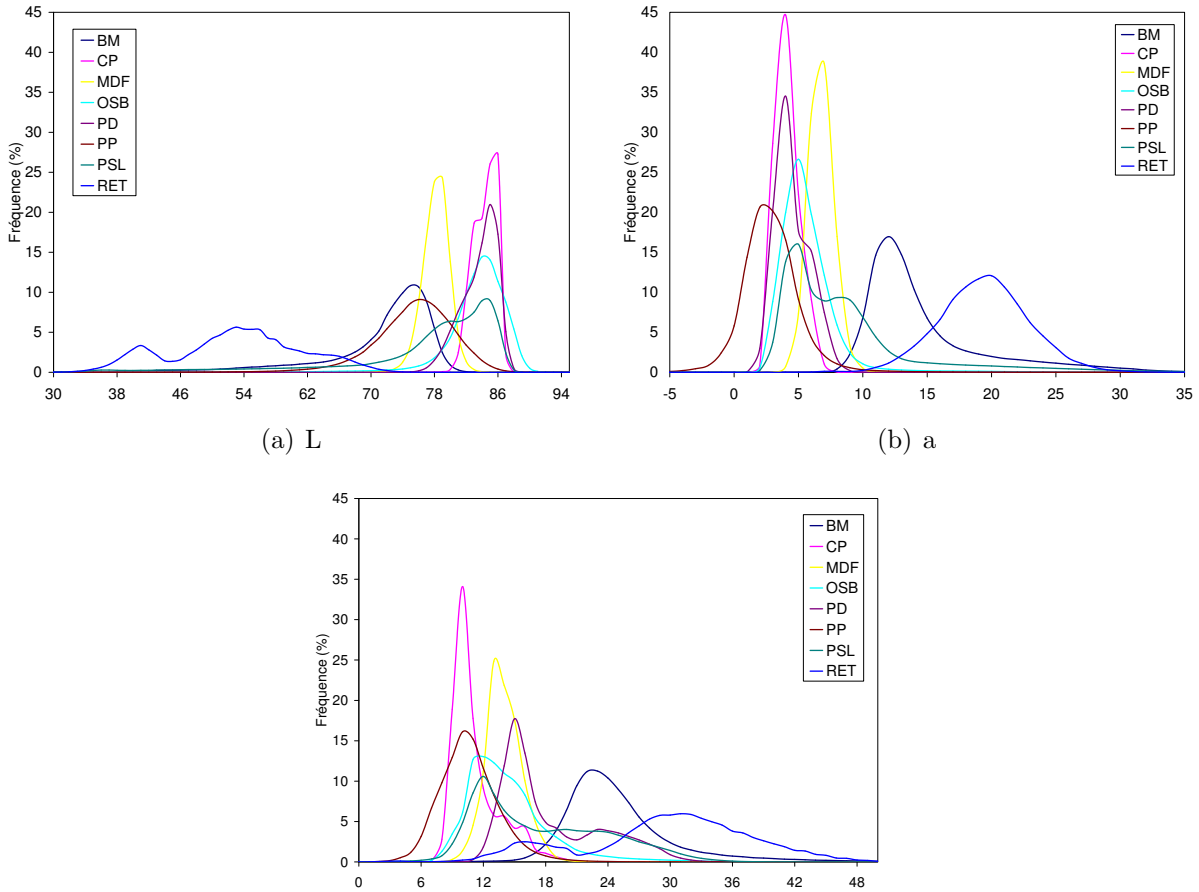
3.2.1.3 Divers matériaux dérivés du bois

On observe des valeurs très dispersées des moyennes de L, a, b avec des moyennes allant respectivement de 52,45 à 84,11, de 2,53 à 20,77, de 10,30 à 39,49. La projection dans le plan (a, b) (figure 3.13) montre que les plaques PP et PD sont sensiblement jaunes, RET et BM ont une tendance à aller dans l'orangé. Ces deux dernières plaques présentent des valeurs plus élevées des moyennes de a et b et des valeurs plus faibles des moyennes de L. On remarque qu'ici aussi, les coordonnées L-a et a-b sont dépendantes. L'histogramme (figure 3.14) montre que PP a plusieurs pixels avec un a négatif. En effet, certains constituants de cette plaque sont colorés en vert. Certes, seuls 5,67 % des pixels sont verts, pourtant à la vue, c'est la couleur gris verdâtre qui prédomine. Une raison peut être avancée, c'est que la moyenne de a se situe autour de 2,5, donc on voit bien le vert par effet de contraste.



(a) (b)

FIG. 3.13 – Représentation des matériaux dérivés du bois dans l'espace couleur : moyenne ± 1 écart-type
a) dans le plan $(L,\ b)$: clarté/bleu-vert, b) dans le plan $(a,\ b)$: teinte



(a) L (b) a

(c) b

FIG. 3.14 – Distribution de la valeur de L, a, b des pixels composant les images des plaques des divers matériaux dérivés du bois

3.2.2 Analyse spatiale des valeurs de (L, a, b)

3.2.2.1 Paramètres spatiaux

Le tableau 3.3 résume les paramètres de texture couleur des MDF poncés et des bois de pins poncés et des divers bois étudiés calculés sur les valeurs de la clarté colorimétrique L des pixels des images. Ces paramètres ont été calculés par analogie aux paramètres spatiaux de rugosité. Les définitions de chacun de ces paramètres sont présentées en détail dans le paragraphe 2.3.2.2 mais rappelons que :

- S_{tr} (-) représente l'anisotropie de la texture,
- S_{td} (°) représente l'orientation de la texture (si elle est directionnelle),
- S_{al} (mm) représente la taille moyenne des éléments structurels de la texture.

		S_{tr}(-)	S_{td}(°)	S_{al}(mm)
MDF	MDF60	*0,557*	-	0,25
	MDF80	*0,566*	-	0,217
	MDF100	*0,556*	-	0,25
	MDF120	*0,558*	-	0,25
	MDF220	*0,607*	-	0,28
	MDF320	*0,584*	-	0,27
Bois	BM60	0,202	0,5	2,67
	BM80	0,071	0,5	1,77
	BM100	0,034	0,5	3,02
	BM120	0,033	-	3,02
	BM220	0,078	0,5	2,5
	BM320	0,058	4,5	2,17
Divers matériaux	BM	0,084	-	1,77
	CP	0,119	0,5	5,84
	MDF	*0,712*	-	0,187
	OSB	*0,483*	-	1,71
	PD	0,036	0	0,646
	PP	*0,737*	-	0,37
	PSL	0,078	1,5	1,42
	RET	0,034	0,5	1,34

TAB. 3.3 – Paramètres de texture couleur calculés sur les valeurs de L
En italique : texture isotrope ($S_{tr} \succ 0,5$)

Les paramètres spatiaux de répartition des couleurs ne varient pas entre les six plaques de MDF poncées. La texture est isotrope et la taille de la texture est de l'ordre de 0,25 mm. Les paramètres ne permettent donc pas de distinguer des différences entre les plaques.

Si l'on observe les paramètres de texture couleur des bois de pins poncés, on remarque qu'ils sont équivalents pour les six échantillons étudiés ici. Les couleurs des bois de pins (BM60 à BM320) sont toutes anisotropes, elles présentent une direction privilégiée de 0,5°-4,5° par rapport à l'axe Y. Les valeurs de S_{al} sont équivalentes (entre 2 et 3), ce qui veut dire que les couleurs sont caractérisées par des fréquences équivalentes (même distance entre texture).

En ce qui concerne les divers matériaux dérivés du bois, on distingue les plaques avec des textures couleurs anisotropes : BM, CP, PD, PSL, RET ($S_{tr} \prec 0,3$), et celles présentant des textures isotropes : MDF, OSB, PP ($S_{tr} \succ 0,5$). Les valeurs de S_{al} varient de 0,187 mm à 5,84 mm. On peut alors citer par ordre croissant de taille de structure : MDF, PP, PD, RET, PSL, OSB, BM, CP.

3.2.2.2 Applications de la théorie des variogrammes et des courbes d'écart de couleur sur les images des matériaux étudiés

3.2.2.2.1 Semi-variogrammes sur les composants *L*, *a*, *b* Chaque image de bois et composites à base de bois étudiée est composée de 1224 pixels x 2556 pixels. Pour calculer le semi-variogramme expérimental, l'image a été divisée en 4 images de 612 pixels x 1278 pixels. Quatre échantillonnages aléatoires de 50000 points ont été préalablement effectués dans chaque image du quart de la plaque, comme illustré dans la figure 3.15. Les moyennes et les variances des L, a, b des quatre échantillonnages sont ensuite comparées. Comme il a été vérifié que l'échantillonnage ne biaise pas la moyenne et la variance, le semi-variogramme est évalué sur un seul échantillonnage de 50000 points par quart de plaque. Le semi-variogramme caractéristique de la plaque entière est constitué par la moyenne des semi-variogrammes des quatre quarts. On s'est accordé une tolérance angulaire de 5° sur la direction afin d'avoir suffisamment de paires. C'est le semi-variogramme des résidus qui a été calculé car ce système permet de s'affranchir des phénomènes de non-stationnarité.

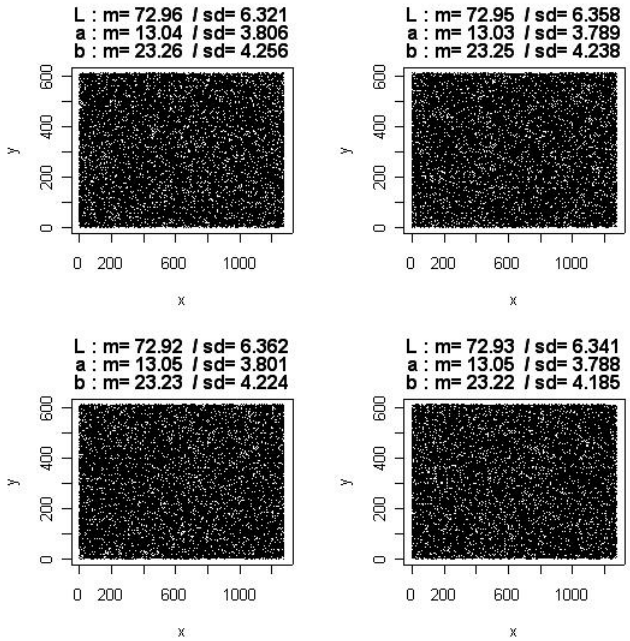


FIG. 3.15 – Quatre échantillonnages aléatoires de 50000 points dans l'image du quart de la plaque (m : moyenne, sd : écart-type)

Nous avons mené les analyses sur quatre directions : 0° (dans la direction de la longueur des plaques), 45°, 90°(dans la direction de la largeur des plaques) et 135°. Ces quatre directions sont illustrées dans la figure 3.16. Le semi-variogramme est calculé sur les 400

premières distances. La distance est exprimée en unité arbitraire qui fait référence à la taille d'un pixel dans le sens 0° et 90°. Si l'on veut l'équivalence en valeur métrique, il faut la multiplier par 75 μm. Ceci est valable pour toutes les plaques étudiées étant donné que toutes les acquisitions d'images ont été faites à la même échelle.

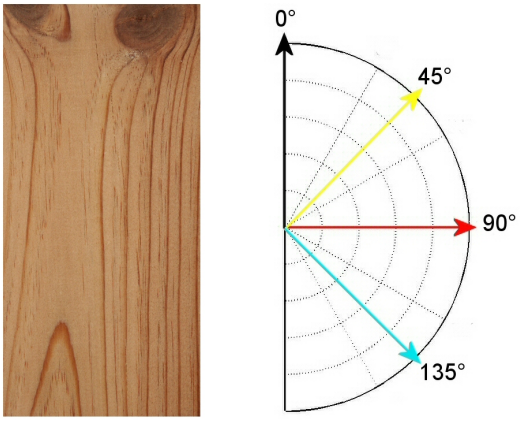


FIG. 3.16 – Les quatre directions d'analyse des semi-variogrammes et de la courbe d'écart de couleur

La totalité des semi-variogrammes figure en annexe I. Y sont présentées les semi-variogrammes suivant les quatre directions (0°, 45°, 90° et 135°) pour les six MDF poncés (figures I.1, I.2, I.3), pour les six bois poncés (figures I.4, I.5, I.6) et pour les huit divers matériaux dérivés du bois (figures I.7, I.8, I.9).

3.2.2.2.2 Courbe d'écart de couleur Nous avons représenté la courbe d'écart de couleur jusqu'à une distance de 600 (correspondant environ à la moitié de la plaque dans la direction 90° et au quart de la plaque dans la direction 0°) puis zoomé sur l'écart de couleur à grande échelle sur les 20 premières distances. Comme pour le semi-variogramme, la distance est exprimée en unité arbitraire équivalent à 75 μm et quatre directions (0°, 45°, 90°, 135°) ont été considérées. Toutes les acquisitions d'images ont été faites à la même échelle, il y a donc une relation stricte entre le nombre de couples et la distance dans les quatre directions pour toutes les plaques, selon la figure 3.17.

On trouve qu'il existe une similitude d'aspect entre les semi-variogrammes et les courbes d'écart de couleur. On peut donc choisir d'utiliser le même formalisme pour décrire les courbes d'écart de couleur, et désigner un palier que nous appellerons « *palier colorimétrique* » et une portée que nous appellerons « *portée colorimétrique* ».

Dans ces approches, le semi-variogramme des résidus est intéressant parce que celui-ci est plus riche en informations que la courbe d'écart de couleur. La suppression de l'effet de dérive permet de révéler les phénomènes sous-jacents, ce que la courbe d'écart de couleur ne permet pas. En revanche, cette dernière est plus riche dans le sens où la distance est plus petite. En effet, la courbe d'écart de couleur est ponctuelle contrairement aux variogrammes qui sont calculés à partir d'un échantillonnage aléatoire de paires (il manque des points).

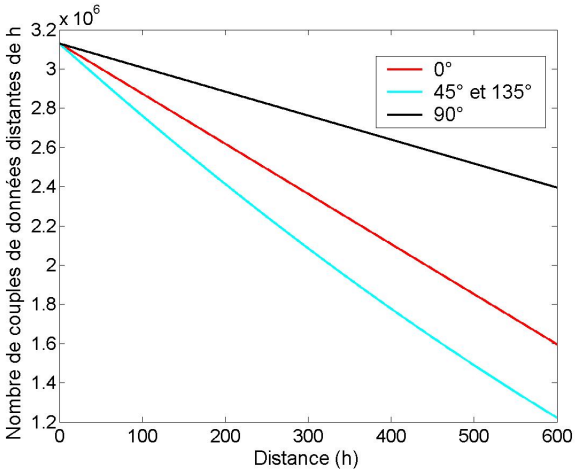


FIG. 3.17 – Nombre de couples de données en fonction de la distance, pour la courbe d'écart de couleur

La totalité des résultats d'analyse de la courbe d'écart de couleur figure en annexe J. Y sont présentées les courbes d'écart de couleur en fonction de la distance et suivant les quatre directions (0°, 45°, 90° et 135°) pour les six MDF poncés (figure J.1), pour les six bois poncés (figure J.2) et pour les huit divers matériaux dérivés du bois (figure J.3).

3.2.2.3 MDF poncés

Les semi-variogrammes de L, a et b des six MDF poncés montrent une structure spatiale de type sphérique (figures I.1, I.2, I.3 en annexe I). Ils permettent de séparer les produits en deux groupes :

- Les produits du premier groupe présentent des semi-variogrammes similaires dans les quatre directions. On y met MDF80, MDF100 et MDF120.
- Pour le second groupe, on retrouve MDF60, MDF220 et MDF320. Les semi-variogrammes diffèrent dans trois directions. Dans la direction 90°, des objets visibles se singularisent. Cet écart est lié à la présence de particules de petite taille qu'on voit par leur petite dimension.

Nous pouvons donc dire que le ponçage avec des grains fins révèle les éléments sombres qui donnent une texture couleur à la plaque.

Les courbes d'écart de couleur sont très proches pour les six plaques de MDF poncées étudiées. Toutes sont isotropes et décrivent un modèle sphérique avec une courte portée colorimétrique (h $\approx$ 5 $\approx$ 3,5 μm). Cela voudrait dire que les variances de L, a et b se compensent en moyenne dans la courbe d'écart de couleur, ce qui équivaut à une texture aléatoire à toutes les échelles et sans dérive.

Il est à remarquer que du fait de l'éclairage diffus utilisé pour la prise de vue, les courbes variographiques et les courbes d'écart de couleur ne permettent pas de détecter les traits longitudinaux visibles à l'oeil, générés par la direction de ponçage sur la surface.

3.2.2.4 Bois poncés

Les figures I.4, I.5, I.6 en annexe I montrent que les six bois poncés présentent des semi-variogrammes anisotropes caractérisés par une structure à effet de trou plus ou moins marquée amortie par une structure sphérique dans la direction perpendiculaire à la direction longitudinale des fibres.

BM60 se différencie des autres plaques car il a un semi-variogramme marqué dans la direction 0°, ce qu'on n'observe pas dans les autres plaques.

BM 80 se distingue colorimétriquement par un « palier colorimétrique » deux fois plus élevé que celui des autres plaques et par un semi-variogramme très contrasté dans les trois composantes L, a et b dans les directions 0°, 45° et 135°

3.2.2.5 Divers matériaux dérivés du bois

On observe une similitude entre les semi-variogrammes des coordonnées L, a, b (figures I.7, I.8, I.9 en annexe I) et les courbes d'écart de couleur (figure J.3 en annexe J). C'est pourquoi les interprétations portent essentiellement sur les courbes d'écart de couleur dans cette partie.

BM : dans la direction 0°, on a une structure sphérique. Dans la direction 90°, on a une structure sphérique de portée de 50 ($\approx$ 3,5 mm) associée à un effet de trou qui correspond aux successions de deux textures à rayures provoquées par les cernes de croissance du bois.

CP : On observe une dérive à 0° qui est liée à la présence d'une singularité dans la structure qui est un objet non fini situé à un bout et non totalement inclus dans la plaque. Si l'on exclut ce défaut, la structure serait de modèle sphérique avec une portée de 5 ($\approx$ 0,3 mm). A 90°, on a une grande structure et une périodicité au 1/3 de la distance maximale de l'image liée à la présence d'une zone un peu sombre située en bas de la plaque.

MDF : Dans les quatre directions, l'écart de couleur est fonction de la distance jusqu'à une portée colorimétrique d'environ 7 ($\approx$ 0,5 mm). La structure est isotrope et la portée est petite, ce qui contribue à une texture aléatoire à la vue.

PP : On a une courbe d'écart de couleur isotrope et proche de celle du MDF. L'observation de la courbe aux vingt premières distances montre que la portée colorimétrique est d'environ 12 ($\approx$ 1 mm).

PD : La dérive à 0° révèle la présence d'une singularité qui est un objet non fini situé à un bout. A 90°, on a une structure à effet de trou pur caractérisée par une ondulation et des oscillations. Ces derniers correspondent aux dessins des lignes droites et parallèles imitant les cernes, de période d'environ 50 ($\approx$ 3,5 mm). Cette structure démontre la nature synthétique de ce matériau.

OSB : La courbe d'écart de couleur montre une structure sphérique et définit une portée colorimétrique d'environ 100 ($\approx$ 7,5 mm). On note une légère périodicité dans le

sens 0° et 135°, ce qui indique que les particules (d'une taille de l'ordre de 7,5 mm) sont généralement orientées dans les sens 45° et 90°.

PSL : L'allure de l'écart de couleur change avec la direction. Dans la direction 0°, on a une structure sphérique alors que dans la direction 90°, on a une structure périodique. La différence de couleur est concentrée aux petites distances. Les bois sont collés de manière préférentielle.

RET : Dans la direction 0°, on observe une structure sphérique très fine due à la présence des points (les pores des fibres) et aux décroissances dans la bande. Dans la direction 90°, on a deux structures sphériques (la première est due au fait que les éléments claires et les éléments foncés sont chacun texturés, la deuxième est reliée à la présence d'un objet non fini, non totalement inclus dans la plaque) associées à une structure à trou (correspondant aux textures à rayures des cernes de croissance du bois).

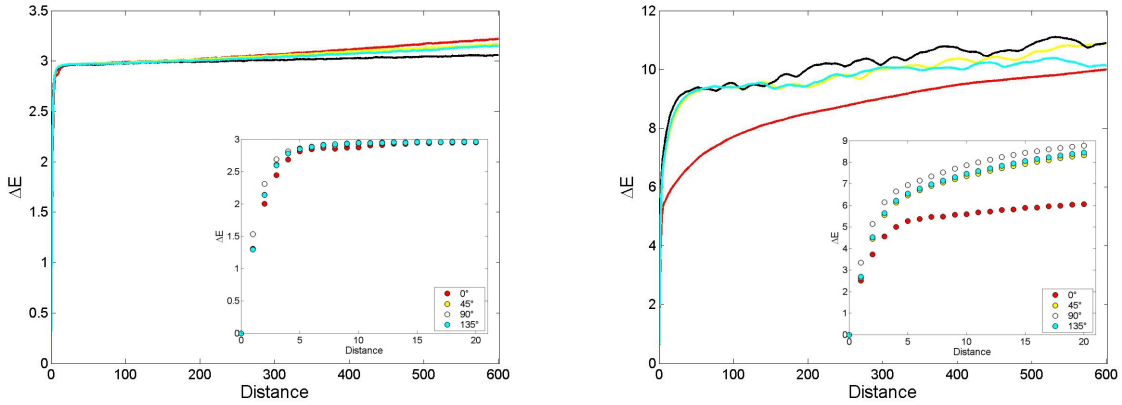
On observe presque systématiquement un effet de dérive sur les courbes d'écart de couleur, c'est-à-dire que les courbes ne se stabilisent pas aux grandes distances. Cette dérive est partiellement due à la prise de vue laissant supposer un éclairage non uniforme sur toute la plaque.

Pour récapituler, on pourrait classer ces huit plaques de matériaux dérivés du bois en trois groupes :

- Groupe A : comprenant les plaques avec une structure isotrope (même palier colorimétrique et même portée colorimétrique dans les quatre directions) classées par taille croissante de structure dans l'ordre suivant : MDF, PP, OSB. Si l'on exclut l'effet de dérive dû à un défaut au bout de la plaque, CP ferait aussi partie de ce groupe. CP aurait la structure la plus grande. La figure 3.18a est un exemple de courbe d'écart de couleur correspondant à cette structure,
- Groupe B : composé des plaques avec une structure anisotrope (montrant des différences de comportement dans les quatre directions, liées à la présence des cernes de croissance sur la surface). Dans cette famille, on peut classer dans l'ordre suivant : PSL, BM, RET et PD par complexité croissante de la courbe d'écart de couleur dans la direction 90°. La figure 3.18b est un exemple de courbe d'écart de couleur correspondant à cette structure,

L'implication sensorielle de la texture couleur des surfaces des plaques sera discutée dans le chapitre 4.

Les tableaux 3.4 et 3.5 résument les modèles mathématiques qui s'ajustent aux courbes d'écart de couleur dans la direction 0° et 90°.



(a) Groupe A

(b) Groupe B

FIG. 3.18 – Exemples de courbe d'écart de couleur correspondant aux deux groupes de texture

	Sphérique	Dérive	Trou	Gpe
MDF	1	1	0	A
CP	1	1	0	A
PP	1	0	0	A
OSB	1	0	0	A
BM	1	1	0	B
PD	1	1	0	B
PSL	1	0	0	B
RET	2	1	0	B

TAB. 3.4 – Type et nombre de modèles statistiques qui s'ajustent à la courbe d'écart de couleur, direction 0°

	Sphérique	Dérive	Trou	Gpe
MDF	1	0	0	A
PP	1	0	0	A
OSB	1	1	0	A
CP	1	1	0	A
BM	1	1	1	B
RET	1	1	1	B
PD	1	0	1	B
PSL	1	0	1	B

TAB. 3.5 – Type et nombre de modèles statistiques qui s'ajustent à la courbe d'écart de couleur, direction 90°

3.2.3 Récapitulatif et discussions

L'analyse statistique des valeurs de L, a, b des pixels constituant l'image de la surface des éprouvettes montre une faible variabilité inter-éprouvettes et intra-éprouvette pour les MDF poncés et les bois poncés et une variabilité importante pour les divers matériaux dérivés du bois.

Une étude de la texture couleur par le calcul des paramètres statistiques de répartition spatiale des couleurs a été testée dans ce travail et a donné des résultats qui ne sont pas éloignés de ceux obtenus avec une approche géostatistique. La périodicité des textures a bien été détectée et l'ordre de classement des échantillons par taille de structure est le même que l'ordre obtenu avec les semi-variogrammes. Néanmoins, les paramètres spatiaux ne fournissent pas assez d'informations sur la nature de la structure spatiale des coordonnées trichromatiques des couleurs des pixels de l'image. Elle ne permet notamment pas de distinguer PSL (pourtant structuré dans la direction 0°) des autres plaques à

rayures (BM, RET). Elle ne permet pas non plus de distinguer les plaques à fort contraste comme BM80, ni de voir les différences qui existent entre les six plaques de MDF poncées.

Les méthodes des semi-variogrammes et des courbes d'écart de couleur s'avèrent être plus complètes. En effet, les semi-variogrammes ont permis de mieux voir la texture et les courbes d'écart de couleur ont permis d'analyser la visibilité de cette texture. Les matériaux étudiés ont pu ainsi être classés suivant leur texture :

- Pour les MDF poncés, malgré une texture très proche, on peut distinguer d'un côté MDF80, MDF100, MDF120 et de l'autre côté MDF60, MDF220 et MDF320
- Dans la série des bois poncés, BM60 et BM80 se distinguent des autres plaques,
- Les divers matériaux dérivés du bois ont pu être classés en deux groupes : les matériaux présentant une texture isotrope et ceux avec une texture anisotrope. Un classement au sein de chaque groupe a pu être effectué.

Chapitre 4

Caractérisation sensorielle du toucher et de la vision du bois et relations avec les paramètres physiques

L'objectif de cette thèse est la métrologie des perceptions sensorielles liées au toucher et à la vision du bois, nous essayons de répondre à cela dans ce dernier chapitre. Celui-ci est divisé en deux parties, la première est consacrée aux résultats sensoriels obtenus sur les matériaux étudiés. Il s'agit des résultats des descriptions verbales du toucher et des résultats des classements tactiles, visuels et hédoniques. Dans une deuxième partie, nous reprenons l'ensemble des résultats expérimentaux (mesures physiques de la rugosité et de la couleur et caractérisations sensorielles du toucher et de la vision) et essayons d'établir les relations entre les propriétés physiques et les résultats sensoriels. Ensuite, nous nous sommes servis des méthodes statistiques afin de pouvoir prédire les résultats sensoriels à l'aide des résultats mesurés.

4.1 Caractérisation sensorielle du toucher et de la vision du bois

4.1.1 Descripteurs du toucher du bois

Le but de cette première étape est d'établir une liste pertinente de terminologie utilisée pour décrire l'espace de perception du toucher du bois. Les résultats permettront d'avoir une idée sur les perceptions tactiles des éprouvettes étudiées et de comprendre la différence de toucher qui pourrait y avoir entre les éprouvettes.

Les résultats des tests de descriptions ont été regroupés dans une matrice de contingence où le nombre d'occurrence de chaque descripteur est reporté pour chaque éprouvette (descripteurs en colonnes et éprouvettes en lignes). Seuls les termes proposés par plus de deux sujets pour chaque échantillon ont été considérés dans l'analyse. Une analyse de correspondance a ensuite été réalisée pour positionner ensemble les échantillons et les descripteurs dans un plan métrique de Khi-deux [28]. Trois couleurs ont été utilisées pour différencier trois types de descripteurs :

- les descripteurs hédoniques : qui traduisent les termes relatifs aux sensations agréables de la surface (*plaisant, agréable, désagréable*),

- les descripteurs de la qualité : il s'agit des descripteurs qui décrivent les qualités de la surface, ce sont les propriétés à partir desquelles la surface peut être évaluée, comme *collant, granuleux, pelucheux, plat, poli, poussiéreux, rêche, rugueux, etc.*,
- les descripteurs par analogie : il s'agit des termes qui font référence explicitement à un type particulier de surface, on peut citer par exemple *vernis, peinture, peau de pêche*.

Un critère arbitraire a été défini afin de choisir les dimensions de l'espace de l'analyse de correspondance. Le critère est atteint quand l'ajout d'un axe supplémentaire n'apporte pas un gain supérieur à 10% et que les dimensions choisies expliquent plus de 65% de la variance totale [90].

Les fréquences relatives de la table de fréquences ont été calculées, de sorte que la somme de toutes les entrées de la table totalise 1. On connaît donc la manière dont les unités de masse sont distribuées entre les cellules (descripteurs). Les descripteurs avec des masses supérieures à 2% sont mis en gras et italiques.

4.1.1.1 MDF poncés

Au total, 85 descripteurs ont été relevés. Les descripteurs qui n'ont été cités qu'une seule fois ont été éliminés, ce qui réduit leur nombre à 33. La projection des échantillons de MDF et des descripteurs dans l'espace de l'analyse de correspondance (figure 4.1) permet de mettre en évidence des termes antagonistes (*accrochant/glisse*) et des descripteurs qui sont proches en sensation (*glisse/lisse*, *rugueux/rêche*). Cette figure peut s'interpréter comme si l'axe 1 représente le facteur « granulosité/taille », avec une perception évoluant de *fin* à *grossier*. L'axe 2 représente le facteur « texture » avec une perception évoluant de *granuleux* à *fibreux*. L'observation de la projection des échantillons dans le plan défini par ces deux axes permet ainsi de dire que pour un même matériau (MDF), le ponçage avec un grain fin (P220 et P320) apporte un toucher *lisse* alors qu'un grain plus grossier (P60 à P120) renforce les sensations de *rugueux* et *rêche* et fait apparaître un jugement relié à la texture fibreuse et granuleuse de la surface.

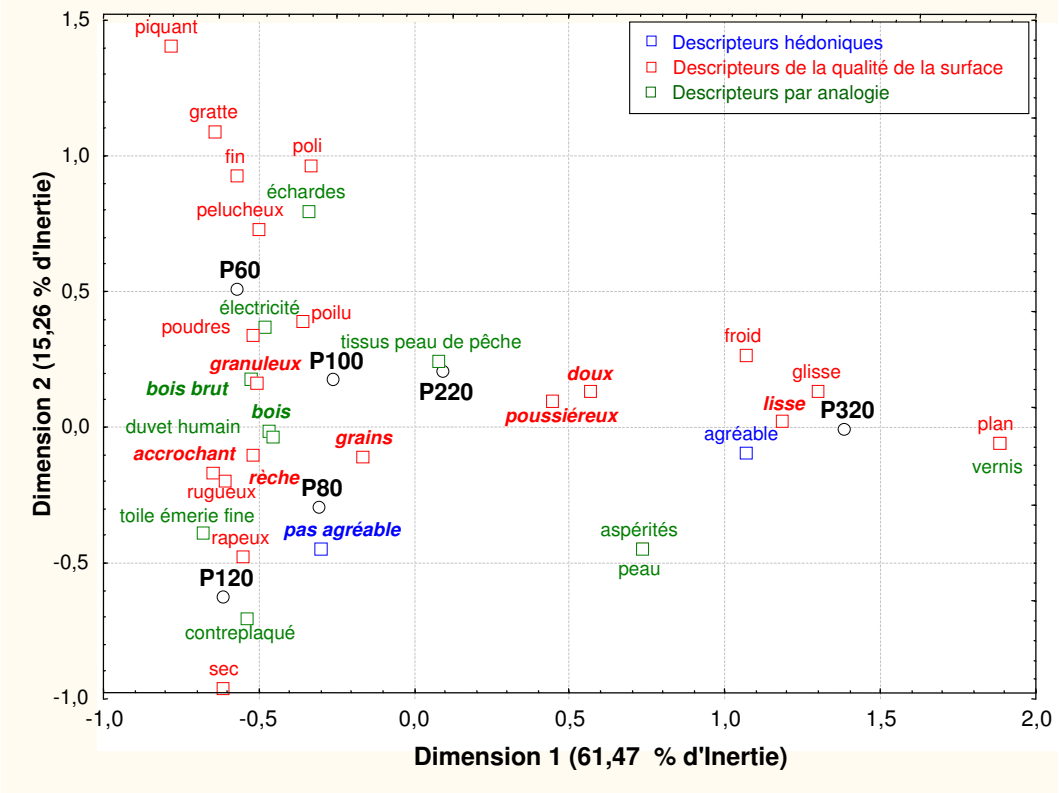


FIG. 4.1 – Projection des échantillons de MDF poncés et des descripteurs dans l'espace de l'analyse de correspondance. Les descripteurs avec des masses supérieures à 2% sont mis en gras

4.1.1.2 Bois poncés

Pour l'ensemble des termes proposés, la projection des descripteurs et échantillons dans le plan principal de l'analyse de correspondance montre que les éprouvettes sont organisées selon un axe 1 relatif à la « rugosité » et un second axe difficilement définissable. Les termes décrivant l'anisotropie de la surface (*rainures, hétérogène, ligne, stries, irrégulier, anisotrope, ondulation, veines, fibres*) se trouvent répartis le long de la direction des ordonnées sur la partie gauche du plan. Seul MDF320 se trouve éloigné de ces descripteurs et a un toucher *homogène*. Plusieurs termes caractérisant l'aspect granulaire de la surface ont beaucoup été utilisés (*grains, pelucheux, poussiéreux, granuleux, poudreux*). Leur répartition est plus concentrée au centre du plan. Cette perception est probablement due aux sensations générées au contact des poudres libérées par le ponçage.

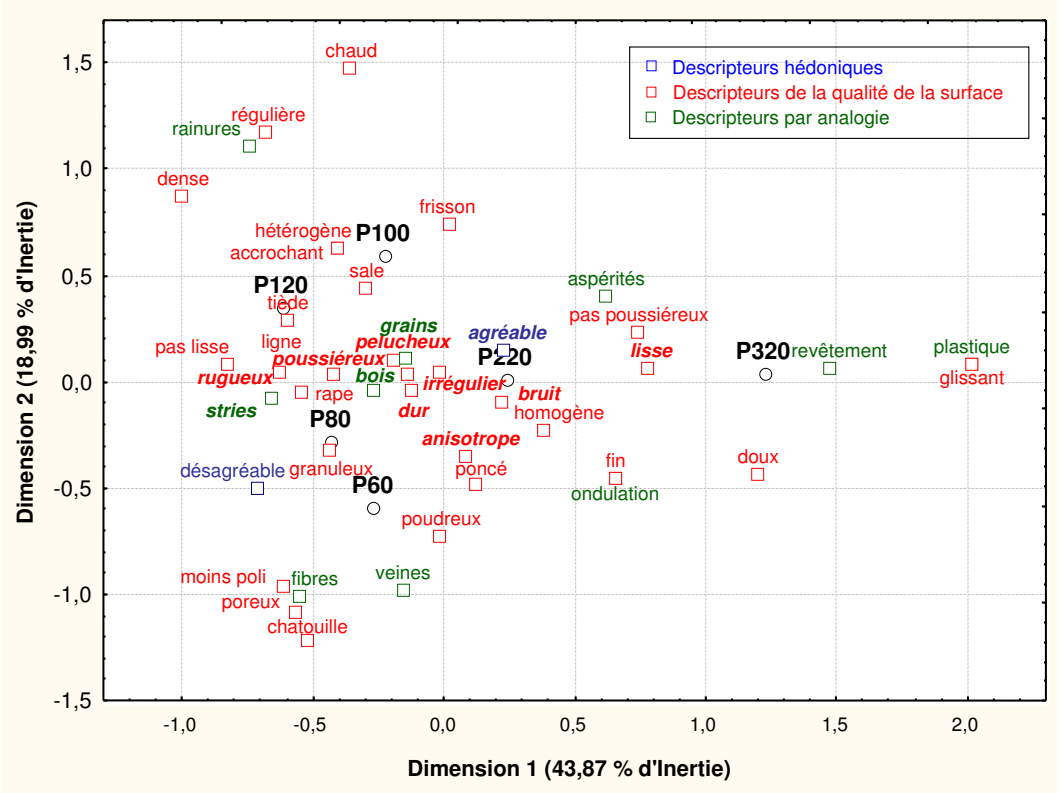


FIG. 4.2 – Projection des échantillons de bois de pin poncés et des descripteurs dans l'espace de l'analyse de correspondance. Les descripteurs avec des masses supérieures à 2% sont mis en gras

4.1.1.3 Divers matériaux à base de bois

En ce qui concerne les diverses surfaces des matériaux dérivés du bois étudiés, la projection des échantillons et des descripteurs dans l'espace de l'analyse de correspondance (figure 4.3) montre que l'axe 1 est essentiellement expliqué par les descripteurs relatifs à la rugosité de surface et à l'appréciation hédonique. On retrouve d'un côté les descripteurs *lisse, doux* (associés à *agréable, parfait*) et de l'autre côté les descripteurs *rugueux, pas lisse, accroche* (associés à *désagréable*). Les échantillons PD et MDF positionnés à gauche ont donc un toucher *lisse* contrairement à PSL, OSB, PP qui sont associés au terme *rugueux*. L'axe 2 représente la directionnalité de la texture : allant de la perception granuleuse (*granuleux, poussiéreux, poils*) pour l'échantillon PP à l'appréciation fibreuse (*fissure, ondulation, vague, rayure*) pour les échantillons BM, RET, PSL. Ces derniers sont en effet constitués de fibres orientées dans le sens de la longueur de la plaque, c'est ce qui favorise la perception fibreuse.

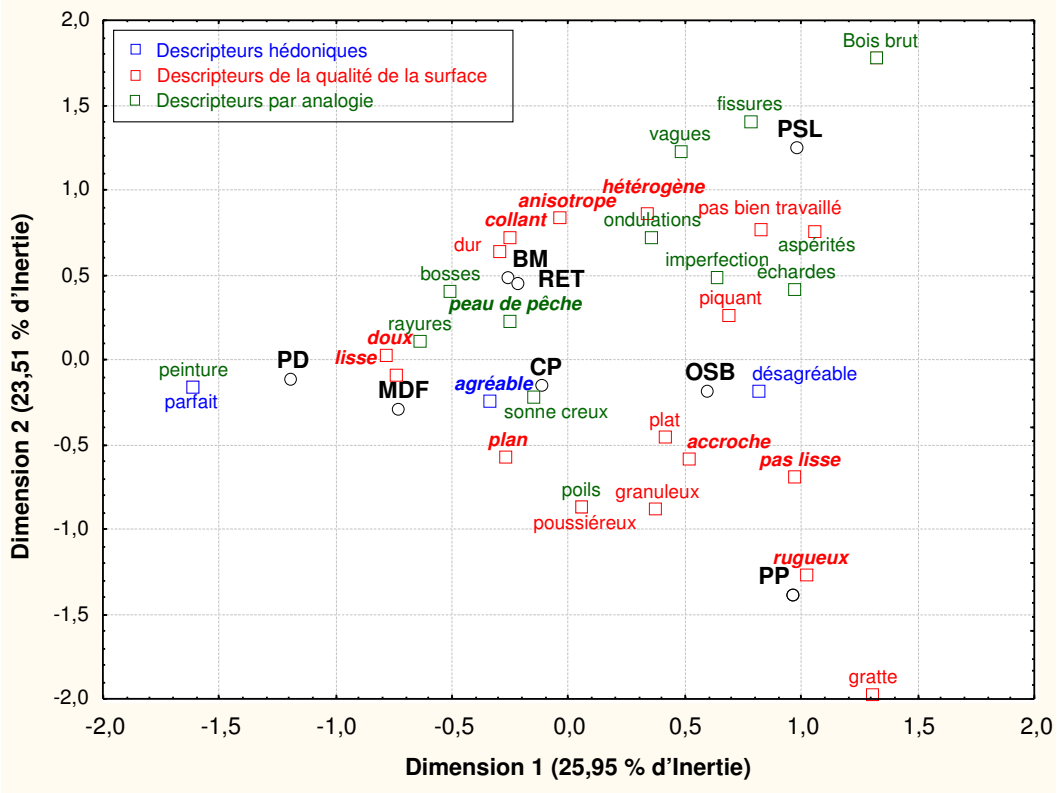


FIG. 4.3 – Projection des échantillons de bois divers et des descripteurs dans l'espace de l'analyse de correspondance

4.1.1.4 Récapitulatif et discussions

Si l'on se réfère aux démarches habituelles de l'analyse sensorielle d'un produit, ce travail de caractérisation verbale (sans description verbale de la signification des descripteurs) constitue une première étape. Les étapes suivantes consistent à éliminer les termes caractérisant des perceptions identiques, rechercher un nombre restreint de termes et à mettre en place une méthode pour décrire efficacement le toucher. Mais cela ne sera pas réalisé car ne fait pas l'objet de ce travail de thèse, ce travail se voulant être descriptif et exploratoire.

Nous pouvons dire aux vues des résultats sur l'ensemble des éprouvettes étudiées que plusieurs termes relatifs au « toucher du bois » ont pu être relevés et que les réponses et les perceptions peuvent varier d'un sujet à l'autre. On peut noter que, pour le groupe des divers matériaux dérivés du bois, les descripteurs sont séparées d'une manière plus claire dans l'espace de l'analyse de correspondance, contrairement à ce qui a été observé avec les surfaces de MDF. Les termes antagonistes se retrouvent éloignés les uns des autres. Cela est probablement dû à une plus grande diversité d'états de surface.

Les descripteurs proposés lors du contact du doigt avec les surfaces des bois ne sont pas

nouveaux car si l'on compare avec les travaux de Soufflet [102], on retrouve les descripteurs utilisés couramment dans la désignation des sensations du consommateur vis-à-vis des étoffes qu'il touche. Il en est de même des descripteurs utilisés pour caractériser la texture des couvertures des sièges automobiles selon Picard [90] excepté les descripteurs *souple, mou, dur, lourd, élastique, rigide* qui ne sont pas pertinents pour le toucher du bois. Mais ces descripteurs font plutôt intervenir d'autres procédures exploratoires (autres que le toucher à plat) que nous n'étudions pas dans ce travail [25].

Nous pouvons généraliser les résultats de l'analyse de correspondance en disant que les éprouvettes sont réparties dans un espace à deux dimensions dont le premier axe caractérise la rugosité et le second axe est relatif à la texture. Le terme *agréable* est souvent associé aux termes *lisse, glisse* et *doux*.

4.1.2 Rang de classement moyen

Les rangs de classement attribués à chaque éprouvette par les sujets au cours des tests sensoriels de classement ont été relevés et le rang moyen pour chaque éprouvette est calculé. L'intervalle de confiance à 95% est représenté pour déterminer si la différence est significative entre chaque type d'état de surface. Rappelons que trois modalités ont été testées pour les MDF et les bois de pin :

- tactile : en aveugle
- visuel : sans toucher
- hédonique : tactile en aveugle

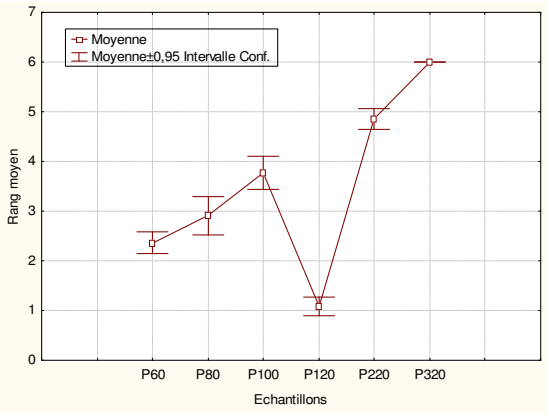
Pour les plaques de matériaux divers, ont été rajoutés deux modalités supplémentaires :

- hédonique visuel : sans toucher
- visio-tactile

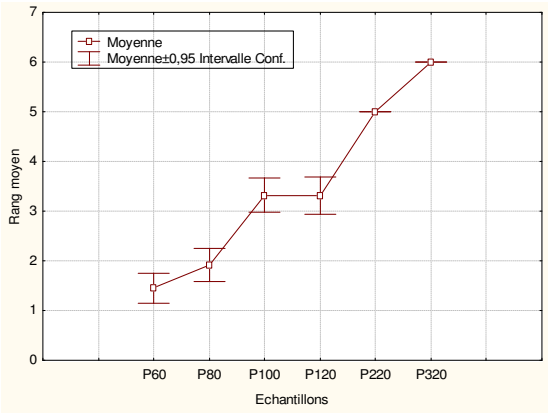
4.1.2.1 MDF poncés

Les résultats des classements tactiles, visuels et hédoniques (tactiles) sur les échantillons de MDF poncés avec les six tailles de grains sont présentés dans la figure 4.4

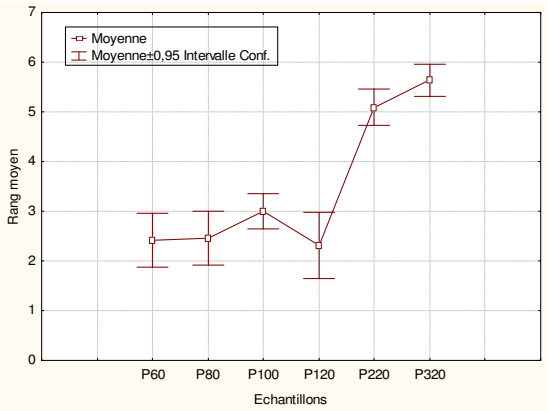
Tactile : Les rangs obtenus au test de classement suivant le critère « rugosité tactile » (figure 4.4a) sont prévisibles, la taille des grains de ponçage a un effet sur l'évaluation de la rugosité tactile. Toutes les surfaces sont distinctes les unes des autres et les surfaces perçues rugueuses sont celles poncées avec des grains grossiers. Il y a une exception pour la surface de MDF poncée avec P120 qui semble plus rugueuse que le reste des échantillons. Ce résultat est similaire à ce qui est observé avec le poids de matières enlevées lors du ponçage 2.6, ce qui confirme une fois de plus un artefact expérimental. Cela ne constitue pas un frein pour cette étude étant donné que le but du travail est d'établir la relation entre des paramètres physiques et les résultats d'analyse sensorielle, le procédé importe peu.



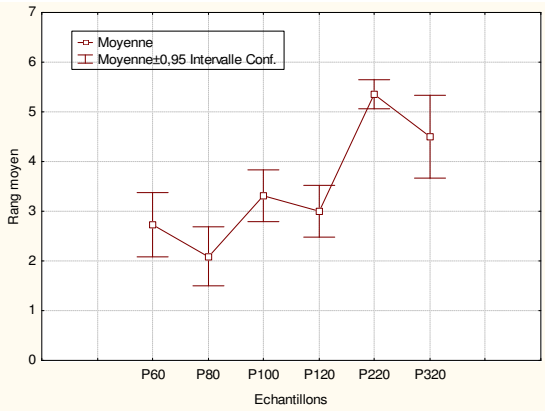
(a) tactile (MDF)



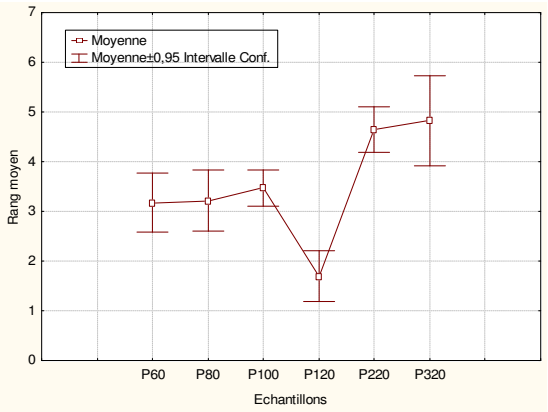
(b) tactile (BM)



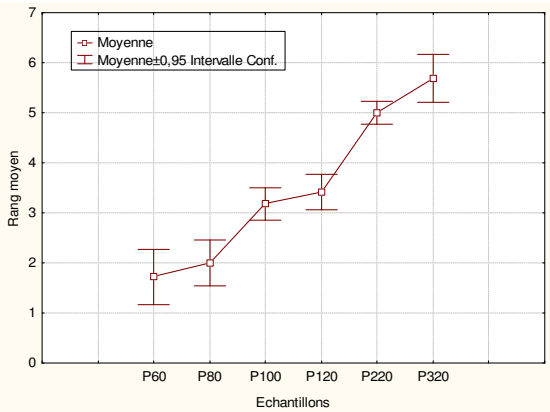
(c) visuel (MDF)



(d) visuel (BM)



(e) hédonique (MDF)



(f) hédonique (BM)

FIG. 4.4 – Rang de classement sensoriel pour les plaques de MDF (a, c, d) et les plaques de bois (b, d, e), moyenne ± intervalle de confiance à 95%.
Tactile : Rang 1=plus rugueux , Rang 6=moins rugueux
Visuel : Rang 1=impression de forte rugosité, Rang 6=impression de faible rugosité
Hédonique : Rang 1=moins agréable , Rang 6=plus agréable.

Visuel : En observant les résultats présentés dans la figure 4.4c, on s'aperçoit que la différence n'apparaît pas évidente à l'oeil. Il y a d'un côté les échantillons vus comme rugueux (P60, P80, P100 et P120) et d'un autre côté, il y les échantillons lisses (P220 et P320). On s'aperçoit ainsi que les sujets ont une meilleure discrimination aux tests tactiles qu'aux tests visuels.

Hédonique : Les résultats sont représentés par la figure 4.4e, il apparaît que les échantillons poncés avec P60, P80, P100 ne diffèrent pas significativement les uns des autres. L'échantillon le plus agréable au toucher est celui poncé avec P320, le moins agréable est celui poncé avec P120. Il semble ainsi que les sujets préfèrent les surfaces lisses à celles qui sont rugueuses.

4.1.2.2 Bois de pin poncés

La figure 4.4 résume les rangs de classement sensoriel correspondant aux plaques de bois de pin poncés avec six tailles de grains.

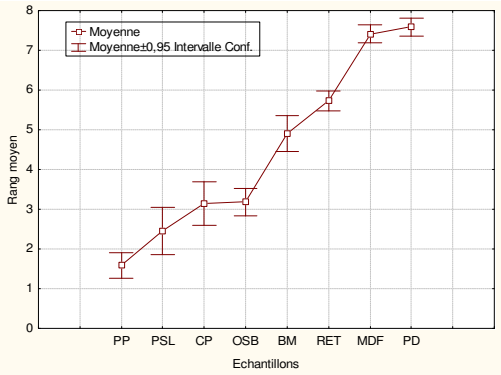
Tactile : Comme il a été observé sur les échantillons de MDF, l'effet de la taille des grains de ponçage sur la rugosité tactile est significatif (figure 4.4b). Plus les grains sont fins, plus les échantillons sont perçus rugueux au toucher. Tous les échantillons sont perçus différemment les uns des autres, excepté le bois poncé avec P120 qui est confondu avec celui poncé avec P100. On peut remarquer que pour le bois, l'échantillon poncé avec P120 n'est pas perçu aussi rugueux qu'avec le MDF. L'artefact expérimental n'a pas eu un effet important sur la rugosité tactile comme pour le MDF, cela peut être dû à la différence de structures cellulaires entre ces deux matériaux.

Visuel : Selon les résultats obtenus au classement visuel des bois (figure 4.4d), on peut remarquer que contrairement à ce qui a été observé avec les échantillons de MDF, la différence de rugosité entre les échantillons de pins n'est pas perceptible à l'oeil. Il n'y a aucune relation entre la taille des grains de ponçage et le classement visuel. On note qu'à la vue, la texture couleur prédomine sur la rugosité de surface. En effet, les MDF présentent une couleur unie tandis que les bois ont une texture colorée avec l'alternance de couleur foncée (bois final) et de couleur claire (bois initial).

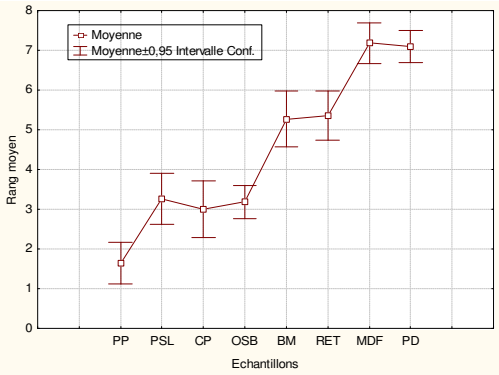
Hédonique : Comme le montre la figure 4.4f, les sujets n'ont pas senti la différence entre BM60 et BM80, entre BM100 et BM120, entre BM220 et BM320. Il semble que les sujets préfèrent les surfaces lisses à celles qui sont rugueuses.

4.1.2.3 Matériaux divers dérivés du bois

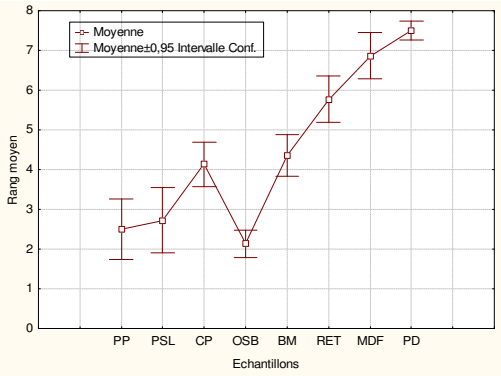
La figure 4.5 représente les rangs de classement tactile, visuel, hédonique (tactile, visuel) et visio-tactile pour les échantillons de divers matériaux à base de bois.



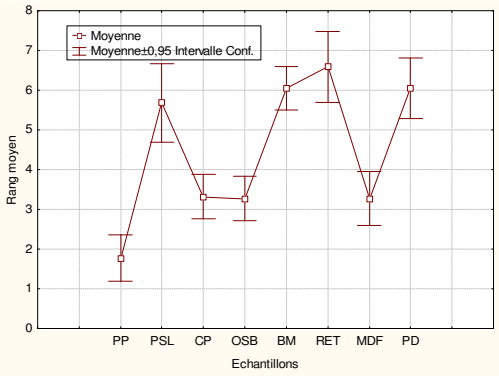
(a) tactile



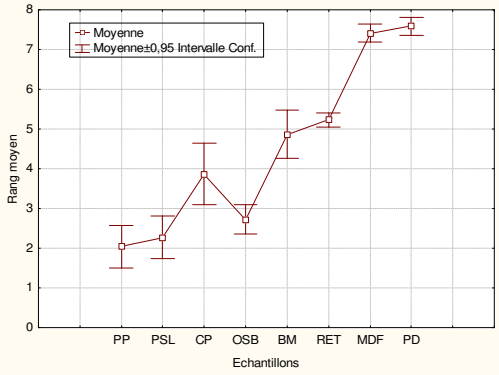
(b) hédonique tactile



(c) visuel



(d) hédonique visuel



(e) visio-tactile

FIG. 4.5 – Rang de classement sensoriel correspondant aux plaques de bois divers, moyenne ± intervalle de confiance à 95%.
Tactile : Rang 1=plus rugueux , Rang 6=moins rugueux
Visuel : Rang 1=impression de forte rugosité, Rang 6=impression de faible rugosité
Hédonique : Rang 1=moins agréable , Rang 6=plus agréable.

Tactile : Selon la figure 4.5a, la perception de rugosité tactile par ordre croissant est la suivante : PP est perçu comme l'échantillon le plus rugueux, puis en *ex-aequo* PSL, CP, OSB, ensuite viennent BM, RET, et enfin sont perçus comme les échantillons les plus lisses MDF et PD.

Visuel (figure 4.5b) : On retrouve presque le même rang qu'au test tactile, sauf pour deux échantillons : CP qui semble plus lisse à la vue et OSB qui semble plus rugueux à la vue au même rang que PP et PSL.

Visio-tactile : La comparaison entre le classement tactile en aveugle de la figure 4.5a et le classement visio-tactile de la figure 4.5e montre que le fait de voir les échantillons pendant qu'on les classe à la main modifie certains ordres de classement. Les modifications concernent notamment :
- le classement de CP que les sujets perçoivent plus lisses,
- le classement de OSB qui semble plus rugueux,
- BM et RET qui, probablement du fait de leur texture couleur similaire, sont perçus comme ayant le même état de surface.

L'effet de la vision est renforcé par les observations au test visuel.

Hédonique tactile : Le rang de classement obtenu selon le critère « agréable au toucher » (figure 4.5b) est le même que celui obtenu selon le critère « rugosité tactile », ce qui confirme que les sujets semblent préférer les surfaces lisses.

Hédonique visuel (figure 4.5d) : A la vue (sans toucher la surface), les sujets préfèrent les surfaces présentant des textures couleur en rayures, ce sont les éprouvettes de bois (BM, RET) ou imitant le « vrai » bois (PSL, PD) aux surfaces avec des textures aléatoires résultant des mélanges de fibres ou de copeaux de bois (CP, OSB, MDF). La texture couleur de PP est la moins appréciée. L'aspect synthétique du papier décor ne déprécie donc pas le produit.

4.1.2.4 Récapitulatif et discussions

Pour résumer, nous pouvons dire que ce soit pour les MDF poncés ou pour les bois poncés, la taille des grains de ponçage influe sur la perception de la rugosité tactile. Par ailleurs, les sujets sont plus performants au test tactile qu'au test visuel.

4.1.2.4.1 Scores Le score moyen obtenu aux tests hédoniques indique une tendance similaire d'évolution avec les rangs obtenus aux tests tactiles, cela confirme les résultats obtenus lors des tests sensoriels de description selon lesquels les sujets préfèrent les surfaces lisses aux surfaces rugueuses. On note cependant que l'amplitude entre le rang le plus bas et le plus élevé est plus réduite pour le rang hédonique. Une explication pourrait être la subjectivité dans le choix des qualités : certains sujets vont aimer les surfaces plus lisses, d'autres les plus rugueuses et d'autres utilisent d'autres critères. De plus, il peut être difficile d'apprécier l'état de surface sans avoir une précision sur sa fonction.

Dans ce travail, les échantillons ont été évalués par groupe de matériaux (MDF poncés, bois massifs poncés, matériaux divers à base de bois), ils n'ont pas été étudiés ensemble.

Il n'est donc pas possible de rassembler les résultats car l'épreuve de classement utilisé ici présente certaines limites, notamment :

- elle impose au sujet d'évaluer tous les échantillons avant d'indiquer sa réponse ; elle ne permet donc pas de comparer des échantillons évalués à des moments différents,
- elle ne renseigne pas sur la position absolue des échantillons sur une échelle d'intensité. La grandeur impliquée est une grandeur ordinale, la différence d'intensité entre deux échantillons successifs n'est donc pas nécessairement la même pour tous les rangs.

4.1.2.4.2 Invariance des paramètres de rugosité au cours du temps Ce sont les mêmes échantillons qui ont été évalués par tous les sujets, il n'a pas été possible de fabriquer autant d'échantillons que de sujets car on ne pouvait pas reproduire à l'identique les états de surface. De plus, les analyses sensorielles ont été réalisées sept mois après leur ponçage, leur état de surface a pu évoluer au cours du temps étant donné que le bois est un matériau vivant. On peut alors se demander si l'état de surface des échantillons testés a pu changer au cours du temps (effet temps) et par l'effet du contact du doigt à chaque passage (par un lissage de la surface par exemple ou parce que les fibres se couchent au fur et à mesure des contacts avec le doigt) ; ce qui introduirait un biais dans les interprétations des résultats. Nous avons vérifié cela en observant l'évolution des valeurs du paramètre de rugosité S_a au cours du temps (de 0 à 7 mois) et après le toucher (figure 4.6).

On s'aperçoit que les valeurs de S_a ne varient pas significativement dans le temps. De même, les valeurs de S_a avant et après le toucher de la surface ne sont pas significativement différentes.

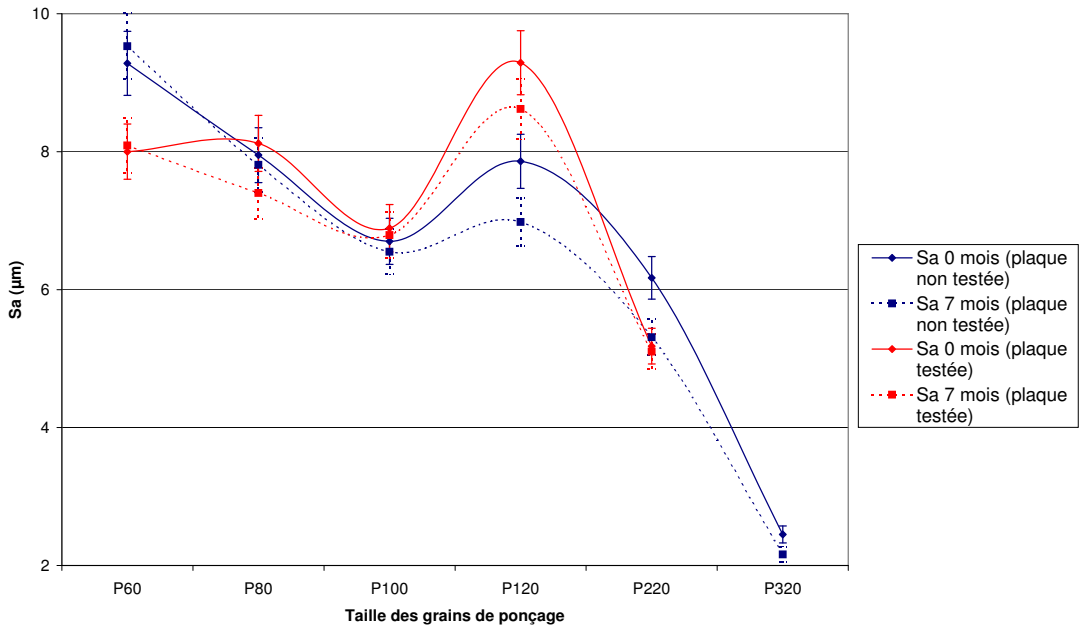


FIG. 4.6 – Effet du temps (7 mois) et du toucher sur les valeurs de S_a calculées avec le perthomètre

4.1.2.4.3 Invariance des erreurs individuelles Nous avons aussi calculé les erreurs que commettent les sujets aux tests sensoriels en fonction de l'ordre de passage afin de vérifier si l'échantillon a été modifié au cours des passages des doigts. L'erreur lors des tests sensoriels a été estimée de la sorte : nous avons calculé la distance entre le rang attendu x_i^* (selon la taille des grains de ponçage) et le rang donné par le sujet x_i pour toutes les éprouvettes étudiées. L'erreur commise correspondrait à la somme des distances tactiles par sujet selon l'équation 4.1.

$$\text{Somme des distances tactiles} = \sqrt{\sum (x_i - x_i^*)^2} \tag{4.1}$$

Plus la somme des distances tactiles est grande, cela veut dire que les échantillons sont mal placés dans le classement, et donc le sujet a fait plus d'erreur. L'erreur est ainsi représentée dans un graphique en fonction de l'ordre de passage (figure 4.7).

On s'aperçoit que l'erreur commise au classement sensoriel pour tout type de matériaux est conservée dans la durée : les sujets qui sont passés en dernier n'ont pas fait plus d'erreurs que les sujets qui sont passés en premier.

Par ailleurs, le coefficient de concordance de Kendall W a été calculé afin de vérifier la fiabilité entre les différents sujets. Une valeur de W proche de zéro traduit une discordance entre le rang des variables selon les sujets, tandis qu'une valeur proche de 1 représentent une concordance parfaite entre les rangs des variables [68, 78]. La valeur de W est de 0,87 pour les MDF poncés et 0,89 pour les bois poncés, les deux sont donc statistiquement significatifs.

Comme les paramètres de rugosité ne varient pas dans le temps, et les erreurs ne semblent pas augmenter en fonction de l'ordre de passage, on peut donc considérer que les surfaces (mesure et perception) se conservent dans le temps. Il est à rappeler que ce ne sont pas les mêmes sujets qui ont fait les tests sensoriels, il n'est donc pas possible d'étudier la performance individuelle.

4.1.3 Influence de la vision sur le toucher

Les résultats montrent qu'en situation unimodale (vision uniquement), la vision d'une texture couleur influe sur l'impression de rugosité tactile. En effet, sur des matériaux de couleur unie comme le MDF, les sujets sont capables de différencier la rugosité même sans toucher la surface. Par contre, pour des matériaux avec des textures couleur comme le bois de pin ou les divers matériaux à base de bois, ils ne sont plus capables de prédire la rugosité tactile à la seule vue des éprouvettes.

En situation bimodale (toucher et vision), il a été montré que la vision a effectivement une influence sur la perception tactile de rugosité, conformément aux travaux de Guest et Hatwell [52, 55]. Les expériences sur les divers matériaux à base de bois ont montré que lors d'une situation bimodale, l'effet de la vision a été observé sur OSB, CP, BM et RET. Des surfaces avec une faible variation de couleur au sein de l'éprouvette semblent moins rugueuses au toucher comparé aux résultats obtenus lorsque l'expérience est réalisée en

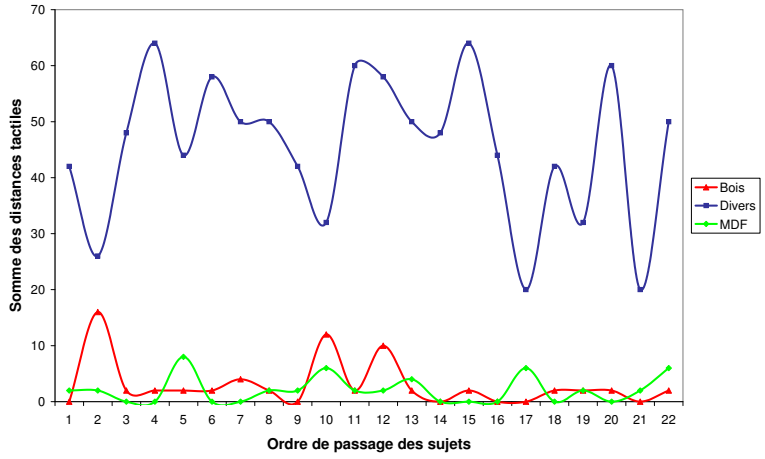


FIG. 4.7 – Estimation de l'évolution des erreurs commises par le panel sensoriel selon l'ordre de passage des sujets

aveugle. D'un autre côté, les surfaces présentant des textures couleurs caractérisées par la succession de rayures foncées sur fond unie semblent plus rugueuses au toucher quand le sujet regarde la surface.

4.1.4 Analyse du positionnement multidimensionnel (MDS)

Jusque là, nous avons étudié le rang moyen des échantillons, nous avons donc raisonné dans un espace unidimensionnel. Nous avons complété l'étude avec une analyse du positionnement multidimensionnel ou multidimensional scaling analysis (MDS) afin de positionner les échantillons dans un espace de perception multidimensionnel de la rugosité de surface. Les similarités entre les échantillons sont déterminées en prenant en compte l'histogramme de classement donné par chaque sujet constituant le panel sensoriel. Nous sommes conscients que nous ne disposons que d'un nombre peu élevé d'échantillons par groupe de matériaux.

4.1.4.1 Principe

L'idée fondamentale du positionnement multidimensionnel est de représenter chaque objet dans un espace euclidien, habituellement bi- ou tridimensionnel, de telle sorte que deux objets semblables soient représentés par deux points proches l'un de l'autre, et un couple dissemblable, par des points éloignés.

Les techniques de positionnement multidimensionnel trouvent leur origine dans les études psychométriques visant à comprendre comment les individus tissent des associa-

tions entre objets pour effectuer des groupements, des classifications. Dès lors, c'est devenu une technique de représentation géométrique largement utilisée dans des domaines aussi divers que le marketing, la sociologie électorale ou plus récemment l'analyse sensorielle [32]. En ce qui concernent les propriétés sensorielles tactiles, Yoshida (cité par [90]) a été le pionnier dans l'utilisation de la technique MDS afin d'établir l'espace de perception des textures de surface. D'autres auteurs comme Hollins [59], Picard [90], Ballesteros [7] ont aussi utilisé la technique MDS pour étudier l'espace de perception tactile de la texture de différentes matières. Ces travaux exposent une variété de moyens pour obtenir la matrice de dissimilarité et pour interpréter les axes.

4.1.4.2 Démarche

Nous voulons dans cette étude répondre à la question : « à l'aide de quels paramètres physiques mesurables peut-on expliquer la perception de la rugosité tactile des échantillons de MDF poncés, de bois poncés et des divers matériaux dérivés du bois ? ». Contrairement aux travaux cités précédemment, nous allons uniquement nous intéresser à la composante « sensation de rugosité » de la perception tactile de la surface du bois et ses dérivés. Pour ce faire,

- Nous avons établi un tableau représentant l'histogramme de classement de la rugosité tactile où figurent en lignes les échantillons et en colonnes le pourcentage de sujets classant chacun des produits au rang 1, 2 jusqu'au rang final (6 pour les MDF et bois poncés, 8 pour les matériaux divers).
- A partir de ce tableau, nous avons produit un fichier de matrice de similarités dans laquelle plus les produits sont semblables, plus l'indice de similarité est grand.
- La matrice a ensuite été analysée en utilisant l'analyse de proximité de Statistica 6 (Statsoft) [107]. Cette analyse permet d'obtenir une représentation graphique des produits dans un espace euclidien.
- La valeur du critère appelé « stress de Kruskal » défini par l'équation 4.2 a été mesurée afin de savoir si la représentation est fidèle ou non.

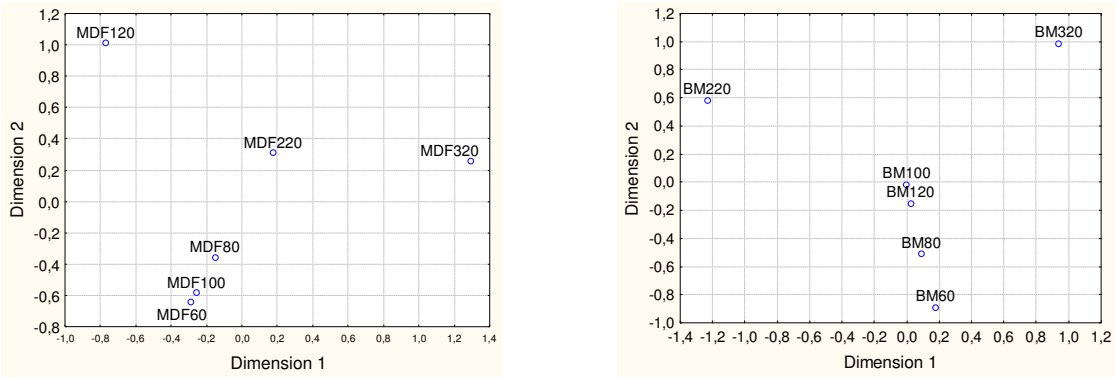
$$\phi = \sum [d_{ij} - f(\delta_{ij})]^2 \tag{4.2}$$

Dans cette formule, d_{ij} représente les distances reproduites, étant donné le nombre de dimensions, et δ_{ij} représente les données d'entrée (c'est-à-dire, les distances observées). L'expression $f(\delta_{ij})$ indique une transformation monotone non métrique des données d'entrée observées (distances).
Selon Grall [50], une valeur du « stress » supérieure à 0,5 décrit une représentation probablement aléatoire ; entre 0,5 et 0,25, une représentation de qualité médiocre ; entre 0,1 et 0,25 de qualité satisfaisante ; en dessous de 0,1 une excellente représentation. Ce critère permet donc de déterminer le nombre de dimensions de l'espace à retenir.

Les configurations optimales des MDF poncés, des bois poncés et des divers matériaux dérivés du bois dans un espace à deux dimensions sont présentées respectivement dans les figures 4.8a, 4.8b, 4.9a.

4.1.4.3 MDF poncés

Une configuration 2D du MDS donne une valeur de contrainte de 0,08, ce qui permet de dire qu'une représentation 2D est suffisante pour représenter les données. La figure 4.8a démontre que le premier axe (Dimension 1) de la représentation qui est celui correspondant aux écarts observés les plus importants en termes de disparités, sépare les MDF poncés avec des grains fins et les MDF poncés avec des grains grossiers. La dimension 2 met en exergue la singularité de MDF120 par rapport aux autres plaques. Sur cette dimension, MDF120 est plus proche des surfaces des plaques poncées avec des grains très fins (MDF220 et MDF320) que des surfaces poncées avec des papiers abrasifs de grains moyens (MDF80, MDF100).



(a) MDF (b) Bois

FIG. 4.8 – Représentation des espaces de perception tactile de la rugosité à l'aide de l'analyse MDS a) des MDF poncés, b) des bois poncés

4.1.4.4 Bois poncés

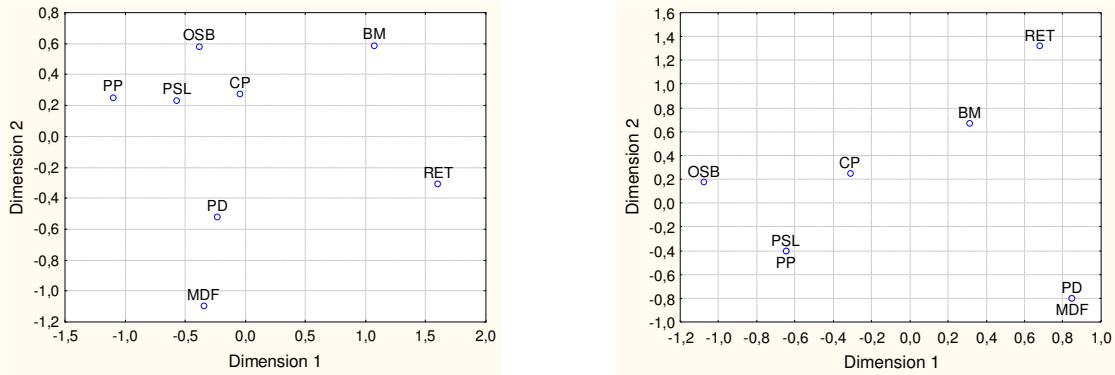
Une configuration optimale est obtenue avec 2 dimensions (contrainte de 0,09). La dimension 1 distingue BM220 situé à une extrémité de BM320 situé à l'autre extrémité de l'espace. Le reste des plaques BM60 à BM100 se situe entre ces deux extrêmes. La dimension 2 capture les différences de perception entre les surfaces par taille de grains de ponçage (figure 4.8b). Cette dimension est équivalente à la dimension 1 de l'espace de perception de la rugosité tactile des MDF poncés présenté précédemment dans la figure 4.8a. Ici, on observe une séparation claire entre la plaque de bois poncée avec un papier abrasif P120 et celles poncées avec des grains fins (BM220 et BM320), contrairement à ce qui a été observé avec la plaque MDF120. BM120 est même très proche de BM100. Le problème au ponçage n'a donc pas affecté la rugosité tactile des bois.

4.1.4.5 Divers matériaux dérivés du bois

Une configuration optimale est obtenue avec 2 dimensions (contrainte de 0,19). La figure 4.9a montre que dans l'espace de perception de la rugosité tactile, trois groupes

sont distincts : il y a les produits très lisses (PD et MDF) séparés des produits plus rugueux (PP, PSL, CP, OSB) par la dimension 2, ensuite il y a le groupe des « bois naturels » (BM et RET) qui est discriminé par la dimension 1.

Un but important de ce travail de thèse est de déterminer si l'espace de perception change quand les sujets explorent les matériaux en situation bimodale (vision + toucher). La question est donc de savoir si l'espace est similaire quand les sujets utilisent non seulement le toucher mais aussi la vision pour explorer la rugosité de surface. Les tests visio-tactiles ont été réalisés uniquement sur le groupe des divers matériaux dérivés du bois. C'est la raison pour laquelle, seul celui-ci est étudié pour comparer les espaces de perception tactile et visio-tactile de la rugosité. Comme pour l'exploration tactile (en aveugle), la qualité de la représentation suggère aussi une solution à deux dimensions pour l'exploration visio-tactile.



(a) tactile

(b) visio-tactile

FIG. 4.9 – Représentation des espaces de perception de la rugosité des divers matériaux dérivés du bois à l'aide de l'analyse MDS : a) tactile, b) visio-tactile

Même s'il y a quelques différences entre les deux configurations, l'arrangement global des huit plaques est très similaire. On assiste à une rotation de l'espace de -90° de telle sorte que la dimension 1 de l'espace tactile est comparable à la dimension 2 de l'espace visio-tactile, et inversement. Le rajout de la vision à l'exploration tactile n'a pas affecté l'organisation des groupes dans l'espace. On s'aperçoit ainsi que les groupes cités précédemment dans l'espace tactile (surface lisse/surface rugueuse/surface des bois naturels) se retrouvent encore dans l'espace visio-tactile. Par contre, PSL devient confondu avec PP et MDF se rapproche de PD.

4.1.4.6 Récapitulatif et discussions

Les résultats démontrent que la discrimination des différents matériaux par les sujets peut être représentée avec succès dans un espace euclidien. Les analyses MDS produisent une configuration bidimensionnelle avec une valeur de contrainte acceptable. Pour les trois séries de matériaux, une dimension de l'espace peut être interprétée comme le rang moyen tactile car les échantillons sont rangés le long de cette dimension selon le rang moyen tactile. Cela est dû au fait que l'analyse MDS a été opérée à partir des données de

l'histogramme de classement. La signification des autres dimensions serait intéressante à interpréter. La définition des dimensions permettrait de savoir en outre si la signification est la même pour chaque série de matériaux. Cette interprétation sera abordée dans le paragraphe 4.2.2 à l'aide d'une analyse en composantes principales avec les paramètres physiques mesurés.

Le rajout de la vision à l'exploration tactile a modifié les distances entre échantillons, a généré une rotation de l'espace mais n'a pas affecté l'organisation des groupes dans l'espace. Ces observations sont conformes aux travaux de Ballesteros [7] sur la perception tactile et visio-tactile de la texture de surface de divers matériaux. Ils ont aussi observé une rotation dans l'espace et ont conclu que la dimension « couleur » n'influe pas l'organisation de l'espace de perception tactile.

4.2 Relations entre des résultats sensoriels et expérimentaux

Le but de cette thèse étant de contribuer à la métrologie des perceptions sensorielles de la rugosité du bois et ses dérivés, dans cette seconde partie, nous avons repris tous les résultats physiques et les résultats sensoriels afin de chercher les relations entre eux. Cette démarche nous permettra d'extraire les paramètres physiques mesurables qui contribuent à expliquer la perception de la rugosité de surface.

4.2.1 Relations entre les paramètres de rugosité et les résultats des classements tactiles

Dans un premier temps, nous avons utilisé les rangs moyens obtenus aux classements sensoriels avec les panels et cherché les relations entre les paramètres de rugosité et le rang sensoriel. Nous avons utilisé la corrélation la plus simple à calculer, c'est-à-dire la corrélation linéaire. Le tableau 4.1 présente les valeurs des coefficients de corrélation entre les 13 paramètres de rugosité et le rang moyen tactile (en aveugle) pour les éprouvettes de MDF poncées, de bois massifs poncées et de divers matériaux à base de bois.

Selon le test de Fisher, le coefficient de corrélation linéaire r de Pearson est significatif au seuil de 1% à partir de 0,91 pour un nombre total d'échantillons égal à 6 (MDF poncés et bois poncés), et à partir de 0,83 pour un nombre total d'échantillons égal à 8 (dérivés du bois) [28].

Pour les corrélations linéaires significatives, nous avons établi des représentations graphiques des corrélations deux à deux entre le paramètre de rugosité et le rang moyen tactile avec les intervalles de confiance afin de voir dans quelle mesure le paramètre de rugosité peut prédire le rang sensoriel (figures 4.10 et 4.11).

	S_a	S_v	S_{sk}	S_{ku}	S_{ds}	S_{tr}	S_{al}
t_{moy} MDF	-0,970 (-0,942)	-0,885 (-0,885)	-0,894 (-0,942)	0,927 (0,942)	0,929 (1,000)	0,249 (0,257)	0,613 (-0,028)
t_{moy} Bois	-0,936 (-0,923)	-0,788 (-0,783)	0,152 (0,029)	0,747 (0,870)	0,581 (0,319)	0,914 (0,986)	0,925 (0,899)
t_{moy} DB	-0,578 (0,405)	-0,565 (-0,429)	0,249 (-0,024)	-0,435 (-0,429)	0,059 (-0,143)	-0,215 (-0,143)	-0,055 (-0,024)

	S_{td}	S_{fd}	S_{r1}	S_{r2}	S_{bi}	S_{vi}
t_{moy} MDF	0,524 (0,428)	-0,451 (-0,485)	-0,426 (-0,600)	-0,917 (-0,942)	0,553 (0,828)	-0,841 (-0,771)
t_{moy} Bois	0,531 (0,464)	-0,885 (-0,812)	0,829 (0,551)	-0,595 (-0,174)	-0,332 (-0,319)	-0,304 (0,029)
t_{moy} DB	0,582 (0,429)	0,491 (0,357)	-0,766 (-0,714)	-0,629 (-0,333)	0,396 (0,381)	0,097 (0,119)

TAB. 4.1 – Coefficient de corrélation de Pearson (et de Spearman) entre les paramètres de rugosité et les rangs moyens de classement tactile pour les éprouvettes de MDF, de bois massif et de divers matériaux à base de bois

Le tableau 4.1 permet de voir qu'au seuil de p=0,01 :

- le paramètre d'amplitude S_a est significativement corrélé avec le rang moyen tactile d'une manière négative, à la fois pour les MDF poncés ou pour les bois poncés. Ce qui veut dire qu'une surface rugueuse au toucher est caractérisée par une valeur élevée de S_a. Ce résultat est logique comme S_a est une moyenne des répartitions des altitudes autour du plan moyen. La représentation graphique de cette corrélation est satisfaisante (figure 4.10a), excepté pour les plaques de MDF poncées avec P60 et P80. MDF60 est perçu plus rugueux au toucher que MDF80 alors que son S_a est de 0,5 μm plus grand.
- Pour les MDF poncés uniquement, les paramètres S_{ds}, S_{ku} et S_{r2} sont aussi corrélés significativement avec le rang moyen tactile. Si l'on se réfère aux figures 4.10b, 4.10c et 4.10d, parmi ces trois paramètres, c'est S_{ds} qui prédit exactement le rang moyen tactile. En effet, seul ce paramètre a un coefficient de corrélation des rangs égal à 1 avec le rang tactile moyen. Autrement dit, une plaque perçue plus lisse a systématiquement un S_{ds} supérieur. S_{ds} (exprimé en $pics/mm^2$) étant le paramètre de rugosité qui traduit la densité des sommets, ce résultat nous permet de confirmer les observations de Fujiwara [46] que les humains ressentent essentiellement les pics de rugosité au toucher. En effet, quand la densité de sommets (S_{ds} exprimé en $pics/mm^2$) augmente, l'échantillon est perçu de plus en plus lisse au toucher.
- Pour le bois uniquement, les paramètres S_{tr} et S_{al} sont aussi corrélés significativement avec le rang moyen tactile. Mais lorsqu'on observe la représentation deux à deux, on remarque que ce sont les échantillons lisses qui font que la corrélation est significative. Pour les échantillons BM100 et BM120, il y a une confusion.
- En ce qui concerne les échantillons de matériaux divers dérivés du bois, aucun paramètre de rugosité n'est corrélé linéairement avec le rang moyen tactile. Cela est peut être dû au fait qu'on travaille sur une gamme de texture plus élargie. Les échantillons sont très différents les uns des autres en termes d'état de surface si

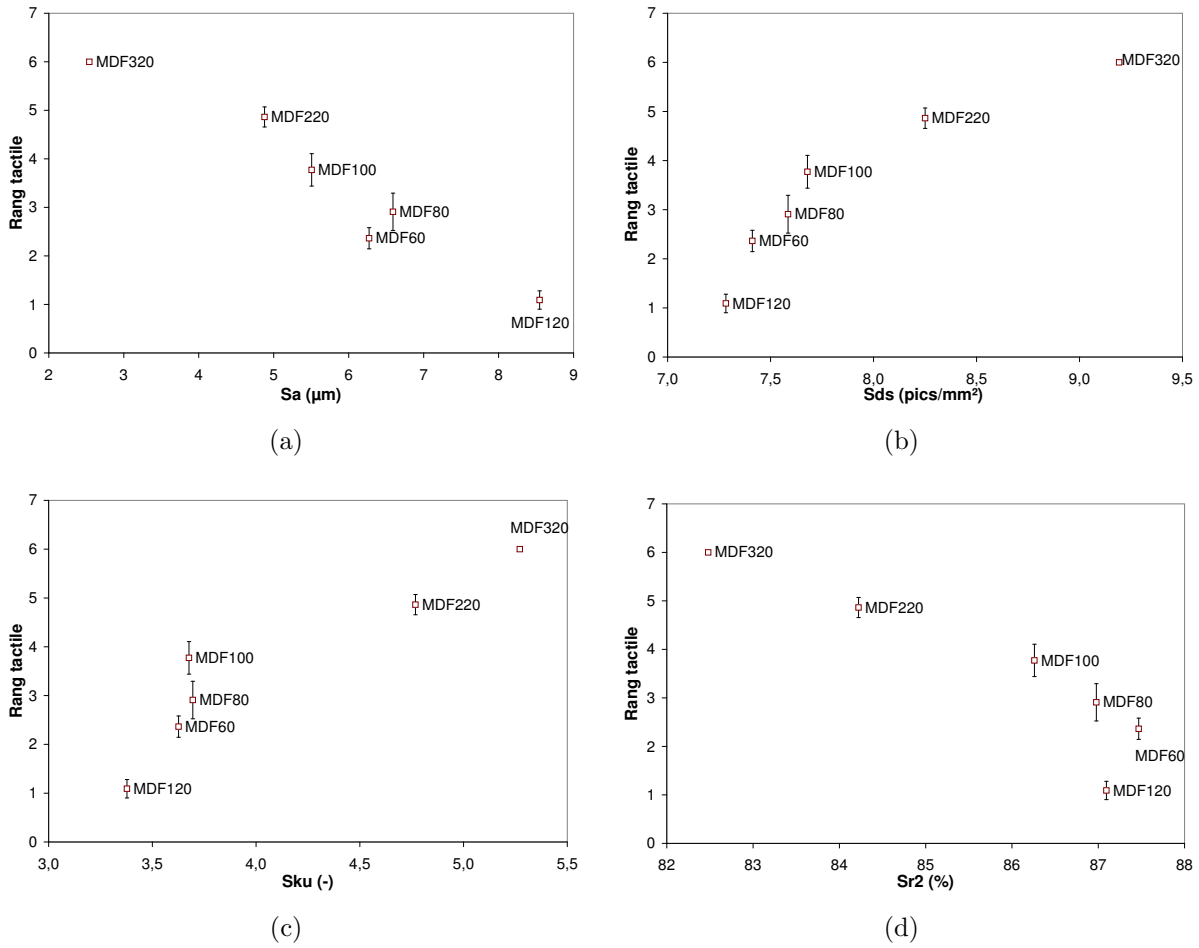


FIG. 4.10 – Représentation deux à deux du rang tactile et des paramètres de rugosité des plaques de MDF poncées.
Rang 1 = plus rugueux, rang 6 = moins rugueux

bien que des paramètres de rugosité pris un à un ne pourraient pas expliquer le classement sensoriel.

On peut ainsi dire que le paramètre S_a qui est communément utilisé pour qualifier les états de surface des matériaux [12, 57, 84, 88] est un bon indicateur de la rugosité tactile, mais uniquement si l'on compare des matériaux avec des textures proches (distribution des pics et des vallées et répartition spatiale proches). C'est en effet le cas dans la classement de rugosité des MDF poncés avec différents grains et des bois poncés avec différents grains. Il n'est cependant pas suffisant puisque dans deux cas, il ne prédit pas correctement le rang sensoriel. Pour une application à tout type de matériaux dérivés du bois, il n'y a pas de relation stricte entre le paramètre S_a et le rang tactile, il doit donc être complété par ailleurs. En effet, S_a est une moyenne des altitudes, il ne prend pas en compte la distribution des altitudes. Pour illustrer l'insuffisance de S_a pour caractériser la rugosité tactile de matériaux différents, la figure 4.12 représente trois profils topographiques différents, présentant pourtant la même valeur de R_a (en 2D). On se rend compte que la surface au contact avec le doigt lors du toucher est complètement différente pour ces trois profils. Le profil 1 présente plusieurs pics à une altitude élevée, le profil 2 présente des vallées profondes qui peuvent ne pas être senties par le doigt, d'où une perception

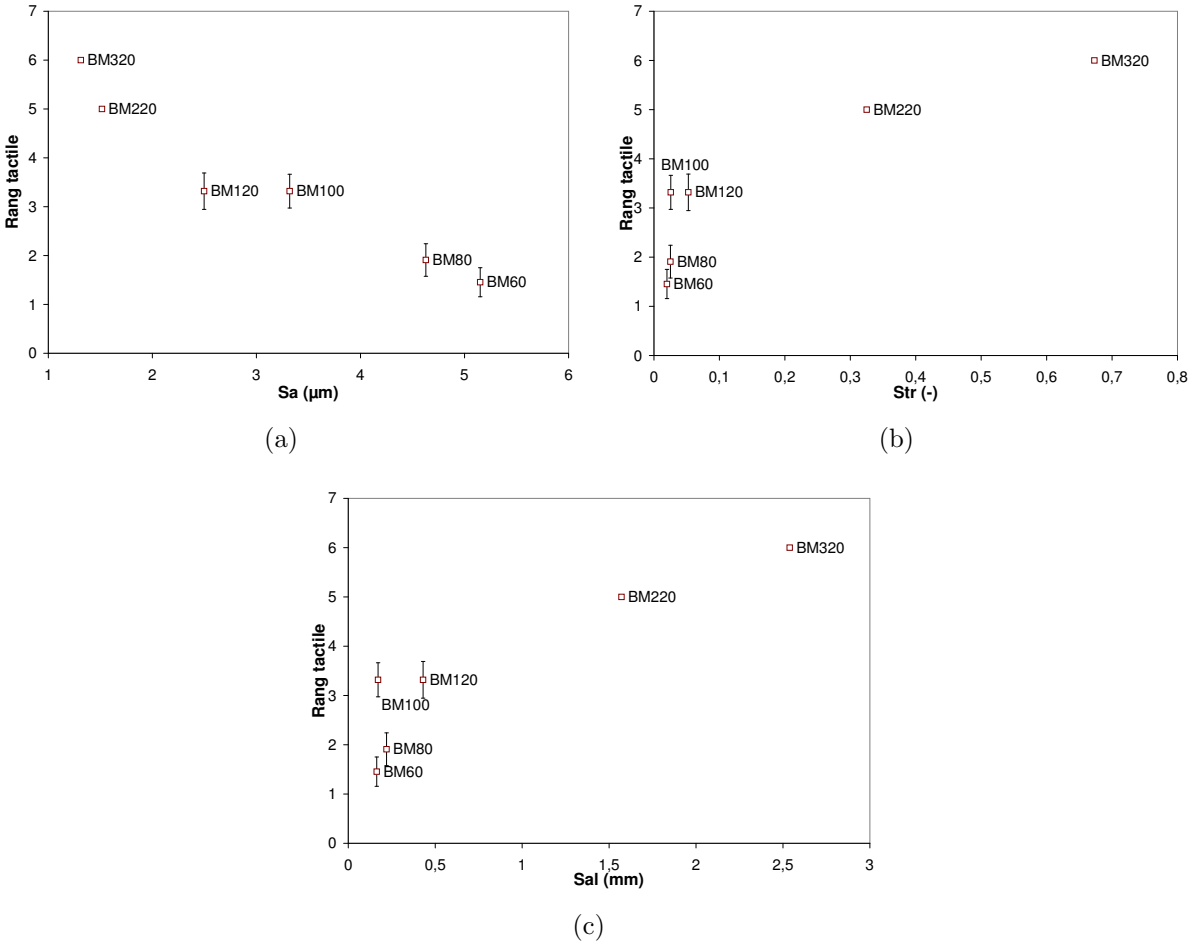


FIG. 4.11 – Représentation deux à deux du rang tactile et des paramètres de rugosité des plaques de bois poncées.
Rang 1 = plus rugueux , Rang 6 = moins rugueux

différente au toucher. Hormis le paramètre d'amplitude S_a, les cinq autres paramètres qui sont corrélés significativement avec le rang moyen tactile sont des paramètres spatiaux. Les sensations tactiles de rugosité sont donc reliées aux textures spatiales.

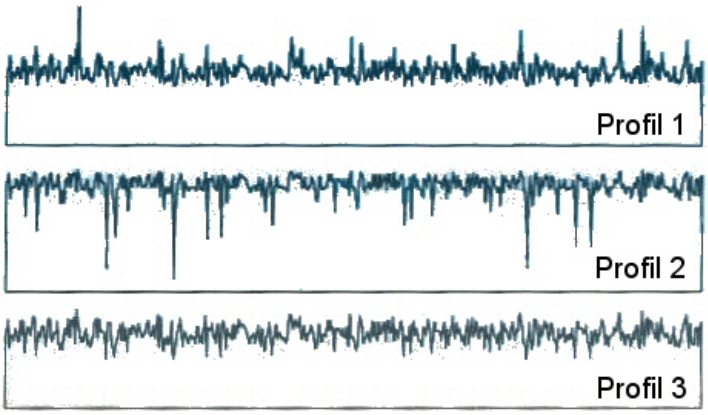
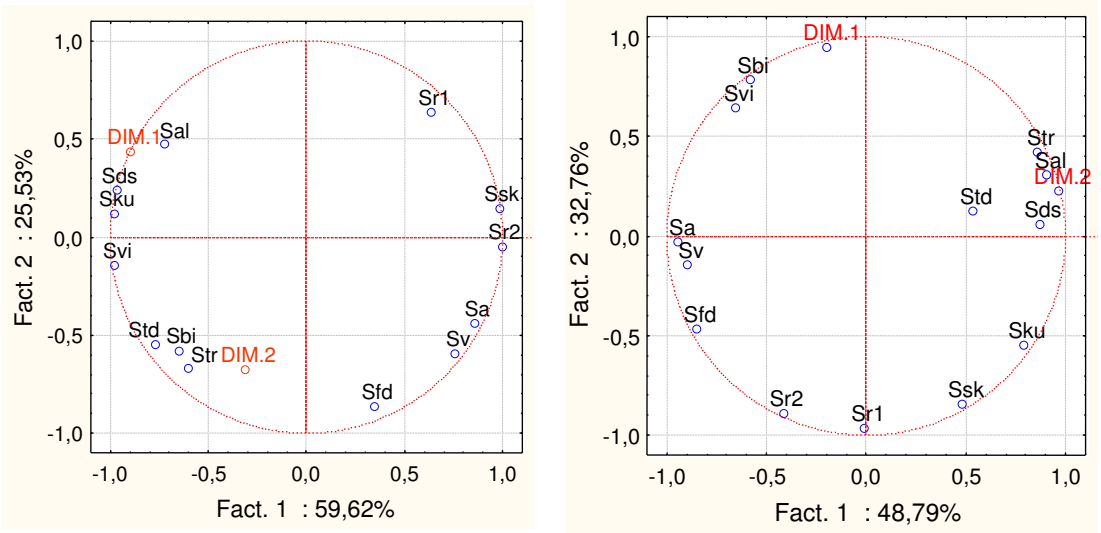


FIG. 4.12 – Trois profils topographiques différents présentant la même valeur de R_a [61]

4.2.2 Corrélation (ACP) des composantes de la MDS avec les paramètres de rugosité

L'analyse en composantes principales (ACP) entre les dimensions de l'espace de perception de la rugosité de surface (figures 4.8 et 4.9) et les paramètres de rugosité a été utilisée afin de déterminer la signification des dimensions de l'espace euclidien et d'expliquer ainsi les dissimilarités (distances) observées entre les échantillons.



(a) MDF (b) Bois

FIG. 4.13 – Projection sur le plan factoriel 1 x 2 des paramètres de rugosité et des coordonnées des dimensions de la MDS calculées a) sur les plaques de MDF poncées, b) sur les plaques de bois poncés

4.2.2.1 MDF poncés

L'ACP montre que le lien entre les paramètres de rugosité et les dimensions du MDS peut être décrit par deux facteurs qui expliquent ensemble 85,15 % de la variabilité (figure 4.13a). La dimension 1 du MDS est positivement corrélée avec S_{al} et S_{ds} (décrivant la répartition spatiale des altitudes topographiques) et négativement corrélée avec S_a et S_v (des paramètres qui décrivent l'amplitude des altitudes topographiques). Ce résultat confirme la précédente observation selon laquelle les sujets percevaient la rugosité de surface par ordre croissant de taille des grains de ponçage. La dimension 2 est corrélée avec S_{tr} et peut donc être interprétée comme l'isotropie des altitudes topographiques. MDF120 est proche de MDF220 et MDF320 malgré que ces dernières soient très lisses. La raison est qu'elle présente une texture isotrope (en raison du problème de ponçage) comme MDF220 et MDF320, contrairement aux plaques MDF60 à MDF100 qui présentent une anisotropie due aux traits générés par le ponçage.

4.2.2.2 Bois poncés

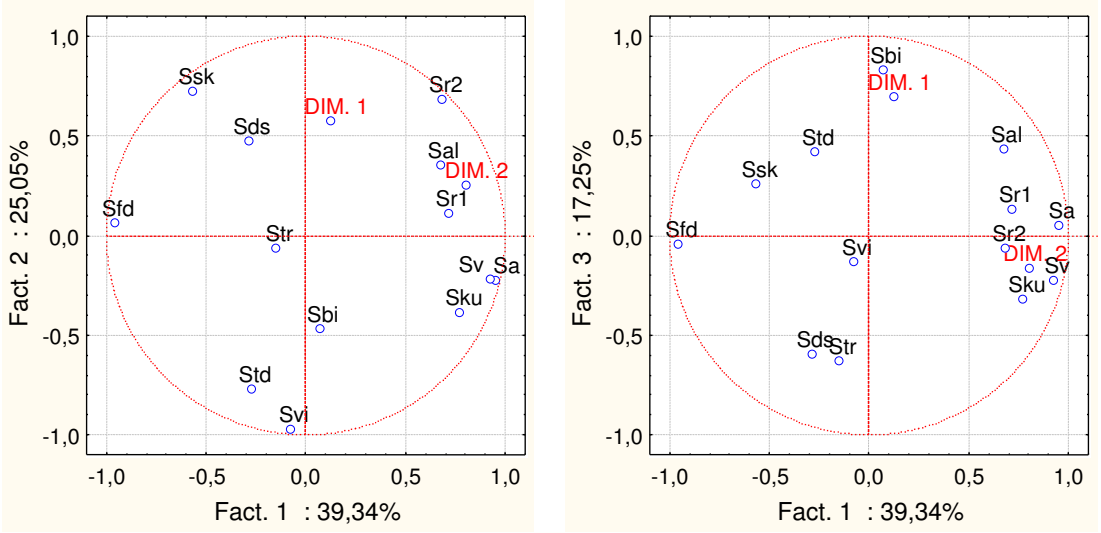
Deux facteurs principaux ont pu être extraits de l'ACP (figure 4.13b). Avec une inertie cumulée de 81,49 %, ils expliquent une part importante du nuage de paramètres de rugosité et des dimensions du MDS. La première dimension du MDS est négativement corrélée avec le paramètre de rugosité S_{r1}. Rappelons que S_{r1} est la surface portante supérieure, c'est-à-dire le pourcentage de la matière au début de la zone des 40% de la courbe d'Abbott-Firestone. Ce paramètre représente donc les vallées. La dimension 2 est positivement corrélée avec S_{al} et S_{ds} et négativement corrélée avec S_a, S_{fd} et S_v. Cette seconde dimension a la même signification que la dimension 1 des MDF poncés.

4.2.2.3 Divers matériaux dérivés du bois

Deux composantes principales expliquent ensemble seulement 64,39 % de la variance totale, c'est pourquoi nous avons pris aussi en compte une troisième composante (figure 4.14). On s'aperçoit à l'aide de l'ACP que la dimension 1 du MDS est corrélée avec S_{al}, qui définit la taille de la texture. Une explication de la distinction entre les six matériaux dérivés du bois et les deux « bois naturels » serait donc que ces derniers présentent une texture de plus petite fréquence correspondant à des ondulations perceptibles à la surface créées par le rabotage de BM et RET. En effet, les bois ont été rabotés et non les autres matériaux. La dimension 2 est corrélée avec S_{r1}.

4.2.2.4 Récapitulatifs et discussions

Dans les études antérieures [7, 42, 90, 102], l'analyse MDS a été utilisée pour déterminer l'espace de perception de la texture de surface des matériaux à travers un tri, un arrangement spatial ou un regroupement des matériaux qui sont perçus comme étant proches. Ces analyses intègrent ainsi divers composantes du toucher telles que la rigidité, la température,



(a) (b)

FIG. 4.14 – Projection des paramètres de rugosité et des coordonnées des dimensions de la MDS calculées sur les plaques des divers matériaux dérivés du bois a) sur le plan factoriel 1 x 2, b) sur le plan factoriel 1 x 3

le collant, etc., y compris la rugosité. Dans les travaux de Picard par exemple [90], l'analyse MDS a été pertinente et a permis de déterminer 3 à 4 dimensions interprétées comme l'axe doux/rêche (Dim.1), épais/fin (Dim.2), relief (Dim.3) et dureté (Dim.4). Hollins [59] a trouvé qu'un espace à trois dimensions permet d'expliquer la variabilité de perception de la texture d'une surface, la première dimension est reliée à la rugosité, la deuxième à la dureté et la troisième dimension est non expliquée.

Notre travail porte spécifiquement sur la rugosité de surface. Notre analyse démontre que l'analyse MDS réalisée à partir des rangs de classement sensoriel peut être appliquée pour représenter les échantillons dans un espace euclidien de la rugosité de surface. L'ensemble des expérimentations a montré que deux dimensions suffisent à décrire l'espace de perception tactile de la rugosité de surface pour chaque groupe de matériaux étudié. Mais les significations des dimensions ne sont pas toujours les mêmes. Ainsi, si on considère tous les échantillons étudiés, quatre dimensions ayant différentes significations sont trouvées. Ces dimensions sont :

- une dimension expliquée par les paramètres S_s, S_v, S_{al}, S_{ds}. Cette dimension caractérise « l'intensité » de la rugosité, intégrant les informations sur l'amplitude et la densité des pics,
- une dimension expliquée par le paramètre S_{r1} qui caractérise la fraction de la surface qui consiste en des petits pics au dessus du plan moyen,
- une dimension qui définit la présence « d'ondulations » sur la surface. Cette dimension est expliquée par le paramètre S_{al},
- une dimension relative à « l'isotropie » de la surface, corrélée au paramètre S_{tr}.

La différence de signification de certaines dimensions pour les trois séries de matériaux étudiées confirme l'intérêt d'avoir pris en compte différents types de matériaux (les poncés et les non poncés) afin de connaître les dimensions de l'espace de perception de la rugosité tactile pour une application sur le matériau bois de pin maritime et ses dérivés. Cette

analyse MDS constitue un complément intéressant des analyses de régression linéaire entre les rangs moyens tactiles et les paramètres de rugosité. En effet, la régression simple n'a pas permis de définir des paramètres explicatifs des classements de rugosité sur le groupe des matériaux dérivés du bois, pourtant l'analyse MDS a montré qu'il existe un lien avec S_{r1} et S_{al}. Par ailleurs, l'analyse MDS a permis de prendre en compte la multidimensionnalité de la perception tactile de la rugosité de surface. En effet, en plus de la perception de l'amplitude des altitudes topographiques (successions de pics et de vallées), l'analyse MDS a permis de souligner que les sujets ont aussi perçu d'autres phénomènes qu'ils tiennent compte dans leur classement, comme :

- la présence ou non d'une direction privilégiée de la texture (isotropie de la surface), cas observé sur les MDF poncés,
- la présence d'ondulations sur la surface, cas observé sur les divers matériaux dérivés du bois,
- le pourcentage des matières dans la zone des vallées, cas observé sur les bois poncés et les divers matériaux dérivés du bois.

Ces observations peuvent être croisées aux résultats obtenus avec le relevé des descripteurs du toucher et permettent de confirmer la perception de la répartition spatiale des altitudes rugosimétriques par les sujets. Ce constat est en accord avec les résultats relevés dans la littérature [60] comme quoi : ce sont les stimulations spatiales et vibrationnelles qui contribuent à la perception de la texture au toucher.

4.2.3 Implications visuelles de la rugosité

Dans cette partie, nous discutons la capacité des analyses spatiales des coordonnées colorimétriques des images à renseigner sur les perceptions visuelles de la rugosité par les sujets. Nous rappelons que lors des séances d'analyse sensorielle, les classements visuels ont été effectués sans toucher les surfaces des matériaux.

Pour les plaques de MDF poncées, les analyses spatiales des coordonnées trichromatiques des couleurs n'expliquent pas les résultats des classements visuels. En effet, leurs courbes d'écart de couleur sont très proches et les différences de comportement des semi-variogrammes n'ont pas de lien avec les classements visuels. On voit que la surface du MDF120 est vue comme la plus rugueuse, c'est l'effet d'un problème de ponçage, déjà expliqué auparavant et non une influence de la couleur.

A partir des résultats de classement visuel des bois poncés, nous pouvons remarquer qu'à une distance de vue d'environ 30 cm (dans les conditions des tests sensoriels), la surface de BM320 n'est pas vue assez fine, les surfaces de BM60 et BM100 sont vues trop fines. Les analyses spatiales renseignent ainsi sur le classement visuel des produits. Une surface avec des couleurs à faible contraste (faible amplitude de la variance) et avec une texture de grande taille est supposée lisse. En revanche, la texture ressort mieux sur une surface présentant un fort contraste (forte amplitude de la variance), on croit que la surface est plus rugueuse.

Cette observation s'applique aussi sur les divers matériaux dérivés du bois. En effet, la surface de CP est vue plus fine que ce que les sujets ont réellement perçu aux tests tactiles (en aveugle) car son écart de couleur ΔE est faible (≈ 1) pour toutes les distances, ce qui

veut dire que les sujets n'ont vu ni méso- ni macrotexture. Pour ce qui concerne la plaque d'OSB, sa surface est vue plus rugueuse qu'en classement tactile. Les semi-variogrammes ont montré que cette surface est très texturée à échelle intermédiaire (une centaine de pixels). La couleur de cette plaque est macroscopiquement isotrope et aléatoire « à grande échelle » mais avec des objets grands, celle-ci est donc présupposée plus rugueuse. Ce qui veut dire qu'ici, on raisonne en termes de granularité.

Ces résultats nous permettent de déduire les deux conclusions suivantes :

- Dans le cas des surfaces présentant une texture linéaire, une plaque est supposée rugueuse si elle présente des couleurs contrastées car on voit mieux la structure linéaire.
- Dans le cas des surfaces présentant une texture aléatoire, une plaque est supposée rugueuse si elle présente une taille de particules plus grande.

Conclusion

Cette étude, pionnière au laboratoire, est un travail d'exploration des implications sensorielles (tactiles et visuelles) de la rugosité du bois de pin maritime et de ses dérivés.

Les objectifs fixés en introduction portaient principalement sur l'incidence des propriétés topographiques de surface des matériaux dérivés du bois sur les sensations de rugosité au toucher et l'influence de la vision sur les sensations de rugosité évoquées lors du toucher.

Pour atteindre ces objectifs, l'étude a été scindée en quatre parties :

La première partie concernant la synthèse bibliographique nous a permis de faire un état des connaissances sur la métrologie de la rugosité de surface, sur les perceptions tactiles et visuelles et sur les diverses tentatives de corrélation des mesures sensorielles avec les mesures instrumentales.

Dans une seconde partie, nous nous sommes attachés à présenter le travail d'usinage des échantillons, de mesure et d'expérimentation en laboratoire. Il s'agit du choix de huit matériaux dérivés du bois de pin maritime et du ponçage des plaques de bois et de MDF. Ensuite, les profils topographiques ont été acquis à l'aide d'un rugosimètre confocal et d'un rugosimètre laser, et les paramètres de rugosité mesurés. Une acquisition d'images a été réalisée avec le calcul et l'analyse des coordonnées colorimétriques de chaque pixel dans le plan (L, a, b). Des tests sensoriels avec un panel de sujets naïfs ont été mis en place.

Les résultats des caractérisations physiques de la rugosité et de la couleur des matériaux ont été présentés dans la troisième partie.

Une fois les résultats des tests sensoriels dépouillés (descriptions verbales des échantillons, classements sensoriels et épreuves hédoniques), une relation entre les paramètres instrumentaux et sensoriels a été proposée dans le dernier chapitre.

Plus précisément, nous proposons de dresser le bilan de l'étude bibliographique et des principaux résultats expérimentaux issus de ce travail de recherche, des intérêts pratiques qui en découlent et des perspectives qu'il est en mesure de susciter.

Etude bibliographique et résultats expérimentaux

∗ Etude bibliographique

Il en ressort que plusieurs paramètres de rugosité ont été définis toutefois on n'est pas encore arrivé à savoir lesquels caractérisent d'une manière globale la rugosité de surface. De plus, on n'arrive pas encore à déterminer quels paramètres ont un lien avec les perceptions sensorielles. On sait par contre que l'étude des paramètres 3D est plus intéressante que les paramètres 2D. Du point de vue de la sensibilité des doigts, la connaissance de la valeur du seuil de perception de la rugosité a permis de prendre en compte cette valeur lors du calcul des paramètres de rugosité. On sait aussi que la vision est une perception complémentaire du toucher, ainsi l'exploration de cette influence dans ce travail est intéressante.

∗ Caractérisation physique de la rugosité

Les résultats observés ici ont montré que le rugosimètre confocal s'avère être un instrument adapté à la mesure de la rugosité du bois et des composites à base de bois. Cependant, le temps de mesure nous semble trop long pour une application industrielle. En ce qui concerne les paramètres de rugosité, sur les 38 paramètres de rugosité calculés, seuls 13 sont indépendants au seuil de 1%. Les mesures ont montré que la taille des grains de ponçage (P60 à P320) a un effet significatif sur les paramètres de rugosité au seuil de 1%. En revanche, l'effet de l'ordre de ponçage (entraînant l'usure des bandes) n'est pas significatif sur les bois massifs.

∗ Caractérisation physique de l'aspect visuel

L'étude des semi-variogrammes est une approche intéressante pour décrire la texture couleur des matériaux bois et ses dérivés. L'analyse géostatistique est plus discriminante que les analyses spatiales. Les échantillons ont pu être classés par groupe de texture couleur et ceux qui se distinguent ont pu être identifiés. Les paramètres des semi-variogrammes sont bien caractéristiques de la structuration spatiale des composants de la couleur des échantillons. L'étude des semi-variogrammes des résidus est d'ailleurs plus intéressante que la courbe d'écart de couleur parce qu'elle est plus riche en informations en raison de la suppression des effets de dérive. Cette analyse permet de traduire en termes de valeur les informations sur la périodicité, l'anisotropie et la taille des structures. Mais la courbe d'écart de couleur donne des informations complémentaires sur la visibilité des textures.

∗ Caractérisation sensorielle de la rugosité de surface

A partir des résultats de la pré-étude consommateurs, les principales caractéristiques sensorielles des produits ont pu être dégagées par AFC. Les éprouvettes sont réparties dans un espace à deux dimensions dont le premier axe caractérise la rugosité et le second axe est relatif à la texture, que le terme *agréable* est souvent associé aux termes *lisse, glisse* et *doux*. Les bois et MDF poncés avec des papiers abrasifs P220 et P320, le papier décor et le MDF brut (sans ponçage) sont ceux perçus comme étant des surfaces lisses. La différence de texture au toucher des bois naturels (bois massif non poncé et bois rétifié) est perceptible par les sujets. Par ailleurs, les sujets semblent préférer les produits lisses aux rugueux. En revanche, à la vue, les textures couleur du bois naturel ou imitant le bois

sont plus appréciées. Il a été observée une variabilité des sensations, mais cette variabilité n'est pas due à une modification des états de surface. En effet, il a été prouvé que la surface n'a pas significativement été modifiée dans le temps et après le passage de chaque sujet.

Relation entre paramètres physiques et sensoriels

∗ Relations entre paramètres de rugosité et perception tactile

Les résultats ont montré que ce ne sont pas uniquement les amplitudes des altitudes topographiques qui sont perçues par l'homme au cours du toucher. L'analyse MDS a permis de souligner que les sujets ont aussi perçu d'autres phénomènes qu'ils tiennent en compte dans leur classement, comme la présence d'une direction privilégiée de la texture (isotropie de la surface) ou la présence d'ondulations sur la surface. En effet, seul le paramètre S_a est significativement corrélé avec le rang moyen tactile au seuil de 1% à la fois pour les MDF et les bois poncés. Pour les divers matériaux dérivés du bois, aucun paramètre de rugosité ne permet de prédire le rang moyen de classement tactile. Il apparaît donc clairement que le paramètre de rugosité S_a, qui est communément utilisé pour évaluer la rugosité du bois ne suffit pas, il doit être complété par des paramètres de texture spatiales : S_{al} et S_{ds} (qui expliquent la sensation tactile dans l'axe « rugueux/lisse »), S_{tr} (qui différencie les échantillons anisotropes de ceux qui sont isotropes au toucher). Il n'est pas nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres d'amplitude régulièrement utilisés comme S_z, S_t ou S_v car ils apportent des informations redondantes.

∗ Influence de la vision sur la perception tactile de la rugosité

Dans le cas des surfaces présentant une texture linéaire, une plaque est supposée rugueuse si elle présente des couleurs contrastées car on voit mieux la structure linéaire. Dans le cas des surfaces présentant une texture aléatoire, une plaque est supposée rugueuse si elle présente une taille de particules plus grande.

Perspectives

Les études que nous avons menées au cours de cette thèse nous ont permis d'améliorer notre connaissance sur ce que le doigt peut ressentir au cours de l'exploration de la rugosité de surface et l'influence de la vue sur la perception tactile de rugosité. Ce travail peut s'ouvrir vers une application industrielle comme une exploitation dans les entreprises d'ameublement où la perception des clients est primordiale. En ce sens que si on veut par exemple qu'une surface donne une impression de texture rugueuse, il est possible de privilégier des textures couleur contrastées ou avec une granulosité de plus grande taille.

Nous évoquons à présent un certain nombre de perspectives envisageables à court et à moyen termes concernant l'expérimentation ou la recherche de lien entre les résultats

sensoriels et instrumentaux.

∗ Perspectives sur l'expérimentation

Au départ, nous avons usiné 24 MDF poncés, 24 bois poncés, 8 divers matériaux dérivés du bois, et nous avons trouvé que l'effet de l'ordre de ponçage sur les paramètres de rugosité n'est pas significatif sur le bois. Nous avons ainsi décidé de faire un échantillonnage et de mener cette étude sur un total de 20 échantillons. Il serait intéressant de valider les observations de ce travail en étudiant plus d'échantillons avec des textures rugueuses et un aspect visuel encore plus variés. On pourrait ainsi prendre des échantillons supplémentaires appartenant aux deux groupes de texture couleur trouvés. De plus, il serait intéressant de prendre en compte, dans les explorations futures, des paramètres de vibration dans l'évaluation de la rugosité de surface.

Nous avons relevé les descripteurs que le toucher des matériaux évoque aux sujets. Nous nous sommes limités à l'analyse de leur fréquence. Si l'on souhaite investir plus profondément dans la détermination des descripteurs relatifs au toucher du bois, et notamment de relever les descripteurs pertinents, il serait envisageable de former un panel d'experts.

∗ Perspectives sur les liens entre les paramètres physiques et sensoriels

Dans les analyses de corrélation avec les dimensions de l'espace tactile MDS, nous avons tenu compte des paramètres de rugosité. Il est donc intéressant d'intégrer des paramètres de texture couleur dans le modèle afin de mieux expliquer les classements visio-tactiles. Cela suppose la mise en oeuvre d'une modélisation des semi-variogrammes expérimentaux des coordonnées colorimétriques et des courbes d'écart de couleur permettant la détermination des paramètres de texture couleur.

Un problématique a été relevé dans l'introduction qui concerne le fait que dans l'usinage du bois, l'estimation de la rugosité de surface est réalisée à travers une comparaison visio-tactile de la surface à analyser avec des étalons. Pour arriver à s'affranchir de la subjectivité de l'appréciation d'un opérateur, quelques études supplémentaires seraient requises. Les essais que nous avons mis en oeuvre ne nous ont malheureusement pas permis de faire une régression multiple entre les résultats sensoriels et les paramètres physiques en raison du nombre peu élevé d'échantillons dans chaque groupe de matériaux. Avec plus d'échantillons, une étude de la régression PLS (partial least square) nous semblerait intéressante afin de pouvoir prédire les résultats sensoriels par la combinaison des paramètres de rugosité et des paramètres de couleur.

Bibliographie

[1] E.J. Abbott and F.A. Firestone. Specifying surface quality. *Mechanical Engineering*, 55 :569–572, 1933.

[2] AFNOR. *Spécifications géométriques des produits. Etat de surface : méthode du profil, NF ISO 13565-1, E05-021.* AFNOR, 1997.

[3] AFNOR. *Référentiel de bonnes pratiques BP X10-040 Commission V09B : Caractérisation sensorielle des matériaux, Méthodologie générale, Recommandations méthodologiques pour l'analyse sensorielle de la matière première au produit fini*, 2003.

[4] AFNOR. *Référentiel des bonnes pratiques BP X10-041 Commission V09B : Méthodologie générale, Recommandations méthodologiques pour l'analyse sensorielle tactile de la matière première au produit fini*, 2004.

[5] M. Armstrong and J. Carignan. *Géostatistique linéaire, application au domaine minier.* La presse de l'Ecole des Mines, Paris, France, 1997.

[6] J.D. Bagot. *Information, Sensation et Perception.* Paris, 1999.

[7] S. Ballesteros, J.M. Reales, B. Garcia, and L. Ponce de Léon. Multidimensional scaling of surface textures explored by active touch and by vision and touch. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Materials and Sensations*, pages 11–17, Pau, France, October, 27-29 2004.

[8] J. Biggs and M.A. Srinivasan. Tangential versus normal displacements of skin : relative effectiveness for producing tactile sensations. In IEEE Computer Society, editor, *Proceedings of the 10th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 121–128, Orlando, FL, 2002.

[9] S.J. Biggs and M.A. Srinivasan. *Handbook of virtual environments*, chapter 5- Haptic intefaces, pages 93–115. London, k. stanney, lawrence earlbaum edition, 2002.

[10] L. Blunt and X. Jiang. *Advanced techniques for assessment sufrace topography. Development of a basis for 3D surface texture standards SURFSTAND.* Selwood Printing, London and Sterling, 2003.

[11] G. Boscaino and F.G. Pratico. Classification et inventaire des indicateurs de la texture superficielle des revêtements des chaussées. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 134 :17–34, 2001.

[12] P. Bouchareine. Métrologie des surfaces. *Techniques de l'Ingénieur*, R1390, 1999.

[13] J. Boulanger. Tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de surface. *Techniques de l'Ingénieur*, B7010 :1–25, 1991.

[14] U. Buehlmann, D. Saloni, and R.L. Lemaster. Wood fiber plastic composites : Machining and surface quality. In *Proceedings of the 15th International Wood Machining Seminar*, Anaheim, CA., 30 july-01 august 2001.

[15] M-A. Bueno, B. Lamy, and M. Renner. Effect of grain size and abrasion duration on the state of textile fabric surfaces. *Wear*, 23 :448–457, 2002.

[16] M. Calonnier. Toucher pour l'industrie textile. In *Tribologie du toucher*, Paris, 09 octobre 2003. ECRIN.

[17] A.L. Carrano, J.B. Taylor, and R.L. Lemaster. Parametric characterization of peripheral sanding. *Forest Products Journal*, 52(9) :44–50, 2002.

[18] S.S Chen and Y.S. Huang. Studies on belt sanding of wood. *Bulletin of Taiwan Forestry Research Institute*, 3(3) :147–160, 1988.

[19] A. Chrisment, P. Durchon, P. Lanthony, and I. Tavernier. *Communiquer par la couleur*. Paris, 1994.

[20] O. Colot, R. Devinoy, A. Sombo, and D. De Brucq. A colour image processing method for mellanoma detection. *Lecture Notes in Computer Science*, 1496 :562–571, 1998.

[21] Adour Compétitivité. Bois-ameublement : un secteur discret qui réalise de belles performances. *La lettre des PMI*, 69, 2001.

[22] E. Costell. A comparison of sensory methods in quality control. *Food Quality and Preference*, 13 :341–353, 2002.

[23] J.P. Costes. *Approche de l'usinage à grande vitessse du bois : application au défonçage*. PhD thesis, Université de Toulouse III, 2001.

[24] J.P. Costes and P. Larricq. Towards high cutting speed in wood milling. *Annales des Sciences Forestières*, 59 :857–865, 2002.

[25] S. Crochemore, D. Nesa, and S. Couderc. Analyse sensorielle des matériaux d'habitacle automobile : toucher/vision. *Techniques de l'ingénieur*, AM3292 :1–16, 2004.

[26] S. Crochemore, D. Nesa, and S. Couderc. Méthodes d'analyse sensorielle des matériaux plastiques. *Techniques de l'Ingénieur*, AM3290 :1–6, 2004.

[27] S. Crochemore and C. Vergeneault. A new reference frame for tactile perceptions : Sensotact. In *5th Rose Mary Pangborn*, Boston MA, USA, july 2003.

[28] P. Dagnelie. *Analyse statistique à plusieurs variables*. Gembloux, Belgique, 1986.

[29] K. Dandekar, B.I. Raju, and M.A. Srinivasan. 3-d finite-element models of human and monkey fingertips to investigate the mechanics of tactile sense. *Journal of Biomechanical Engineering,*, 125 :682–691, 2003.

[30] R. Daniel. *Neurophysiologie*. Dunod, 2000.

[31] M. David. *Developments in Geomathematics 2 : Geostatistical ore reserve estimation*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1977.

[32] D. Desbois. Une introduction au positionnement multidimensionnel. *Revue MODULAD*, 32 :1–28, 2005.

[33] W.P. Dong, P.J. Sullivan, and K.J. Stout. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography i : Some inherent properties of parameter variation. *Wear*, 159(2) :161–171, 1992.

[34] W.P. Dong, P.J. Sullivan, and K.J. Stout. Comprehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography ii : Statistical properties of parameter variation. *Wear*, 167(1) :9–21, 1993.

[35] W.P. Dong, P.J. Sullivan, and K.J. Stout. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography : Iii : Parameters for characterising amplitude and some functional properties. *Wear*, 178(1-2) :29–43, 1994.

[36] W.P. Dong, P.J. Sullivan, and K.J. Stout. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography : Iv : Parameters for characterising spatial and hybrid properties. *Wear*, 178(1-2) :45–60, 1994.

[37] Y. Dordet. *La colorimétrie : principes et applications.* Paris, 1990.

[38] J-L. Douzet. Abrasifs. *Technique de l'Ingénieur*, B7 050 :1–33, 1990.

[39] O. Eterradossi. From "ccm" to "tcm" : is there something to learn from "computer aided colour matching" to perform "computer aided touch matching" ? In *Proceedings of the 1st International Workshop on Materials and Sensations*, pages 129–135, Pau, France, October, 27-29 2004.

[40] F. Eyma. *Caractérisation des efforts de coupe de différentes essences de bois à l'aide de leurs paramètres mécaniques.* PhD thesis, Université Henri Poincaré, Nancy 1, Juillet 2002.

[41] T.D. Faust and T.R. James. Characterizing the roughness of southern pine veneer surface. *Forest Product Journal*, 36 :75–81, 11/12.

[42] P. Faye, D. Brémaud, M.D. Daubin, P. Courcoux, A. Giboreau, and H. Nicod. Perceptive free sorting and verbalization tasks with naive subjects : an alternative to descriptive mappings. *Food Quality and Preference*, 15 :781–791, 2004.

[43] S. Fontaine, M-A. Bueno, M. Renner, and N. Nicoletti. Méthode de mesure d'état de surface par analyse vibratoire du frotteur d'un tribomètre. *Mécanique et Industries*, 4 :421–428, 2003.

[44] Y. Fuji, M. Yoshizane, and S. Okumara. Evaluation of surface roughness by various parameters i. relationships between several roughness parameters and tactile roughness. *Mokuzai Gakkaishi*, 43(7) :574–579, 1997.

[45] K. Fujii, S. Sugi, and Y. Ando. Textural properties corresponding to visual perception based on the correlation mechanism in the visual system. *Psychological Research*, 67 :197–208, 2003.

[46] Y. Fujiwara, Y. Fujii, and S. Okumura. Effect of removal of deep valleys on the evaluation of machined surfaces of wood. *Forest Products Journal*, 53(2) :58–62, 2003.

[47] Y. Fujiwara, Y. Fujii, Y. Sawada, and S. Okumara. Development of a parameter to reflect the roughness of a wood surface that corresponds to tactile roughness, a novel filter to exclude local valley effects. *Holz als Roh- und Werstoff*, 59 :351–355, 2001.

[48] Y. Fujiwara, K Mori, Y. Fujii, Y. Sawada, and S. Okumara. Measurement of surface roughness of coated wood by laser scanning. In *Proceeding of the 15th International Wood Machining Seminar*, pages 563–568, Los Angeles, California, 30 juillet - 01 août 2001.

[49] C. Galley, F. Mothe, and S. Boury. Recherche de critères de rugosité adaptés à la qualification de chants usinés de lvl. *Annales des Sciences Forestières*, 55 :599–612, 1998.

[50] J. Grall and Hily C. *Traitement des données stationnelles (faune).* REBENT, Décembre 2003.

[51] S. Guest, C. Catmur, D. Lloyd, and C. Spence. Audiotactile interactions in roughness perception. *Experimental Brain Research*, 146 :161–171, 2002.

[52] S. Guest and C. Spence. Tactile dominance in speeded discrimination of textures. *Experimental Brain Research.*

[53] S. Guest and C. Spence. What role does multisensory integration play in visuotactile perception of texture. *International Journal of Psychophysiology*, 50 :63–80, 2003.

[54] A. Hanbury and F. Gardieux. A quantitative description of wood texture. In *Proceedings of the International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV'2001)*, pages 451–460, 2001.

[55] Y. Hatwell. Neurophysiologie et psychologie cognitive du toucher. In *4ème rencontre internationale Science-Industrie, Bio-sensoriel aujourd'hui et demain*, Lyon, Décembre 08 2000.

[56] M.A. Heller and W. Schiff. *Psychology of touch.* Lawrence Erlbaum Associates, Hillstale, New Jersey, 1991.

[57] S. Hiziroglu. Surface roughness analysis of wood composites : a stylus method. *Forest Products Journal*, 46(7/8) :67–72, 1996.

[58] M. Hollins, S.J. Bensmaïa, and E.A. Roy. Vibrotaction and texture perception. *Behavioural Brain Research*, 135 :51–56, 2002.

[59] M. Hollins, R. Faldowski, S. Rao, and F. Young. Perceptual dimensions of tactile surface texture : A multidimensional scaling analysis. *Perception and Psychophysics*, 54(6) :697–705, 1993.

[60] M. Hollins and S.R. Risner. Evidence for the duplex theory of tactile texture perception. *Perception and Psychophysics*, 62(4) :695–705, 2000.

[61] http ://www.predev.com. Surface métrology guide. Guide en ligne, 2005.

[62] R. Ihaka and R. Gentleman. R : a language for data analysis and graphics. *Journal of computational and graphical statistics*, 5 :299–314, 1996.

[63] R.S. Johansson. Tactile sensibility in the human hand : receptive field characteristics of mechanoreceptive units in the glabrous skin area. *Journal of Physiology*, 281 :101–123, 1978.

[64] R.S. Johansson and A.B. Vallbo. Spatial properties of the population of mechanoreceptive units in the glabrous skin of the human hand. *Brain Research*, 184 :353–366, 1980.

[65] C.S. Joseph. L'optique accélère le contrôle d'états de surface. *Mesures*, 719 :85–89, 1999.

[66] C.S. Joseph. L'optique domine les mesures de cotes sans contacts. *Mesures*, 719 :89–90, 1999.

[67] A. Journel. *Exploitation des mines : guide pratique de géostatistique.* Alès, France, 1975.

[68] M.G. Kendall. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30 :81–93, 1938.

[69] A. Khazaeian, P. Larricq, and J-N. Felices. Deliberation on measurement conditions of surface quality of machined wood using laser optical profilometry. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Wood Machining*, pages 351–358, Vienne, Autriche, 5-7 Juillet 2004. BOKU.

[70] D. Lafon, A. Jonckheere, and J.F. Tranchant. Colouring effects of cosmetics : a metrological approach. In *Proceedings of the 1st international workshop on materials and sensations*, Pau, France, 27-29 october 2004.

[71] D. Lafon and T. Ramananantoandro. Color images. *Image Analysis and Stereology*, 21(1) :61–74, 2002.

[72] P. Larricq, J.P. Costes, P. Le Breton, and G. Cassou. Quality surface characteristics in high speed machining. In *Proceedings of the 1st International Wood Machining Symposium*, pages 203–210, Vienna, Austria, 2000. S. E. Stanzl-Tschegg and A. Reiterer.

[73] D.J. Lavery, D. Mc Larnon, J.M. Taylor, S. Moloney, and A. Atanackovic. Parameters affecting the surface finish of planed sitka spruce. *Forest Products Journal*, 45(4) :45–50, 1995.

[74] Lazorthes. *L'ouvrage des sens*. Paris, 1986.

[75] J.M. Leban and P. Triboulot. *Le bois : matériau d'ingéniérie*, chapter Défauts de forme et état de surface, pages 333–362. ARBOLOR, 1994.

[76] S.J. Lederman. Tactile roughness of grooved surface : the touching process and effects of macro- and microsurface structure. *Perception and Psychophysics*, 16(2) :385–395, 1974.

[77] R.L Lemaster and J.B. Taylor. High speed surface assessment of wood and wood-based composites. In *Proceedings of the14th International Wood Machining Seminar*, Epinal, France, September 12-19 1999.

[78] Liebetrau and M. Albert. *Measures of association*. Quantitative applications in the social sciences. No. 32. Sage Publications, 1983.

[79] I.A.S Lundberg and B. Porankiewicz. Studies of non-contact methods for roughness measurements on wood surfaces. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 53 :309–314, 1995.

[80] Mediaforest. http ://www.mediaforest.net, 2004.

[81] C. Meynard. Analyse sensorielle dans l'industrie pétrochimique-pourquoi faire ? In *Elastomères et polymères : perception sensorielle*, Paris, 09-10 mars 2004. SAGE.

[82] M. Mokhtari and A. Mesbah. *Apprendre et maîtriser MATLAB versionn4 et 5 et SIMULINK*. Berlin, Allemagne, 1997.

[83] F. Mothe. Essai et comparaison de trois méthodes de classement de surface de bois massif pour leur rugosité : méthodes pneumatique et sensorielles. *Annales des Sciences Forestières*, 42(4) :435–452, 1985.

[84] F. Mothe. Essais d'utilisation d'un rugosimètre à palpeur pour qualifier des surfaces de bois. *Annales des Sciences Forestières*, 44(4) :473–488, 1987.

[85] B. N'Dri-Stempfer, D. Oulahna, and D. Lafon. Impact of the granulation process on color texture of compacts. *Part. Part. Syst. Charact.*, 21 :24–30, 2004.

[86] D. Nesa, S. Crochemore, C. Vergneault, J. Blouet, and P. Seige. Analyse sensorielle, le toucher du doigt. In *Tribologie du toucher*, Paris, 09 octobre 2003. ECRIN.

[87] T. Nishimura and M.P. Ansell. Fast fourier transform and filtered image analyses of fiber orientation in osb. *Wood Science and Technology*, 36 :287–307, 2002.

[88] OTUA. La rugosité de surface des produits en acier : comment la caractériser. *Le Courrier Technique*, 63 :1–12.

[89] E.J. Pebesma. Multivariate geostatistics in s : the gstat package. *Computers and geosciences*, 30 :683–691, 2004.

[90] D. Picard, C. Dacremont, D. Valentin, and A. Giboreau. Perceptual dimensions of tactile textures. *Acta Physiologica*, 114 :165–184, 2003.

[91] F. Plassat. Mise en œuvre et usinage du bois. *Techniques de l'Ingénieur*, B7304 :1–25, 1994.

[92] G. Raffy, P. Marty-Mahé, M. Ollivier, and P. Marchal. Real-time detection of appearance defects of turkey carcasses by color histogram analysis. In *SPIE Machine Vision Application in Industrial Inspection VII*, page 3652, San Jose, USA, 1999.

[93] J. Raja, B. Muralikrishnan, and S. Fu. Recent advances in separation of roughness, waviness and form. *Journal of the International Societies of Precision Engineering and Nanotechnology*, 26 :222–235, 2002.

[94] B.I. Raju and M.A. Srinivasan. Encoding and decoding of shape in tactile sensing. Rle technical report 630, The Research Laboratory of Electronics at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1999.

[95] T. Ramananantoandro, M. Bacou, and P. Larricq. Understanding the influence of wood material properties on the 3d microtopography measurement behaviour of two optical instruments. In *Congrès international de métrologie*, Lyon, France, 20-24 juin 2005 2005.

[96] A. Roorda and D.R. Williams. The arrangement of the three cone classes in the living human eye. *Nature*, 397 :520–522, 1999.

[97] T. Sadoh, M. Takeuchi, and K. Nakato. Relationships between sensory and physical evaluations of wood surface roughness. *Bulletin of the Kyoto University Forests*, 49 :138–144, October 1977.

[98] J. Sandak, C. Tanaka, and T. Ohtani. Evaluation of surface smoothness by a laser displacement sensor ii : comparison of lateral effect photodiode and multielement array. *Journal of Wood Science*, 50(1) :22–27, 2004.

[99] G. Saporta. *Probabilités analyse des données statistiques.* Paris, 1990.

[100] F. Sauvageot and F. Depledt. Evaluation sensorielle des produits alimentaires. *Techniques de l'Ingénieur*, F4000 :1–24, 2002.

[101] R. Sève. *Physique de la couleur, de l'apparence colorée à la technique colorimétrique.* Paris, 1996.

[102] I. Soufflet, M. Calonnier, and C. Dacremont. How to choose relevant attributes for describing the "handle" of fabrics ? : a focus on grainy, harsh, rough and raspy perceptions. In 2PSM, editor, *1st International Workshop on Materials and Sensations*, Pau, 27-29 octobre 2004.

[103] M.A. Srinivasan. Communication biophysics. *Laboratory for human and machine haptics at the Massachusetts Institute of Technology*, 2002 :RLE Technical report 145, Cambridge, Massachusetts.

[104] M.A. Srinivasan. *Virtual Reality : Scientific and Technical Challenges*, chapter 4-Haptic interfaces. National Academy Press, 1995.

[105] M.A. Srinivasan and R.H. Lamotte. Tactual discrimination of softness. *Journal of Neurophysiology*, 73(1) :88–101, 1995.

[106] SSHA. *Evaluation sensorielle, manuel méthodologique.* Paris, technique et documentation lavoisier edition, 1998.

[107] Inc. Statsoft. *Statistica, guide de l'utilisateur.* Tulsa, Okla, 1997.

[108] J.B. Taylor, A.L. Carrano, and R.L. Lemaster. Quantification of process parameters in a wood sanding operation. *Forest Products Journal*, 49(5) :41–46, 1999.

[109] M.M. Taylor and S.J. Lederman. Tactile roughness of grooved surface : a model and effect of friction. *Perception and Psychophysics*, 17 :23–36, 1975.

[110] P. Triboulot. Réflexions sur les surfaces et mesure des états de surface du bois. *Annales des Sciences Forestières*, 41(3) :335–354, 1984.

[111] M-C. Trouy-Triboulot and P. Triboulot. Matériau bois : Structure et caractéristiques. *Techniques de l'Ingénieur*, C925 :1–26, 2001.

[112] A.B. Vallbo and R.S. Johansson. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiol*, 3 :3–14, 1984.

[113] A. Yasuda, T. Sadoh, and K. Nakato. Visual and tactile roughness of hardwood surfaces relating to physical roughness. *Mokuzai Gakkaishi*, 29(11) :731–737., 1983.

[114] G. Zambelli and L. Vincent. *Matériaux et contacts.* Lausanne, 1998.

[115] L. Zuppiroli and M.N. Bussac. *Traité des couleurs.* Lausanne, Suisse, 2001.

Annexes

Annexe A

Fonction d'autocorrélation

Si S_{sk} et S_{ku} décrivent par des valeurs numériques l'étalement vertical d'un profil de surface. La fonction d'autocorrélation caractérise l'étalement horizontal d'un profil. Il permet en outre d'exprimer la dépendance ou la liaison pouvant exister entre l'altitude de deux points quelconques du profil en fonction de la distance β les séparant, donc de détecter les éventuelles périodicités.

$$R_z(\beta) = \frac{1}{\sigma^2(L-\beta)} \int_{L-\beta}^{0} Z(x).Z(x+\beta)dx \tag{A.1}$$

- si le profil est purement aléatoire, cette probabilité est nulle pour toutes les valeurs de β excepté pour $\beta = 0$,
- si le profil est purement périodique, cette probabilité est égale à 1 pour les valeurs de β égales à un multiple entier de la périodicité,
- un profil aléatoire pur présente une fonction d'autocorrélation exponentielle.

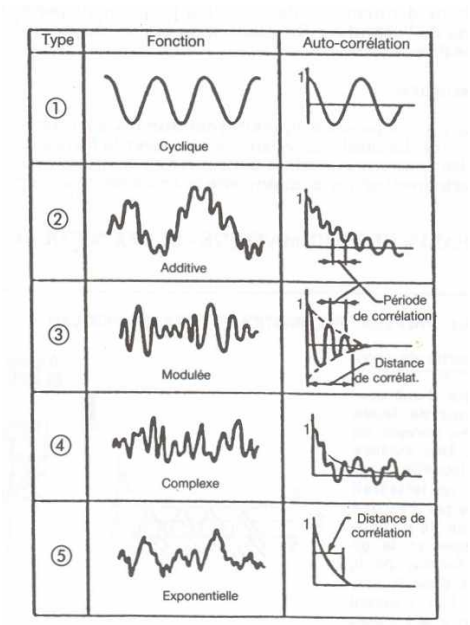


Fig. A.1 – Classification des surfaces selon la fonction d'autocorrélation

Annexe B

Présentation des panneaux étudiés

Extrait du fiche technique réalisée d'après le guide des produits et composants gros oeuvre bois (Irabois, CTBA, 2002)

Panneau de lamelles minces longues et orientées : OSB (Oriented Strand Board)

Définition :

Panneau dit de « process » constitué de grandes lamelles orientées et liées entre elles par un collage organique. L'appellation OSB est l'acronyme de sa dénomination anglo-saxonne (Oriented Strand Board). Ce produit est à différencier du WAFER BOARD qui est aussi à grandes lamelles mais non orientées ce qui conduit à des propriétés physiques et mécaniques similaires dans les deux directions du plan.

Fabrication :

Etapes de fabrication :
- « coupe » du bois en lamelles longues de 5 - 6 /10 mm d'épaisseur
- stockage des lamelles
- séchage des lamelles
- triage des lamelles (élimination des petites lamelles)
- stockage couches extérieures - stockage souche intérieure
- encollage couches extérieures (MUF ou phénolique) - encollage couche intérieure (MUF, PMDI ou phénolique)

- composition des couches extérieure - intérieure - extérieure
- conformation
- pressage
- délignage
- ponçage

Classification :

Quatre types de produits peuvent se rencontrer :
- OSB 1 : panneau pour usage général en milieu sec
- OSB 2 : panneau travaillant utilisé en milieu sec
- OSB 3 : panneau travaillant utilisé en milieu humide
- OSB 4 : panneau travaillant sous contrainte élevée en milieu humide

Par rapport aux autres panneaux dits de « process », l'OSB présente des propriétés dans le plan qui sont très nettement différenciées selon la direction du plan. Il en est notamment ainsi de la flexion et des variations dimensionnelles dans le plan. Le rapport d'anisotropie est de l'ordre de 2.

Panneaux de fibres

Définition :

Panneau dit de « process », constitué de fibres de bois, d'une épaisseur supérieure ou égale à 1,5mm, obtenu à partir de fibres lignocellulosiques avec application de chaleur et/ou de pression. La cohésion provient :
- soit du feutrage de ces fibres et de leurs propriétés adhésives intrinsèques
- soit de l'addition aux fibres d'un liant synthétique.

Panneaux MDF :

Les panneaux dits « Panneaux de fibres à moyenne densité » (MDF) sont fabriqués à l'aide d'un liant synthétique avec l'action de la chaleur et de la pression. On distingue les Panneaux milieu sec et milieu humide, Panneau à usage général, et à usage travaillant.

Fabrication :

Etapes de fabrication :
- l'écorçage des billes,
- le déchiquetage pour les transformer en plaquettes,
- le triage et le dépoussiérage des plaquettes,
- le défibrage : les défibreurs fonctionnent sur la combinaison d'une action thermique, qui ramollit le bois et d'une action mécanique. Les fibres ramollies à la vapeur à 180 °C sont laminées entre des disques qui les désolidarisent.
- l'essorage Pour les panneaux isolants, la fabrication s'achève ici, sans pressage, après un séchage à 8% d'humidité.
- le pressage.
- la stabilisation.

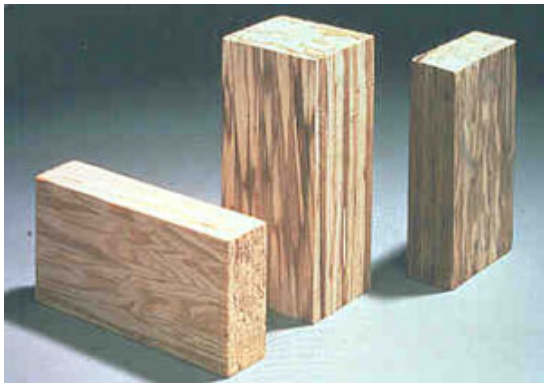
Tous ces panneaux sont gaufrés sur une face, car un grillage spécial est interposé dans la presse pour permettre à l'eau de s'évacuer

Panneaux procédé à sec :
- le déchiquetage pour réaliser les plaquettes,
- le triage et le dépoussiérage des plaquettes (éventuellement lavage),
- le défibrage par traitement à la vapeur,
- l'encollage des fibres
- le séchage
- la conformation du mat
- le pressage
- la phase de refroidissement -stabilisation
- Mise au format.

Classification :

Les panneaux de fibres sont classés, selon la norme EN 316, selon leur procédé de fabrication comme suit :
- Panneaux de fibres obtenus par procédé humide : on distingue plusieurs types selon leur masse volumique :
- Panneaux isolants (masse volumique $\leq$ 400kg/m3). Ces panneaux possèdent des propriétés de base thermique et phonique.
- Panneaux mi-durs (masse volumique $\succ$ 400 et $\leq$ 900 kg/m3). On distingue les panneaux mi-durs de faible masse volumique (400 kg/m3 à 560 kg/m3), et les panneaux mi-durs de forte masse volumique (560 à 900 kg/m3)
- Panneaux durs (masse volumique : 900 kg/m3)
- Panneaux de fibres obtenus par procédé à sec : ces panneaux ont une masse volumique : 600 kg/m3.

Bois reconstitués



Définition

On considère ici deux produits relativement proches obtenus par recollage de placages, désignés par leur sigle nord-américain, en raison de leur origine : Les PSL (Parallel Strand lumber) : Eléments longilignes constituant, directement ou par refente, une gamme de dimensions de poutres de structures. Ils sont constitués de bandes de placages étroites et longues (chutes de placages de 3mm par 2400mm) disposées à fils parallèles, encollées et pressées en continu (Exemple : le « Parallam »).

Fabrication

La fabrication de ces produits est le fait de grandes unités faisant appel à une machinerie spécifique lourde et complexe qui les apparente à la production des panneaux de process et correspond à des investissements considérables et à de longues recherches et développements initiaux.

Constitution :

Matériaux à vocation essentiellement structurelle, ils se présentent, pour les PSL, en une gamme de poutres préfabriquées de fortes sections, pour les LSL en plateaux larges dans une gamme d'épaisseur allant de 30 à 140mm (par exemple). Ces matériaux, peu dispersifs par nature et maîtrisés par leur processus de fabrication, présentent des caractéristiques mécaniques élevées en matière de contraintes de travail axiales : de l'ordre du double d'un bois massif. Utilisation : Les PSL sont utilisés comme poutres, tels qu'ils se présentent (hormis la mise à longueur et les usinages d'assemblages éventuels), tandis que les LSL sont surtout employés comme panneaux autoporteurs à plat. Dimensionnement : Leur calcul relève des règles générales relatives aux ouvrages en bois concernés, mais chaque production doit être justifiée en fonction des paramètres mécaniques qui lui sont propres.

Contreplaqués

Définition :

Panneau, plat ou moulé, composé d'un empilage de plis de bois seuls ou associés à une âme (de panneau latté ou lamellé) ou à des feuilles de matériaux non dérivés du bois. La cohésion entre les couches de l'empilage est assurée par un liant organique. Fabrication :

Etapes de fabrication :

- Etuvages des grumes
- Débit des grumes (déterminant pour la qualité des placages, parement ou âme)
- séchage des placages (souvent ligne âme et ligne parement)
- massicotage et pré - composition des plis
- composition
- pré - pressage (à 20 °C)
- pressage avec chauffage à 120 -130 °C (1 min/mm)
- calibrage (mise à format)
- ponçage éventuel
- stockage

Placages : Pour l'usage courant, les placages sont obtenus par déroulage des grumes (débit sur dosse pure) ; pour les panneaux contreplaqués destinés à recevoir une finition, les placages des couches de surfaces sont généralement obtenus par tranchage. Les épaisseurs courantes de placage vont de 10 à 30/10 mm. Un traitement éventuel des placages (ignifugation, préservation par biocide) peut être introduit avant la pré-composition.

Classification :

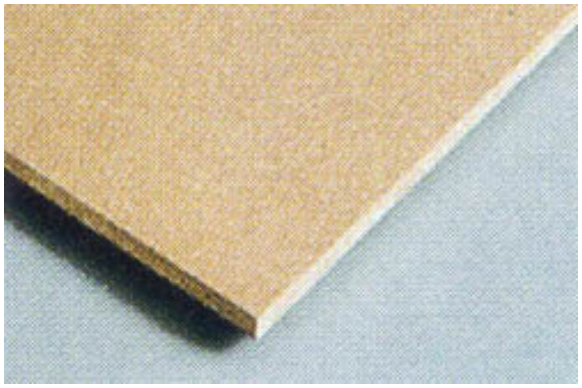
Le panneau de contreplaqué le plus courant présente :
- une composition symétrique dans l'épaisseur
- les plis contigus sont croisés à 90° entre eux

- les plis sont constitués de placages jointés sur leur rives, plusieurs peuvent être empilés fil sur fil pour former une couche.

Si les couches fil sur fil dominent, on obtient un panneau LAMIBOIS (LVL dans la terminologie anglo-saxonne) Collage : La qualité du collage est fonction de la classe de risque biologique (NF EN 335-3). On distingue ainsi un collage pour :

- la classe de risques d'attaques biologiques 1
- la classe de risques d'attaques biologiques 2
- la classe de risques d'attaques biologiques 3

Panneaux de particules



Définition :

Panneau dit de « process » constitué de particules de bois (grands copeaux, particules, copeaux de rabotage, sciures) et/ou autre matériau lignocellulosique en formes de particules (amas de chanvre, amas de lin, fragments de bagasse) avec addition d'un liant organique ou d'un liant minéral. Fabrication :

Etapes de fabrication :

- Approvisionnements : Rondins et découpe, plaquettes et découpe, « copeaux de rabotage » et triage, et sciures.
- Re-broyage
- Séchage
- Triage
- Encollage (Colles Urée Formol ou Mélamine Urée Formol)
- Conformation des panneaux
- Pressage des panneaux (Presse continu ou presse multi-étages)
- Tronçonnage
- Refroidissement.
- Ponçage

Classification :

Les panneaux de particules peuvent être classés selon différents critères. Une classification essentielle est la classification selon l'usage des panneaux de particules à liants organiques, présentée dans la norme EN 309. Quatre types de produits peuvent se rencontrer :

- Panneaux pour usage général
- Panneaux pour aménagement intérieur (incluant l'ameublement) en milieu sec.
- Panneaux travaillant pour la construction : en milieux secs et en milieux humides
- Panneaux spéciaux : Panneaux hautement travaillant, Panneaux avec résistance améliorée vis à vis des attaques biologiques, Panneaux Ignifugés, Panneaux pour isolation acoustique
- Autres.

La norme NF EN 309 recommande un code de couleur à apposer sur les panneaux afin d'identifier la qualité du panneau :

- première couleur : blanc : usage général jaune : usage travaillant
- deuxième couleur : bleu : milieu sec vert : milieu humide

Papier décor

Reproduisant des photographies à échelle 1/1 de bois véritable, et mis en oeuvre par des techniques de grande précision, eu égard à leur fragilité, les papiers décors sont très utilisés pour le revêtement de meubles industriels de gamme économique. Les grammages de papier oscillent entre 30 et 80 g/m^2. Les performances à la rayure et à l'abrasion sont en général faibles, mais peuvent être considérablement améliorées par un vernis (polyuréthanne par exemple).

L'application, sur panneau de particules à granulométrie de surface très fine, de surcroît homogène dans l'épaisseur pour permettre le revêtement des chants par *softforming* de bandes très minces coordonnées, est réalisable soit par pressage à chaud en presse à plat, soit par collage-calandrage à chaud, à grande vitesse. La colle est exclusivement de l'urée-formol.

L'usinage demande les mêmes outils et les mêmes soins que ceux nécessités par le panneau surfacé mélaminé.

Bois rétifié

La rétification consiste en la pyrolyse ou cuisson du bois à une température comprise entre 200 et 250°C dans un milieu confiné et en l'absence d'oxygène pour éviter toute combustion. A ces températures, les hémicelluloses qui sont des polysaccharides hydrophiles se dissocient et disparaissent sous forme gazeuse et, par thermo-condensation, elles viennent se fixer sur la lignine avec laquelle elles forment de nouvelles liaisons moléculaires. La température doit être rigoureusement respectée pour ne pas dégrader les propriétés mécaniques du bois. On obtient par ailleurs des sous-produits, tels que l'acide acétique,

le furfural, le méthanol et le CO_2. Il s'agit d'un traitement en profondeur, irréversible qui conduit à la modification même de la matière. Aucune substance chimique n'est rajoutée, pour une amélioration des propriétés physiques à la clé : stabilité dimensionnelle, dureté de surface, couleur dans la masse homogène.

Avantage : le bois rétifié peut se substituer à certains bois exotiques (red cedar, tek...), sans en avoir les inconvénients pour un coût moins élevé. Le Bois rétifié peut être utilisé dans l'ameublement, les parements extérieurs, les écrans acoustiques, les parquets.

Annexe C

Définitions des paramètres de rugosité étudiés, selon l'aide du logiciel Mountains Map

Les 13 paramètres inclus dans le rapport EUR 15 178 [10] sont définis dans le paragraphe 1.1.2.1.5 et ne seront plus présentés ici.

1. Les paramètres d'amplitude

S_a : moyenne arithmétique des écarts à la moyenne

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{N} \sum_{i=0}^{M} |\eta(x_i, y_j)| \tag{C.1}$$

Ce paramètre est inclus dans le rapport EUR 15178 EN.

S_t : hauteur totale de la surface Hauteur entre le pic le plus haut et le creux le plus profond. Ce paramètre est fourni par symétrie avec le cas 2D.

S_p : hauteur de la plus haute saillie de la surface Hauteur entre le pic le plus haut et le plan moyen. Ce paramètre est fourni par symétrie avec le cas 2D.

S_v : profondeur de la plus profonde vallée de la surface Profondeur entre le plan moyen et la vallée la plus profonde. Ce paramètre est fourni par symétrie avec le cas 2D.

2. Paramètres de surface et volume

STp : taux de portance à une profondeur donnée Ce paramètre doit être configuré avec un seuil et une référence. Par exemple : 3 μm sous le plus haut pic, 1 μm au dessus de la moyenne, 1 μm au dessus d'un seuil fixé à 20 % de taux de portance.

SHTp : hauteur de taux de portance C'est la hauteur séparant deux taux de portance. Ce paramètre doit être configuré avec deux seuils entrés en %.

Smvr : volume moyen de vide C'est le volume total de vide de la surface, obtenu en mesurant l'espace situé entre les points de la surface et un plan fictif horizontal situé à l'altitude maximale de la surface.

Smmr : volume moyen de matière C'est le volume total de matière de la surface, obtenu en mesurant l'espace situé entre un plan fictif horizontal situé à l'altitude minimale et les

points de la surface.

3. Paramètres spatiaux

SPc : densité de pics entre deux niveaux c_1 et c_2 Les seuils c_1 et c_2 sont exprimés par rapport au plan moyen 0. c_1 doit être inférieur à c_2. Un pic est compté s'il dépasse c_2 et redescend en dessous de c_1. Le résultat est exprimé en $pics/mm^2$.

S_{al} : longueur de la plus rapide décroissance à 0,2 de l'autocorrélation Ce paramètre exprime le contenu en longueurs d'onde de la surface. Une valeur élevée indique que la surface comporte essentiellement des grandes longueurs d'onde (basses fréquences).

4. Paramètres hybrides

S_{fd} : dimension fractale de la surface Ce paramètre quantifie la complexité de la surface en faisant appel à sa dimension fractionnaire, définie par la théorie fractale. La dimension d'une surface varie entre 2 (surface plate) et 3 (surface très tourmentée). Sur certaines surfaces géométriques, la dimension fractale n'a pas d'objet et la valeur du paramètre ne doit pas être prise en compte.

5. Paramètres fonctionnels

Ces paramètres sont calculés à partir de la courbe d'Abbott Firestone.

S_k : rugosité du noyau (extension du paramètre 2D R_k défini dans la figure C.1)

S_{pk} : rugosité des pics (extension du paramètre 2D R_{pk} défini dans la figure C.1)

S_{vk} : rugosité des vallées (extension du paramètre 2D R_{vk} défini dans la figure C.1)

S_{r1} : surface portante supérieure (extension du paramètre 2D MR1 défini dans la figure C.1)

S_{r2} : surface portante inférieure (extension du paramètre 2D MR2 défini dans la figure C.1)

Les paramètres suivants sont définis dans le rapport du programme européen SURFSTAND mené sous la direction de l'université de Huddersfield.

Vm(h) : volume de matière à une profondeur h

Vv(h) : volume de vide à une profondeur h

Vmp : volume de matière des pics

Vmc : volume de matière du coeur

Vvc : volume de vide du coeur

Vvv : volume de vide des vallées

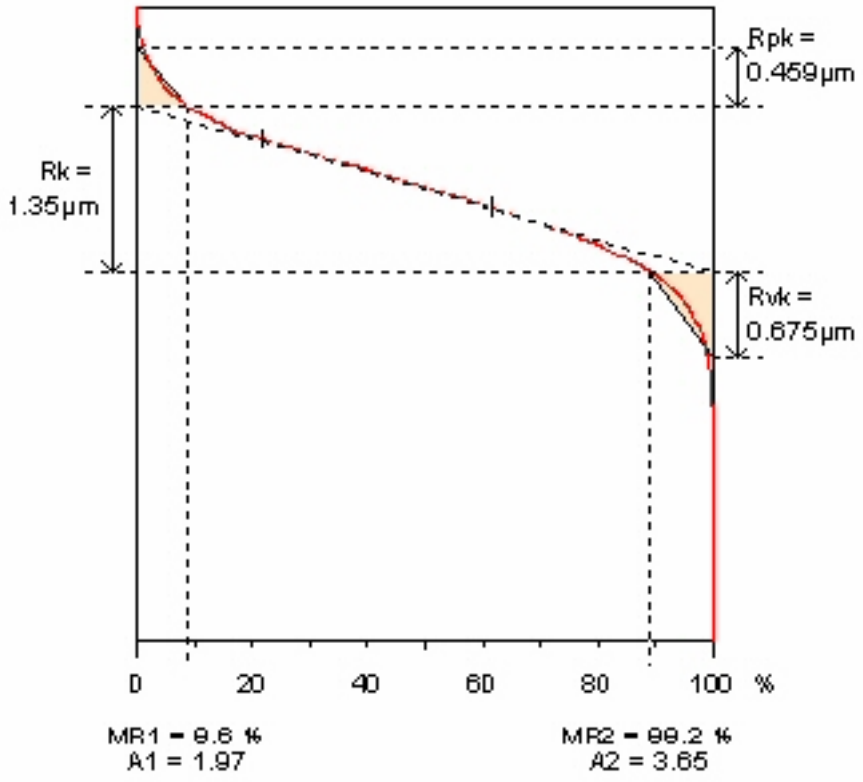


FIG. C.1 – Etablissement des paramètres fonctionnels à partir de la courbe d'Abbott

Annexe D

Matrices de corrélation entre les paramètres de rugosité

	Sa	Sq	Sp	Sv	St	Ssk	Sku	Sz	SHTp	Smmr	Smvr	SPc	Sds	Str	Sal	Std	Sfd	Sdq	Ssc	Sdr	Sk	Spk	Svk	Sr1	Sr2	Sbi	Sci	Svi	Vv	Vm	Vmp	Vmc	Vvc	Vvv	PLNt	PLNp	PLNv	PLNq
Sa	1,00	1,00	0,77	0,69	0,79	0,71	-0,78	0,91	1,00	0,69	0,77	0,86	-0,93	-0,28	-0,58	-0,38	0,60	0,99	0,96	0,98	0,99	0,95	0,93	0,24	0,85	0,02	0,61	-0,68	0,95	0,69	0,81	0,71	1,00	0,97	0,95	0,92	0,86	0,99
Sq	1,00	1,00	0,77	0,71	0,80	0,70	-0,77	0,92	1,00	0,71	0,77	0,86	-0,93	-0,28	-0,59	-0,38	0,59	0,99	0,97	0,98	0,99	0,95	0,94	0,24	0,85	0,01	0,60	-0,67	0,95	0,71	0,82	0,72	0,99	0,98	0,95	0,91	0,87	0,99
Sp	0,77	0,77	1,00	0,69	0,90	0,69	-0,53	0,88	0,76	0,69	1,00	0,85	-0,70	-0,37	-0,38	-0,20	0,18	0,77	0,84	0,76	0,76	0,87	0,70	0,58	0,75	-0,54	0,64	-0,66	0,88	0,69	0,76	0,70	0,78	0,73	0,81	0,83	0,70	0,77
Sv	0,69	0,71	0,69	1,00	0,94	0,33	-0,28	0,87	0,67	1,00	0,69	0,61	-0,64	-0,21	-0,43	-0,10	0,15	0,72	0,71	0,71	0,68	0,74	0,78	0,27	0,54	-0,16	0,33	-0,32	0,70	1,00	0,98	1,00	0,67	0,75	0,74	0,61	0,76	0,69
St	0,79	0,80	0,90	0,94	1,00	0,53	-0,43	0,95	0,77	0,94	0,90	0,78	-0,72	-0,31	-0,44	-0,16	0,18	0,80	0,83	0,79	0,78	0,87	0,81	0,45	0,69	-0,36	0,51	-0,51	0,85	0,94	0,96	0,94	0,78	0,80	0,84	0,77	0,79	0,79
Ssk	0,71	0,70	0,69	0,33	0,53	1,00	-0,87	0,60	0,72	0,33	0,69	0,83	-0,75	-0,63	-0,29	-0,42	0,41	0,67	0,74	0,65	0,71	0,73	0,49	0,52	0,88	-0,28	0,95	-0,98	0,80	0,33	0,46	0,34	0,76	0,56	0,63	0,79	0,43	0,71
Sku	-0,78	-0,77	-0,53	-0,28	-0,43	-0,87	1,00	-0,58	-0,79	-0,28	-0,53	-0,73	0,77	0,46	0,51	0,42	-0,74	-0,76	-0,77	-0,71	-0,79	-0,73	-0,63	-0,22	-0,84	-0,06	-0,74	0,80	-0,75	-0,28	-0,42	-0,30	-0,80	-0,69	-0,66	-0,76	-0,51	-0,76
Sz	0,91	0,92	0,88	0,87	0,95	0,60	-0,58	1,00	0,89	0,87	0,88	0,85	-0,83	-0,32	-0,57	-0,28	0,36	0,92	0,94	0,90	0,90	0,96	0,91	0,40	0,80	-0,22	0,55	-0,57	0,93	0,87	0,93	0,88	0,90	0,92	0,92	0,86	0,87	0,90
SHTp	1,00	1,00	0,76	0,67	0,77	0,72	-0,79	0,89	1,00	0,67	0,76	0,86	-0,94	-0,29	-0,57	-0,39	0,60	0,98	0,96	0,98	0,99	0,94	0,92	0,24	0,86	0,02	0,63	-0,70	0,95	0,67	0,79	0,69	1,00	0,97	0,94	0,92	0,85	0,99
Smmr	0,69	0,71	0,69	1,00	0,94	0,33	-0,28	0,87	0,67	1,00	0,69	0,61	-0,64	-0,21	-0,43	-0,10	0,15	0,72	0,71	0,71	0,68	0,74	0,78	0,27	0,54	-0,16	0,33	-0,32	0,70	1,00	0,98	1,00	0,67	0,75	0,74	0,61	0,76	0,69
Smvr	0,77	0,77	1,00	0,69	0,90	0,69	-0,53	0,88	0,76	0,69	1,00	0,85	-0,70	-0,37	-0,38	-0,20	0,18	0,77	0,84	0,76	0,76	0,87	0,70	0,58	0,75	-0,54	0,64	-0,66	0,88	0,69	0,76	0,70	0,78	0,73	0,81	0,83	0,70	0,77
SPc	0,86	0,86	0,85	0,61	0,78	0,83	-0,73	0,85	0,86	0,61	0,85	1,00	-0,80	-0,53	-0,49	-0,37	0,40	0,85	0,91	0,83	0,86	0,93	0,73	0,52	0,89	-0,26	0,79	-0,81	0,93	0,61	0,71	0,62	0,89	0,78	0,82	0,86	0,69	0,85
Sds	-0,93	-0,93	-0,70	-0,64	-0,72	-0,75	0,77	-0,83	-0,94	-0,64	-0,70	-0,80	1,00	0,42	0,53	0,45	-0,53	-0,90	-0,87	-0,88	-0,92	-0,86	-0,84	-0,29	-0,87	0,01	-0,68	0,73	-0,89	-0,64	-0,75	-0,65	-0,94	-0,89	-0,87	-0,87	-0,77	-0,93
Str	-0,28	-0,28	-0,37	-0,21	-0,31	-0,63	0,46	-0,32	-0,29	-0,21	-0,37	-0,53	0,42	1,00	0,21	0,43	-0,03	-0,23	-0,32	-0,16	-0,26	-0,39	-0,13	-0,65	-0,61	0,26	-0,69	0,61	-0,40	-0,21	-0,26	-0,21	-0,34	-0,19	-0,28	-0,37	-0,17	-0,34
Sal	-0,58	-0,59	-0,38	-0,43	-0,44	-0,29	0,51	-0,57	-0,57	-0,43	-0,38	-0,49	0,53	0,21	1,00	0,27	-0,71	-0,65	-0,65	-0,54	-0,63	-0,61	-0,69	-0,09	-0,63	-0,23	-0,16	0,20	-0,54	-0,42	-0,48	-0,44	-0,55	-0,63	-0,53	-0,50	-0,50	-0,51
Std	-0,38	-0,38	-0,20	-0,10	-0,16	-0,42	0,42	-0,28	-0,39	-0,10	-0,20	-0,37	0,45	0,43	0,27	1,00	-0,25	-0,34	-0,34	-0,34	-0,38	-0,34	-0,26	-0,16	-0,49	-0,11	-0,40	0,43	-0,37	-0,10	-0,18	-0,10	-0,41	-0,32	-0,31	-0,34	-0,25	-0,40
Sfd	0,60	0,59	0,18	0,15	0,18	0,41	-0,74	0,36	0,60	0,15	0,18	0,40	-0,53	-0,03	-0,71	-0,25	1,00	0,64	0,59	0,57	0,65	0,49	0,61	-0,28	0,54	0,51	0,22	-0,33	0,46	0,15	0,26	0,16	0,58	0,59	0,47	0,48	0,41	0,52
Sdq	0,99	0,99	0,77	0,72	0,80	0,67	-0,76	0,92	0,98	0,72	0,77	0,85	-0,90	-0,23	-0,65	-0,34	0,64	1,00	0,98	0,98	0,99	0,95	0,96	0,21	0,85	0,02	0,56	-0,63	0,94	0,72	0,82	0,73	0,98	0,98	0,94	0,90	0,86	0,96
Ssc	0,96	0,97	0,84	0,71	0,83	0,74	-0,77	0,94	0,96	0,71	0,84	0,91	-0,87	-0,32	-0,65	-0,34	0,59	0,98	1,00	0,96	0,98	0,98	0,92	0,34	0,89	-0,11	0,64	-0,69	0,97	0,71	0,81	0,72	0,96	0,94	0,92	0,91	0,83	0,94
Sdr	0,98	0,98	0,76	0,71	0,79	0,65	-0,71	0,90	0,98	0,71	0,76	0,83	-0,88	-0,16	-0,54	-0,34	0,57	0,98	0,96	1,00	0,98	0,93	0,93	0,18	0,80	0,01	0,56	-0,63	0,93	0,71	0,81	0,72	0,97	0,97	0,94	0,90	0,87	0,96
Sk	0,99	0,99	0,76	0,68	0,78	0,71	-0,79	0,90	0,99	0,68	0,76	0,86	-0,92	-0,26	-0,63	-0,38	0,65	0,99	0,98	0,98	1,00	0,95	0,94	0,21	0,87	0,03	0,61	-0,68	0,94	0,68	0,79	0,69	0,99	0,97	0,93	0,91	0,84	0,97
Spk	0,95	0,95	0,87	0,74	0,87	0,73	-0,73	0,96	0,94	0,74	0,87	0,93	-0,86	-0,39	-0,61	-0,34	0,49	0,95	0,98	0,93	0,95	1,00	0,90	0,45	0,89	-0,19	0,66	-0,69	0,97	0,74	0,84	0,75	0,95	0,93	0,92	0,90	0,83	0,94
Svk	0,93	0,94	0,70	0,78	0,81	0,49	-0,63	0,91	0,92	0,78	0,70	0,73	-0,84	-0,13	-0,69	-0,26	0,61	0,96	0,92	0,93	0,94	0,90	1,00	0,12	0,73	0,08	0,38	-0,43	0,86	0,78	0,85	0,79	0,90	0,98	0,90	0,80	0,88	0,89
Sr1	0,24	0,24	0,58	0,27	0,45	0,52	-0,22	0,40	0,24	0,27	0,58	0,52	-0,29	-0,65	-0,09	-0,16	-0,28	0,21	0,34	0,18	0,21	0,45	0,12	1,00	0,51	-0,66	0,61	-0,51	0,44	0,27	0,30	0,27	0,29	0,17	0,29	0,37	0,19	0,29
Sr2	0,85	0,85	0,75	0,54	0,69	0,88	-0,84	0,80	0,86	0,54	0,75	0,89	-0,87	-0,61	-0,63	-0,49	0,54	0,85	0,89	0,80	0,87	0,89	0,73	0,51	1,00	-0,15	0,82	-0,84	0,90	0,54	0,66	0,56	0,88	0,77	0,79	0,87	0,65	0,84
Sbi	0,02	0,01	-0,54	-0,16	-0,36	-0,28	-0,06	-0,22	0,02	-0,16	-0,54	-0,26	0,01	0,26	-0,23	-0,11	0,51	0,02	-0,11	0,01	0,03	-0,19	0,08	-0,66	-0,15	1,00	-0,34	0,28	-0,22	-0,16	-0,14	-0,15	-0,02	0,06	-0,06	-0,17	0,03	-0,01
Sci	0,61	0,60	0,64	0,33	0,51	0,95	-0,74	0,55	0,63	0,33	0,64	0,79	-0,68	-0,69	-0,16	-0,40	0,22	0,56	0,64	0,56	0,61	0,66	0,38	0,61	0,82	-0,34	1,00	-0,96	0,72	0,33	0,43	0,33	0,68	0,45	0,56	0,71	0,38	0,64
Svi	-0,68	-0,67	-0,66	-0,32	-0,51	-0,98	0,80	-0,57	-0,70	-0,32	-0,66	-0,81	0,73	0,61	0,20	0,43	-0,33	-0,63	-0,69	-0,63	-0,68	-0,69	-0,43	-0,51	-0,84	0,28	-0,96	1,00	-0,77	-0,32	-0,44	-0,33	-0,74	-0,51	-0,61	-0,77	-0,42	-0,70
Vv	0,95	0,95	0,88	0,70	0,85	0,80	-0,75	0,93	0,95	0,70	0,88	0,93	-0,89	-0,40	-0,54	-0,37	0,46	0,94	0,97	0,93	0,94	0,97	0,86	0,44	0,90	-0,22	0,72	-0,77	1,00	0,70	0,81	0,71	0,96	0,90	0,92	0,96	0,80	0,95
Vm	0,69	0,71	0,69	1,00	0,94	0,33	-0,28	0,87	0,67	1,00	0,69	0,61	-0,64	-0,21	-0,42	-0,10	0,15	0,72	0,71	0,71	0,68	0,74	0,78	0,27	0,54	-0,16	0,33	-0,32	0,70	1,00	0,98	1,00	0,67	0,75	0,74	0,61	0,76	0,69
Vmp	0,81	0,82	0,76	0,98	0,96	0,46	-0,42	0,93	0,79	0,98	0,76	0,71	-0,75	-0,26	-0,48	-0,18	0,26	0,82	0,81	0,81	0,79	0,84	0,85	0,30	0,66	-0,14	0,43	-0,44	0,81	0,98	1,00	0,99	0,79	0,84	0,83	0,73	0,83	0,80
Vmc	0,71	0,72	0,70	1,00	0,94	0,34	-0,30	0,88	0,69	1,00	0,70	0,62	-0,65	-0,21	-0,44	-0,10	0,16	0,73	0,72	0,72	0,69	0,75	0,79	0,27	0,56	-0,15	0,33	-0,33	0,71	1,00	0,99	1,00	0,69	0,76	0,75	0,62	0,77	0,70
Vvc	1,00	0,99	0,78	0,67	0,78	0,76	-0,80	0,90	1,00	0,67	0,78	0,89	-0,94	-0,34	-0,55	-0,41	0,58	0,98	0,96	0,97	0,99	0,95	0,90	0,29	0,88	-0,02	0,68	-0,74	0,96	0,67	0,79	0,69	1,00	0,95	0,94	0,93	0,84	0,99
Vvv	0,97	0,98	0,73	0,75	0,80	0,56	-0,69	0,92	0,97	0,75	0,73	0,78	-0,89	-0,19	-0,63	-0,32	0,59	0,98	0,94	0,97	0,97	0,93	0,98	0,17	0,77	0,06	0,45	-0,51	0,90	0,75	0,84	0,76	0,95	1,00	0,94	0,85	0,90	0,96
PLNt	0,95	0,95	0,81	0,74	0,84	0,63	-0,66	0,92	0,94	0,74	0,81	0,82	-0,87	-0,28	-0,53	-0,31	0,47	0,94	0,92	0,94	0,93	0,92	0,90	0,29	0,79	-0,06	0,56	-0,61	0,92	0,74	0,83	0,75	0,94	0,94	1,00	0,92	0,95	0,95
PLNp	0,92	0,91	0,83	0,61	0,77	0,79	-0,76	0,86	0,92	0,61	0,83	0,86	-0,87	-0,37	-0,50	-0,34	0,48	0,90	0,91	0,90	0,91	0,90	0,80	0,37	0,87	-0,17	0,71	-0,77	0,96	0,61	0,73	0,62	0,93	0,85	0,92	1,00	0,75	0,91
PLNv	0,86	0,87	0,70	0,76	0,79	0,43	-0,51	0,87	0,85	0,76	0,70	0,69	-0,77	-0,17	-0,50	-0,25	0,41	0,86	0,83	0,87	0,84	0,83	0,88	0,19	0,65	0,03	0,38	-0,42	0,80	0,76	0,83	0,77	0,84	0,90	0,95	0,75	1,00	0,87

FIG. D.1 – Matrice de corrélation entre les paramètres de rugosité mesurés sur les éprouvettes de MDF
Corrélations significatives marquées à p $\prec$ 0,05
N=96

	Sa	Sq	Sp	Sv	St	Ssk	Sku	Sz	SHTp	Smmr	Smvr	SPc	Sds	Str	Sal	Std	Sfd	Sdq	Ssc	Sdr	Sk	Spk	Svk	Sr1	Sr2	Sbi	Sci	Svi	Vv	Vm	Vmp	Vmc	Vvc	Vvv	PLNt	PLNp	PLNv	PLNq
Sa	1,00	1,00	0,81	0,71	0,86	-0,03	-0,29	0,95	1,00	0,71	0,81	0,87	-0,76	-0,62	-0,66	-0,43	0,46	0,96	0,93	0,96	0,95	0,94	0,94	-0,28	0,32	0,30	-0,14	0,16	0,93	0,71	0,82	0,72	1,00	0,98	0,89	0,85	0,79	0,96
Sq	1,00	1,00	0,81	0,72	0,86	-0,04	-0,28	0,95	1,00	0,72	0,81	0,88	-0,76	-0,63	-0,66	-0,43	0,46	0,96	0,93	0,96	0,95	0,95	0,94	-0,27	0,31	0,30	-0,15	0,18	0,94	0,72	0,83	0,73	1,00	0,98	0,89	0,86	0,80	0,97
Sp	0,81	0,81	1,00	0,58	0,89	0,13	-0,08	0,86	0,81	0,58	1,00	0,84	-0,61	-0,49	-0,52	-0,23	0,29	0,79	0,80	0,81	0,79	0,83	0,75	-0,20	0,28	-0,23	-0,02	0,04	0,88	0,58	0,68	0,60	0,82	0,78	0,77	0,82	0,62	0,78
Sv	0,71	0,72	0,58	1,00	0,89	-0,40	0,18	0,83	0,70	1,00	0,58	0,61	-0,74	-0,44	-0,50	-0,35	0,19	0,69	0,64	0,67	0,66	0,69	0,72	-0,09	-0,06	0,21	-0,30	0,32	0,64	1,00	0,98	1,00	0,70	0,74	0,79	0,59	0,85	0,69
St	0,86	0,86	0,89	0,89	1,00	-0,15	0,05	0,95	0,85	0,89	0,89	0,82	-0,76	-0,52	-0,57	-0,33	0,27	0,83	0,81	0,83	0,81	0,85	0,83	-0,16	0,13	-0,01	-0,18	0,20	0,85	0,89	0,93	0,90	0,85	0,85	0,88	0,80	0,83	0,82
Ssk	-0,03	-0,04	0,13	-0,40	-0,15	1,00	-0,48	-0,05	-0,02	-0,40	0,13	0,04	0,14	-0,08	-0,07	0,06	0,20	-0,02	0,04	-0,04	0,00	0,04	-0,11	0,02	0,43	-0,32	0,74	-0,65	0,15	-0,40	-0,32	-0,40	0,00	-0,14	-0,12	0,14	-0,32	-0,04
Sku	-0,29	-0,28	-0,08	0,18	0,05	-0,48	1,00	-0,17	-0,30	0,18	-0,08	-0,23	0,05	0,28	0,28	0,21	-0,37	-0,29	-0,31	-0,25	-0,30	-0,28	-0,27	0,24	-0,45	-0,24	-0,14	0,05	-0,26	0,18	0,07	0,16	-0,29	-0,27	-0,10	-0,19	-0,01	-0,26
Sz	0,95	0,95	0,86	0,83	0,95	-0,05	-0,17	1,00	0,94	0,83	0,86	0,88	-0,76	-0,66	-0,70	-0,41	0,44	0,94	0,92	0,91	0,92	0,95	0,93	-0,23	0,26	0,15	-0,16	0,20	0,93	0,83	0,91	0,84	0,94	0,94	0,90	0,84	0,82	0,89
SHTp	1,00	1,00	0,81	0,70	0,85	-0,02	-0,30	0,94	1,00	0,70	0,81	0,87	-0,75	-0,62	-0,65	-0,43	0,46	0,95	0,93	0,96	0,95	0,94	0,93	-0,29	0,33	0,30	-0,13	0,14	0,93	0,70	0,82	0,72	1,00	0,97	0,88	0,85	0,79	0,96
Smmr	0,71	0,72	0,58	1,00	0,89	-0,40	0,18	0,83	0,70	1,00	0,58	0,61	-0,74	-0,44	-0,50	-0,35	0,19	0,69	0,64	0,67	0,66	0,69	0,72	-0,09	-0,06	0,21	-0,30	0,32	0,64	1,00	0,98	1,00	0,70	0,74	0,79	0,59	0,85	0,69
Smvr	0,81	0,81	1,00	0,58	0,89	0,13	-0,08	0,86	0,81	0,58	1,00	0,84	-0,61	-0,49	-0,52	-0,23	0,29	0,79	0,80	0,81	0,79	0,83	0,75	-0,20	0,28	-0,23	-0,02	0,04	0,88	0,58	0,68	0,60	0,82	0,78	0,77	0,82	0,62	0,78
SPc	0,87	0,88	0,84	0,61	0,82	0,04	-0,23	0,88	0,87	0,61	0,84	1,00	-0,55	-0,59	-0,64	-0,36	0,48	0,90	0,92	0,91	0,90	0,92	0,87	-0,34	0,37	0,06	-0,07	0,12	0,88	0,61	0,72	0,63	0,88	0,86	0,74	0,75	0,63	0,79
Sds	-0,76	-0,76	-0,61	-0,74	-0,76	0,14	0,05	-0,76	-0,75	-0,74	-0,61	-0,55	1,00	0,44	0,46	0,41	-0,13	-0,64	-0,58	-0,63	-0,63	-0,68	-0,66	-0,09	0,04	-0,26	0,12	-0,20	-0,73	-0,74	-0,79	-0,75	-0,76	-0,76	-0,81	-0,74	-0,76	-0,80
Str	-0,62	-0,63	-0,49	-0,44	-0,52	-0,08	0,28	-0,66	-0,62	-0,44	-0,49	-0,59	0,44	1,00	0,93	0,38	-0,76	-0,73	-0,75	-0,60	-0,71	-0,73	-0,73	0,13	-0,47	-0,19	0,00	-0,08	-0,60	-0,44	-0,51	-0,45	-0,62	-0,62	-0,49	-0,49	-0,42	-0,50
Sal	-0,66	-0,66	-0,52	-0,50	-0,57	-0,07	0,28	-0,70	-0,65	-0,50	-0,52	-0,64	0,46	0,93	1,00	0,44	-0,83	-0,79	-0,80	-0,66	-0,78	-0,77	-0,79	0,25	-0,47	-0,22	-0,01	-0,13	-0,62	-0,50	-0,57	-0,50	-0,65	-0,66	-0,50	-0,49	-0,44	-0,50
Std	-0,43	-0,43	-0,23	-0,35	-0,33	0,06	0,21	-0,41	-0,43	-0,35	-0,23	-0,36	0,41	0,38	0,44	1,00	-0,35	-0,45	-0,45	-0,43	-0,45	-0,42	-0,45	0,13	-0,25	-0,27	-0,06	0,01	-0,34	-0,35	-0,40	-0,36	-0,44	-0,41	-0,34	-0,26	-0,36	-0,37
Sfd	0,46	0,46	0,29	0,19	0,27	0,20	-0,37	0,44	0,46	0,19	0,29	0,48	-0,13	-0,76	-0,83	-0,35	1,00	0,65	0,68	0,54	0,65	0,59	0,61	-0,43	0,67	0,27	0,13	-0,04	0,41	0,19	0,27	0,20	0,46	0,44	0,23	0,25	0,17	0,27
Sdq	0,96	0,96	0,79	0,69	0,83	-0,02	-0,29	0,94	0,95	0,69	0,79	0,90	-0,64	-0,73	-0,79	-0,45	0,65	1,00	0,99	0,98	1,00	0,97	0,98	-0,38	0,44	0,27	-0,12	0,18	0,89	0,69	0,79	0,70	0,95	0,95	0,79	0,76	0,71	0,85
Ssc	0,93	0,93	0,80	0,64	0,81	0,04	-0,31	0,92	0,93	0,64	0,80	0,92	-0,58	-0,75	-0,80	-0,45	0,68	0,99	1,00	0,96	0,99	0,97	0,96	-0,40	0,50	0,22	-0,07	0,12	0,88	0,64	0,75	0,66	0,93	0,91	0,76	0,74	0,67	0,82
Sdr	0,96	0,96	0,81	0,67	0,83	-0,04	-0,25	0,91	0,96	0,67	0,81	0,91	-0,63	-0,60	-0,66	-0,43	0,54	0,98	0,96	1,00	0,98	0,94	0,94	-0,39	0,42	0,24	-0,12	0,15	0,88	0,67	0,78	0,68	0,95	0,94	0,80	0,76	0,71	0,87
Sk	0,95	0,95	0,79	0,66	0,81	0,00	-0,30	0,92	0,95	0,66	0,79	0,90	-0,63	-0,71	-0,78	-0,45	0,65	1,00	0,99	0,98	1,00	0,96	0,96	-0,42	0,49	0,27	-0,10	0,15	0,88	0,66	0,77	0,68	0,95	0,94	0,78	0,75	0,69	0,84
Spk	0,94	0,95	0,83	0,69	0,85	0,04	-0,28	0,95	0,94	0,69	0,83	0,92	-0,68	-0,73	-0,77	-0,42	0,59	0,97	0,97	0,94	0,96	1,00	0,95	-0,26	0,40	0,20	-0,08	0,14	0,93	0,69	0,79	0,70	0,94	0,93	0,83	0,82	0,73	0,86
Svk	0,94	0,94	0,75	0,72	0,83	-0,11	-0,27	0,93	0,93	0,72	0,75	0,87	-0,66	-0,73	-0,79	-0,45	0,61	0,98	0,96	0,94	0,96	0,95	1,00	-0,35	0,33	0,30	-0,23	0,28	0,86	0,72	0,82	0,73	0,93	0,95	0,80	0,74	0,73	0,84
Sr1	-0,28	-0,27	-0,20	-0,09	-0,16	0,02	0,24	-0,23	-0,29	-0,09	-0,20	-0,34	-0,09	0,13	0,25	0,13	-0,43	-0,38	-0,40	-0,39	-0,42	-0,26	-0,35	1,00	-0,43	-0,11	0,15	-0,01	-0,21	-0,09	-0,14	-0,10	-0,27	-0,27	-0,08	-0,05	-0,10	-0,15
Sr2	0,32	0,31	0,28	-0,06	0,13	0,43	-0,45	0,26	0,33	-0,06	0,28	0,37	0,04	-0,47	-0,47	-0,25	0,67	0,44	0,50	0,42	0,49	0,40	0,33	-0,43	1,00	-0,01	0,33	-0,29	0,33	-0,06	0,04	-0,05	0,34	0,26	0,12	0,19	0,05	0,19
Sbi	0,30	0,30	-0,23	0,21	-0,01	-0,32	-0,24	0,15	0,30	0,21	-0,23	0,06	-0,26	-0,19	-0,22	-0,27	0,27	0,27	0,22	0,24	0,27	0,20	0,30	-0,11	-0,01	1,00	-0,31	0,31	0,10	0,21	0,24	0,22	0,29	0,33	0,20	0,10	0,26	0,30
Sci	-0,14	-0,15	-0,02	-0,30	-0,18	0,74	-0,14	-0,16	-0,13	-0,30	-0,02	-0,07	0,12	0,00	-0,01	-0,06	0,13	-0,12	-0,07	-0,12	-0,10	-0,08	-0,23	0,15	0,33	-0,31	1,00	-0,80	-0,01	-0,30	-0,27	-0,31	-0,09	-0,27	-0,17	-0,02	-0,28	-0,14
Svi	0,16	0,18	0,04	0,32	0,20	-0,65	0,05	0,20	0,14	0,32	0,04	0,12	-0,20	-0,08	-0,13	0,01	-0,04	0,18	0,12	0,15	0,15	0,14	0,28	-0,01	-0,29	0,31	-0,80	1,00	0,04	0,32	0,29	0,33	0,12	0,34	0,18	0,05	0,27	0,16
Vv	0,93	0,94	0,88	0,64	0,85	0,15	-0,26	0,93	0,93	0,64	0,88	0,88	-0,73	-0,60	-0,62	-0,34	0,41	0,89	0,88	0,88	0,88	0,93	0,86	-0,21	0,33	0,10	-0,01	0,04	1,00	0,64	0,75	0,65	0,94	0,90	0,89	0,93	0,72	0,91
Vm	0,71	0,72	0,58	1,00	0,89	-0,40	0,18	0,83	0,70	1,00	0,58	0,61	-0,74	-0,44	-0,50	-0,35	0,19	0,69	0,64	0,67	0,66	0,69	0,72	-0,09	-0,06	0,21	-0,30	0,32	0,64	1,00	0,98	1,00	0,70	0,74	0,79	0,59	0,85	0,69
Vmp	0,82	0,83	0,68	0,98	0,93	-0,32	0,07	0,91	0,82	0,98	0,68	0,72	-0,79	-0,51	-0,57	-0,40	0,27	0,79	0,75	0,78	0,77	0,79	0,82	-0,14	0,04	0,24	-0,27	0,29	0,75	0,98	1,00	0,99	0,82	0,84	0,87	0,70	0,89	0,80
Vmc	0,72	0,73	0,60	1,00	0,90	-0,40	0,16	0,84	0,72	1,00	0,60	0,63	-0,75	-0,45	-0,50	-0,36	0,20	0,70	0,66	0,68	0,68	0,70	0,73	-0,10	-0,05	0,22	-0,31	0,33	0,65	1,00	0,99	1,00	0,72	0,75	0,80	0,60	0,86	0,70
Vvc	1,00	1,00	0,82	0,70	0,85	0,00	-0,29	0,94	1,00	0,70	0,82	0,88	-0,76	-0,62	-0,65	-0,44	0,46	0,95	0,93	0,95	0,95	0,94	0,93	-0,27	0,34	0,29	-0,09	0,12	0,94	0,70	0,82	0,72	1,00	0,97	0,89	0,86	0,79	0,97
Vvv	0,98	0,98	0,78	0,74	0,85	-0,14	-0,27	0,94	0,97	0,74	0,78	0,86	-0,76	-0,62	-0,66	-0,41	0,44	0,95	0,91	0,94	0,94	0,93	0,95	-0,27	0,26	0,33	-0,27	0,34	0,90	0,74	0,84	0,75	0,97	1,00	0,88	0,82	0,81	0,94
PLNt	0,89	0,89	0,77	0,79	0,88	-0,12	-0,10	0,90	0,88	0,79	0,77	0,74	-0,81	-0,49	-0,50	-0,34	0,23	0,79	0,76	0,80	0,78	0,83	0,80	-0,08	0,12	0,20	-0,17	0,18	0,89	0,79	0,87	0,80	0,89	0,88	1,00	0,91	0,94	0,92
PLNp	0,85	0,86	0,82	0,59	0,80	0,14	-0,19	0,84	0,85	0,59	0,82	0,75	-0,74	-0,49	-0,49	-0,26	0,25	0,76	0,74	0,76	0,75	0,82	0,74	-0,05	0,19	0,10	-0,02	0,05	0,93	0,59	0,70	0,60	0,86	0,82	0,91	1,00	0,71	0,88
PLNv	0,79	0,80	0,62	0,85	0,83	-0,32	-0,01	0,82	0,79	0,85	0,62	0,63	-0,76	-0,42	-0,44	-0,36	0,17	0,71	0,67	0,71	0,69	0,73	0,73	-0,10	0,05	0,26	-0,28	0,27	0,72	0,85	0,89	0,86	0,79	0,81	0,94	0,71	1,00	0,82
PLNq	0,96	0,97	0,78	0,69	0,82	-0,04	-0,26	0,89	0,96	0,69	0,78	0,79	-0,80	-0,50	-0,50	-0,37	0,27	0,85	0,82	0,87	0,84	0,86	0,84	-0,15	0,19	0,30	-0,14	0,16	0,91	0,69	0,80	0,70	0,97	0,94	0,92	0,88	0,82	1,00

FIG. D.2 – Matrice de corrélation entre les paramètres de rugosité mesurés sur les éprouvettes de bois de pin
Corrélations significatives marquées à p $\prec$ 0,05
N=96

	Sa	Sq	Sp	Sv	St	Ssk	Sku	Sz	SHTp	Smmr	Smvr	SPc	Sds	Str	Sal	Std	Sfd	Sdq	Ssc	Sdr	Sk	Spk	Svk	Sr1	Sr2	Sbi	Sci	Svi	Vv	Vm	Vmp	Vmc	Vvc	Vvv	PLNt	PLNp	PLNv	PLNq
Sa	1,00	0,96	0,81	0,78	0,85	-0,42	0,35	0,86	0,94	0,78	0,81	0,05	-0,41	-0,09	0,59	-0,06	-0,85	0,76	0,55	0,72	0,53	0,81	0,65	0,58	0,48	0,20	-0,32	0,20	0,90	0,78	0,82	0,78	0,92	0,88	0,87	0,93	0,81	0,96
Sq	0,96	1,00	0,81	0,84	0,89	-0,59	0,49	0,91	0,83	0,84	0,81	0,00	-0,35	-0,11	0,43	-0,05	-0,81	0,82	0,52	0,81	0,52	0,90	0,73	0,52	0,40	0,16	-0,49	0,34	0,87	0,84	0,86	0,84	0,80	0,96	0,92	0,89	0,88	0,99
Sp	0,81	0,81	1,00	0,65	0,80	-0,42	0,40	0,77	0,71	0,65	1,00	0,11	-0,08	0,03	0,37	-0,05	-0,65	0,63	0,56	0,60	0,39	0,67	0,52	0,51	0,43	-0,29	-0,29	0,20	0,96	0,65	0,69	0,66	0,74	0,78	0,79	0,93	0,71	0,82
Sv	0,78	0,84	0,65	1,00	0,98	-0,77	0,81	0,96	0,69	1,00	0,65	-0,03	-0,16	-0,01	0,42	-0,20	-0,87	0,77	0,54	0,75	0,47	0,77	0,69	0,42	0,40	0,05	-0,46	0,18	0,67	1,00	1,00	1,00	0,68	0,74	0,96	0,73	0,97	0,81
St	0,85	0,89	0,80	0,98	1,00	-0,73	0,76	0,98	0,75	0,98	0,80	0,01	-0,15	0,00	0,44	-0,17	-0,88	0,79	0,59	0,76	0,48	0,80	0,69	0,47	0,44	-0,04	-0,44	0,19	0,81	0,98	0,98	0,98	0,75	0,81	0,98	0,85	0,97	0,87
Ssk	-0,42	-0,59	-0,42	-0,77	-0,73	1,00	-0,90	-0,73	-0,22	-0,77	-0,42	0,24	0,14	0,06	0,04	-0,15	0,51	-0,60	-0,14	-0,61	-0,25	-0,66	-0,62	-0,11	0,11	-0,13	0,84	-0,59	-0,36	-0,77	-0,74	-0,77	-0,19	-0,64	-0,73	-0,38	-0,79	-0,55
Sku	0,35	0,49	0,40	0,81	0,76	-0,90	1,00	0,73	0,23	0,81	0,40	-0,14	0,03	-0,11	0,08	-0,04	-0,55	0,52	0,28	0,50	0,22	0,54	0,48	0,20	0,12	-0,05	-0,54	0,22	0,34	0,81	0,78	0,81	0,24	0,45	0,72	0,36	0,79	0,46
Sz	0,86	0,91	0,77	0,96	0,98	-0,73	0,73	1,00	0,75	0,96	0,77	0,08	-0,21	-0,01	0,38	-0,17	-0,88	0,87	0,64	0,85	0,57	0,88	0,79	0,53	0,43	0,02	-0,46	0,23	0,79	0,96	0,97	0,97	0,75	0,84	0,96	0,82	0,95	0,88
SHTp	0,94	0,83	0,71	0,69	0,75	-0,22	0,23	0,75	1,00	0,69	0,71	0,09	-0,41	-0,08	0,77	-0,11	-0,86	0,62	0,56	0,56	0,48	0,64	0,50	0,61	0,58	0,21	-0,06	-0,04	0,83	0,69	0,74	0,69	0,98	0,68	0,75	0,88	0,67	0,84
Smmr	0,78	0,84	0,65	1,00	0,98	-0,77	0,81	0,96	0,69	1,00	0,65	-0,03	-0,16	-0,01	0,42	-0,20	-0,87	0,77	0,54	0,75	0,47	0,77	0,69	0,42	0,40	0,05	-0,46	0,18	0,67	1,00	1,00	1,00	0,68	0,74	0,96	0,73	0,97	0,81
Smvr	0,81	0,81	1,00	0,65	0,80	-0,42	0,40	0,77	0,71	0,65	1,00	0,11	-0,08	0,03	0,37	-0,05	-0,65	0,63	0,56	0,60	0,39	0,67	0,52	0,51	0,43	-0,29	-0,29	0,20	0,96	0,65	0,69	0,66	0,74	0,78	0,79	0,93	0,71	0,82
SPc	0,05	0,00	0,11	-0,03	0,01	0,24	-0,14	0,08	0,09	-0,03	0,11	1,00	-0,17	0,45	-0,22	-0,37	0,00	0,43	0,72	0,41	0,72	0,19	0,40	0,53	0,22	-0,23	0,35	-0,18	0,17	-0,03	0,00	-0,03	0,15	-0,04	0,00	0,13	-0,04	-0,10
Sds	-0,41	-0,35	-0,08	-0,16	-0,15	0,14	0,03	-0,21	-0,41	-0,16	-0,08	-0,17	1,00	0,15	-0,18	-0,21	0,35	-0,38	-0,03	-0,33	-0,48	-0,42	-0,41	-0,49	0,13	-0,78	0,30	-0,41	-0,24	-0,16	-0,19	-0,17	-0,34	-0,36	-0,23	-0,27	-0,21	-0,31
Str	-0,09	-0,11	0,03	-0,01	0,00	0,06	-0,11	-0,01	-0,08	-0,01	0,03	0,45	0,15	1,00	-0,12	-0,11	0,01	0,16	0,28	0,20	0,29	-0,12	0,26	-0,06	-0,20	-0,40	0,06	0,09	0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,04	-0,10	0,00	0,05	-0,02	-0,18
Sal	0,59	0,43	0,37	0,42	0,44	0,04	0,08	0,38	0,77	0,42	0,37	-0,22	-0,18	-0,12	1,00	-0,10	-0,68	0,08	0,20	0,02	-0,01	0,14	-0,04	0,36	0,58	0,14	0,23	-0,41	0,47	0,42	0,46	0,42	0,73	0,23	0,42	0,54	0,36	0,51
Std	-0,06	-0,05	-0,05	-0,20	-0,17	-0,15	-0,04	-0,17	-0,11	-0,20	-0,05	-0,37	-0,21	-0,11	-0,10	1,00	0,21	-0,17	-0,49	-0,18	-0,25	-0,09	-0,09	-0,22	-0,56	0,38	-0,30	0,41	-0,07	-0,20	-0,19	-0,20	-0,09	0,03	-0,15	-0,10	-0,16	-0,03
Sfd	-0,85	-0,81	-0,65	-0,87	-0,88	0,51	-0,55	-0,88	-0,86	-0,87	-0,65	0,00	0,35	0,01	-0,68	0,21	1,00	-0,70	-0,54	-0,65	-0,47	-0,70	-0,62	-0,60	-0,49	-0,15	0,25	-0,04	-0,72	-0,87	-0,90	-0,88	-0,84	-0,67	-0,86	-0,80	-0,83	-0,80
Sdq	0,76	0,82	0,63	0,77	0,79	-0,60	0,52	0,87	0,62	0,77	0,63	0,43	-0,38	0,16	0,08	-0,17	-0,70	1,00	0,75	0,99	0,85	0,92	0,97	0,60	0,28	0,11	-0,44	0,36	0,69	0,77	0,79	0,78	0,64	0,79	0,80	0,71	0,79	0,73
Ssc	0,55	0,52	0,56	0,54	0,59	-0,14	0,28	0,64	0,56	0,54	0,56	0,72	-0,03	0,28	0,20	-0,49	-0,54	0,75	1,00	0,71	0,82	0,56	0,63	0,64	0,65	-0,31	0,17	-0,23	0,62	0,54	0,57	0,54	0,63	0,39	0,56	0,62	0,51	0,45
Sdr	0,72	0,81	0,60	0,75	0,76	-0,61	0,50	0,85	0,56	0,75	0,60	0,41	-0,33	0,20	0,02	-0,18	-0,65	0,99	0,71	1,00	0,81	0,92	0,98	0,55	0,23	0,07	-0,47	0,39	0,65	0,75	0,76	0,75	0,57	0,80	0,78	0,67	0,77	0,71
Sk	0,53	0,52	0,39	0,47	0,48	-0,25	0,22	0,57	0,48	0,47	0,39	0,72	-0,48	0,29	-0,01	-0,25	-0,47	0,85	0,82	0,81	1,00	0,67	0,81	0,59	0,30	0,13	-0,11	0,18	0,51	0,47	0,50	0,47	0,53	0,47	0,52	0,53	0,48	0,41
Spk	0,81	0,90	0,67	0,77	0,80	-0,66	0,54	0,88	0,64	0,77	0,67	0,19	-0,42	-0,12	0,14	-0,09	-0,70	0,92	0,56	0,92	0,67	1,00	0,88	0,60	0,29	0,21	-0,56	0,41	0,72	0,77	0,79	0,78	0,62	0,90	0,82	0,73	0,81	0,85
Svk	0,65	0,73	0,52	0,69	0,69	-0,62	0,48	0,79	0,50	0,69	0,52	0,40	-0,41	0,26	-0,04	-0,09	-0,62	0,97	0,63	0,98	0,81	0,88	1,00	0,52	0,08	0,15	-0,52	0,49	0,57	0,69	0,70	0,70	0,50	0,74	0,71	0,59	0,71	0,63
Sr1	0,58	0,52	0,51	0,42	0,47	-0,11	0,20	0,53	0,61	0,42	0,51	0,53	-0,49	-0,06	0,36	-0,22	-0,60	0,60	0,64	0,55	0,59	0,60	0,52	1,00	0,53	0,06	0,06	-0,12	0,59	0,42	0,45	0,42	0,61	0,41	0,46	0,58	0,40	0,48
Sr2	0,48	0,40	0,43	0,40	0,44	0,11	0,12	0,43	0,58	0,40	0,43	0,22	0,13	-0,20	0,58	-0,56	-0,49	0,28	0,65	0,23	0,30	0,29	0,08	0,53	1,00	-0,27	0,41	-0,59	0,50	0,40	0,43	0,40	0,61	0,22	0,41	0,51	0,35	0,44
Sbi	0,20	0,16	-0,29	0,05	-0,04	-0,13	-0,05	0,02	0,21	0,05	-0,29	-0,23	-0,78	-0,40	0,14	0,38	-0,15	0,11	-0,31	0,07	0,13	0,21	0,15	0,06	-0,27	1,00	-0,29	0,34	-0,12	0,05	0,06	0,06	0,13	0,17	0,03	-0,07	0,06	0,16
Sci	-0,32	-0,49	-0,29	-0,46	-0,44	0,84	-0,54	-0,46	-0,06	-0,46	-0,29	0,35	0,30	0,06	0,23	-0,30	0,25	-0,44	0,17	-0,47	-0,11	-0,56	-0,52	0,06	0,41	-0,29	1,00	-0,90	-0,23	-0,46	-0,43	-0,47	0,03	-0,66	-0,50	-0,24	-0,55	-0,46
Svi	0,20	0,34	0,20	0,18	0,19	-0,59	0,22	0,23	-0,04	0,18	0,20	-0,18	-0,41	0,09	-0,41	0,41	-0,04	0,36	-0,23	0,39	0,18	0,41	0,49	-0,12	-0,59	0,34	-0,90	1,00	0,17	0,18	0,16	0,19	-0,11	0,55	0,28	0,15	0,30	0,28
Vv	0,90	0,87	0,96	0,67	0,81	-0,36	0,34	0,79	0,83	0,67	0,96	0,17	-0,24	0,01	0,47	-0,07	-0,72	0,69	0,62	0,65	0,51	0,72	0,57	0,59	0,50	-0,12	-0,23	0,17	1,00	0,67	0,72	0,68	0,85	0,81	0,82	0,98	0,73	0,87
Vm	0,78	0,84	0,65	1,00	0,98	-0,77	0,81	0,96	0,69	1,00	0,65	-0,03	-0,16	-0,01	0,42	-0,20	-0,87	0,77	0,54	0,75	0,47	0,77	0,69	0,42	0,40	0,05	-0,46	0,18	0,67	1,00	1,00	1,00	0,68	0,74	0,96	0,73	0,97	0,81
Vmp	0,82	0,86	0,69	1,00	0,98	-0,74	0,78	0,97	0,74	1,00	0,69	0,00	-0,19	-0,01	0,46	-0,19	-0,90	0,79	0,57	0,76	0,50	0,79	0,70	0,45	0,43	0,06	-0,43	0,16	0,72	1,00	1,00	1,00	0,73	0,76	0,97	0,78	0,97	0,84
Vmc	0,78	0,84	0,66	1,00	0,98	-0,77	0,81	0,97	0,69	1,00	0,66	-0,03	-0,17	-0,02	0,42	-0,20	-0,88	0,78	0,54	0,75	0,47	0,78	0,70	0,42	0,40	0,06	-0,47	0,19	0,68	1,00	1,00	1,00	0,68	0,75	0,96	0,74	0,97	0,82
Vvc	0,92	0,80	0,74	0,68	0,75	-0,19	0,24	0,75	0,98	0,68	0,74	0,15	-0,34	-0,04	0,73	-0,09	-0,84	0,64	0,63	0,57	0,53	0,62	0,50	0,61	0,61	0,13	0,03	-0,11	0,85	0,68	0,73	0,68	1,00	0,64	0,74	0,89	0,66	0,81
Vvv	0,88	0,96	0,78	0,74	0,81	-0,64	0,45	0,84	0,68	0,74	0,78	-0,04	-0,36	-0,10	0,23	0,03	-0,67	0,79	0,39	0,80	0,47	0,90	0,74	0,41	0,22	0,17	-0,66	0,55	0,81	0,74	0,76	0,75	0,64	1,00	0,86	0,81	0,83	0,94
PLNt	0,87	0,92	0,79	0,96	0,98	-0,73	0,72	0,96	0,75	0,96	0,79	0,00	-0,23	0,00	0,42	-0,15	-0,86	0,80	0,56	0,78	0,52	0,82	0,71	0,46	0,41	0,03	-0,50	0,28	0,82	0,96	0,97	0,96	0,74	0,86	1,00	0,86	0,99	0,90
PLNp	0,93	0,89	0,93	0,73	0,85	-0,38	0,36	0,82	0,88	0,73	0,93	0,13	-0,27	0,05	0,54	-0,10	-0,80	0,71	0,62	0,67	0,53	0,73	0,59	0,58	0,51	-0,07	-0,24	0,15	0,98	0,73	0,78	0,74	0,89	0,81	0,86	1,00	0,77	0,89
PLNv	0,81	0,88	0,71	0,97	0,97	-0,79	0,79	0,95	0,67	0,97	0,71	-0,04	-0,21	-0,02	0,36	-0,16	-0,83	0,79	0,51	0,77	0,48	0,81	0,71	0,40	0,35	0,06	-0,55	0,30	0,73	0,97	0,97	0,97	0,66	0,83	0,99	0,77	1,00	0,86
PLNq	0,96	0,99	0,82	0,81	0,87	-0,55	0,46	0,88	0,84	0,81	0,82	-0,10	-0,31	-0,18	0,51	-0,03	-0,80	0,73	0,45	0,71	0,41	0,85	0,63	0,48	0,44	0,16	-0,46	0,28	0,87	0,81	0,84	0,82	0,81	0,94	0,90	0,89	0,86	1,00

FIG. D.3 – Matrice de corrélation entre les paramètres de rugosité mesurés sur les éprouvettes de divers matériaux dérivés du bois
Corrélations significatives marquées à p $\prec$ 0,05
N=32

Annexe E

Effet de la taille des grains de ponçage et de l'ordre de ponçage sur les valeurs des paramètres de rugosité

	Grains						Ordre			
	P60	P80	P100	P120	P220	P320	1	2	3	4
$S_a(\mu m)$	6,56	6,82	4,92	7,64	4,33	2,27	5,31	5,89	5,72	4,79
$S_v(\mu m)$	49,82	56,83	38,43	52,10	39,88	26,24	41,90	43,37	43,22	47,06
S_{sk}(-)	-0,42	-0,56	-0,66	-0,55	-1,02	-1,05	-0,66	-0,71	-0,72	-0,76
S_{tr}(-)	0,08	0,07	0,19	0,68	0,76	0,62	0,37	0,42	0,42	0,41
$S_{td}(^\circ)$	-88,12	-44,34	-66,59	-38,78	16,90	2,65	-21,94	-59,23	-51,81	-12,54
S_{r1}(%)	8,24	8,02	7,61	7,35	7,01	7,18	7,89	7,21	7,24	7,96
S_{r2}(%)	87,52	87,21	86,29	87,01	84,24	82,66	85,96	85,98	85,75	85,61
S_{bi}(-)	0,34	0,41	0,45	0,42	0,51	0,42	0,32	0,52	0,56	0,33
S_{vi}(-)	1,38	1,34	1,30	1,32	1,16	1,20	1,31	1,29	1,28	1,28
S_{ku}(-)	3,65	3,88	3,97	3,58	4,91	5,92	4,34	4,14	4,07	4,75
S_{fd}(-)	2,49	2,49	2,50	2,52	2,50	2,43	2,48	2,51	2,51	2,47
S_{al}(mm)	0,26	0,25	0,24	0,26	0,24	1,09	0,44	0,34	0,34	0,45
S_{ds} $(pics/mm^2)$	7,56	7,58	8,05	7,54	8,39	9,02	8,15	7,80	7,90	8,26

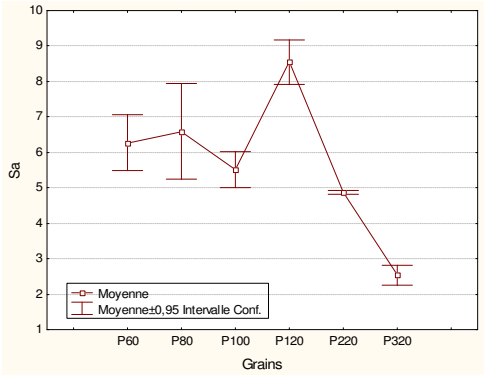
Tab. E.1 – Moyenne des effets des grains de ponçage et de l'ordre de ponçage sur les valeurs des paramètres de rugosité pour les plaques de MDF poncées - Calcul effectué sur la totalité des échantillons de MDF usinés (n=24)

	Grains						Ordre			
	P60	P80	P100	P120	P220	P320	1	2	3	4
$S_a(\mu m)$	5,87	4,77	3,49	2,57	1,79	1,90	3,44	3,46	3,14	3,55
$S_v(\mu m)$	36,55	32,33	29,38	17,96	14,23	20,79	24,65	24,22	27,24	24,73
S_{sk}(-)	-0,21	-0,28	-0,39	-0,08	0,00	-0,45	-0,21	-0,28	-0,25	-0,20
S_{tr}(-)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,24	0,43	0,09	0,14	0,16	0,13
$S_{td}(^\circ)$	-68,15	-87,84	-12,53	-58,31	19,62	-3,96	-61,04	7,91	-26,06	-61,60
$S_{r1}(\%)$	8,96	8,80	8,97	9,43	9,88	10,04	9,22	9,31	9,30	9,55
$S_{r2}(\%)$	89,64	88,93	88,53	89,21	89,20	86,81	88,87	88,64	88,50	88,87
S_{bi}(-)	0,26	0,27	0,28	0,25	0,15	0,25	0,22	0,25	0,24	0,27
S_{vi}(-)	1,45	1,44	1,41	1,49	1,50	1,43	1,47	1,43	1,45	1,47
S_{ku}(-)	3,34	3,40	3,94	3,54	4,55	6,78	4,67	4,21	4,33	3,82
S_{fd}(-)	2,49	2,49	2,49	2,49	2,43	2,32	2,46	2,45	2,46	2,45
S_{al}(mm)	0,19	0,18	0,23	0,36	1,37	2,13	0,59	0,84	0,76	0,78
S_{ds} $(pics/mm^2)$	7,98	8,68	8,83	9,14	9,70	9,12	9,01	8,97	8,93	8,72

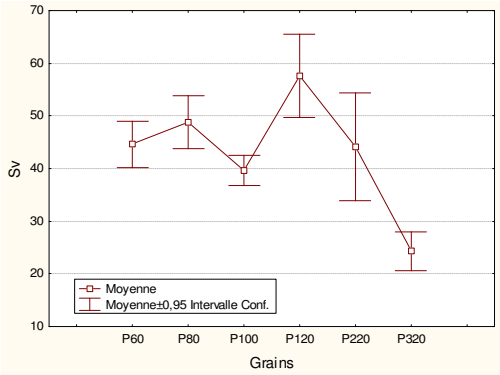
TAB. E.2 – Moyenne des effets des grains de ponçage et de l'ordre de ponçage sur les valeurs des paramètres de rugosité pour les plaques de bois de pin poncées - Calcul effectué sur la totalité des échantillons de bois usinés (n=24)

Annexe F

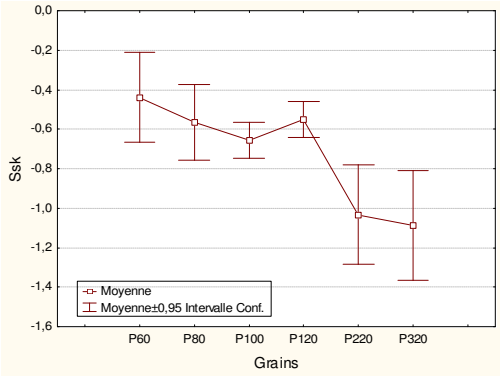
Variabilité des paramètres de rugosité calculés sur tous les échantillons étudiés



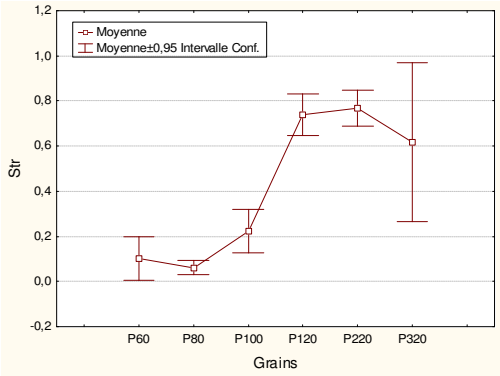
(a) S_a (μm)



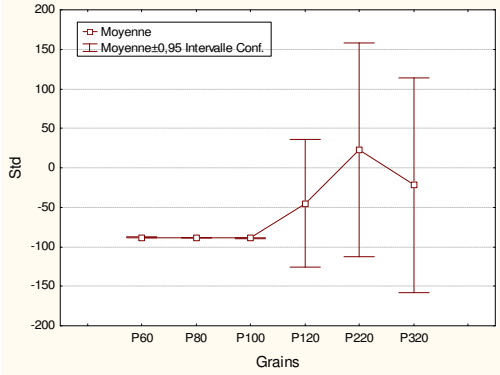
(b) S_v (μm)



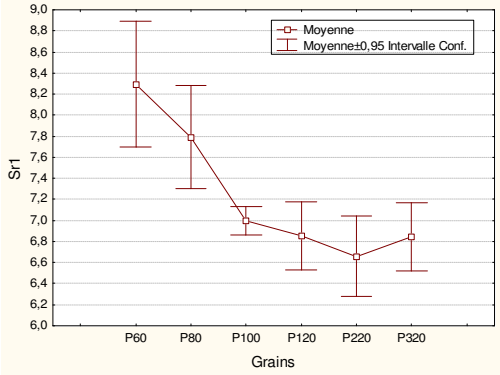
(c) S_{sk} (-)



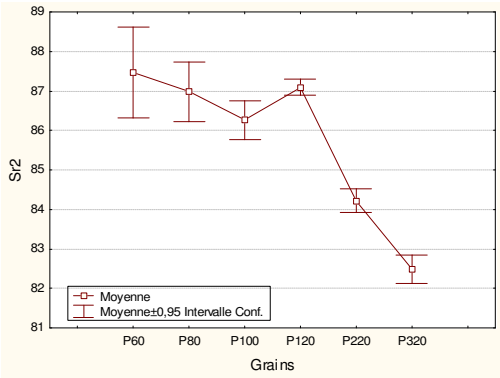
(d) S_{tr} (-)



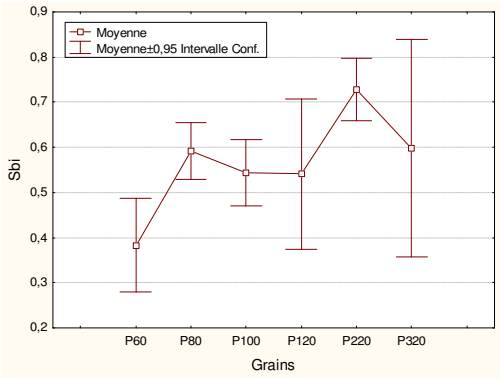
(e) S_{td} (°)



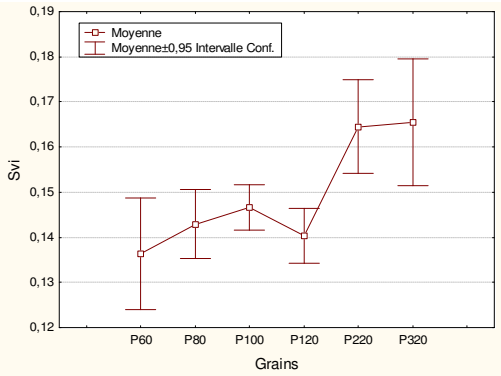
(f) S_{r1} (%)



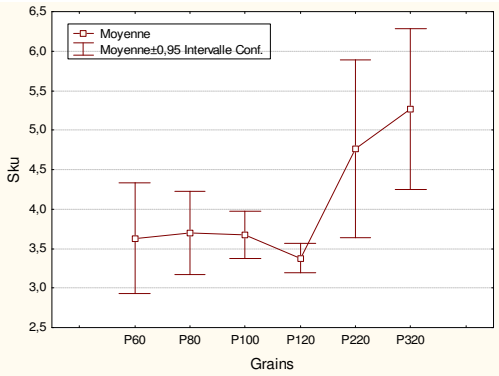
(g) S_{r2} (%)



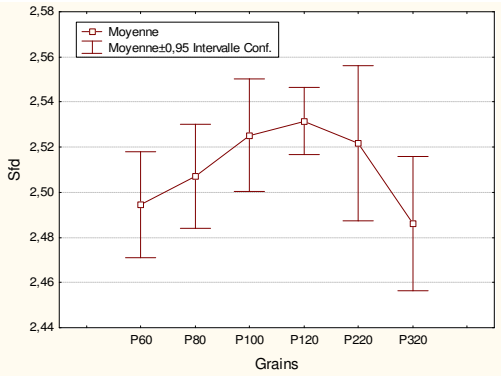
(h) S_{bi} (-)



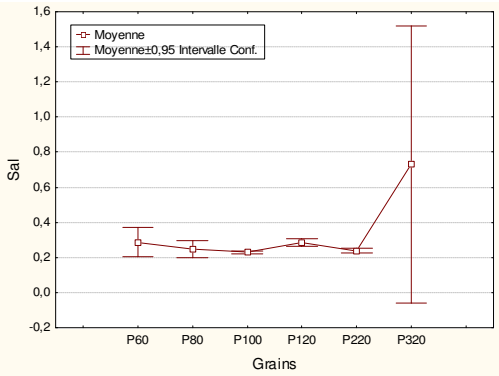
(i) S_{vi} (-)



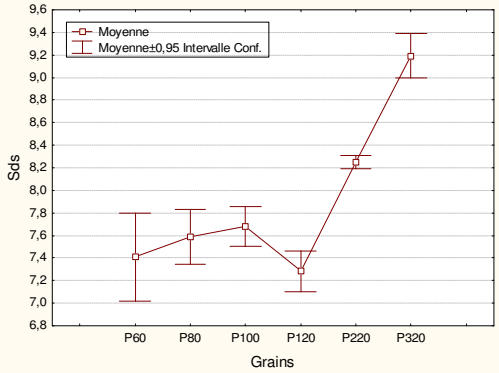
(j) S_{ku} (-)



(k) S_{fd} (-)

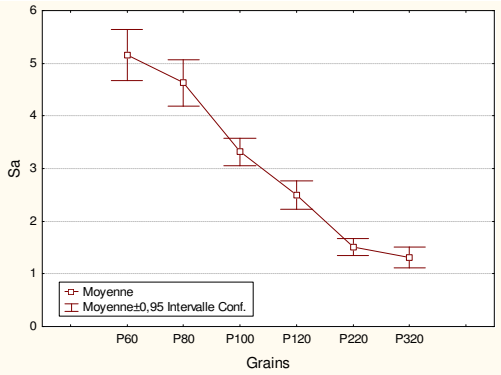


(l) S_{al} (mm)

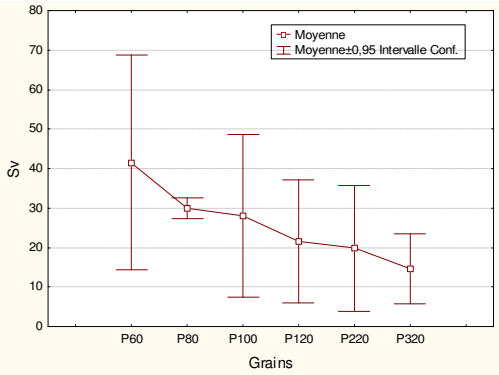


(m) S_{ds} $(pics/mm^2)$

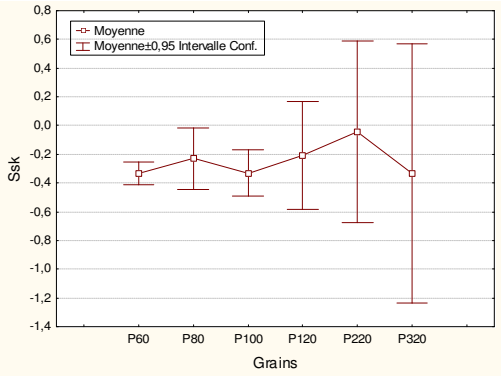
FIG. F.1 – Paramètres de rugosité calculés sur les échantillons de MDF



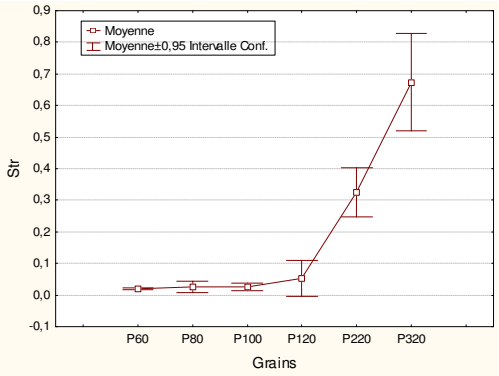
(a) S_a (μm)



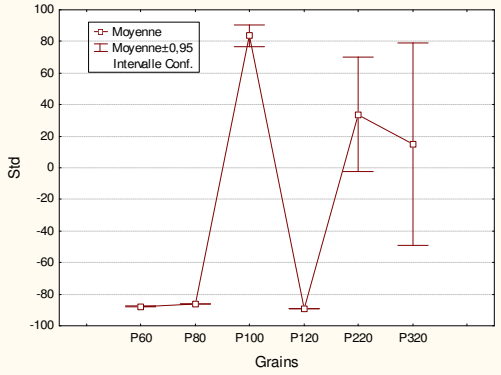
(b) S_v (μm)



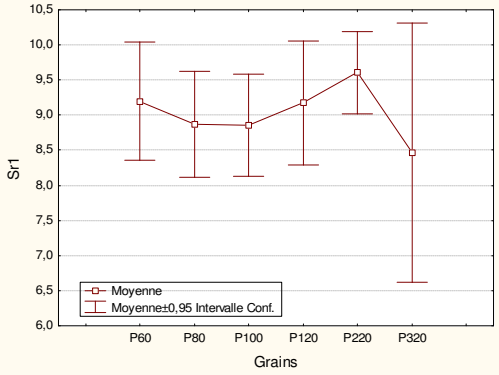
(c) S_{sk} (-)



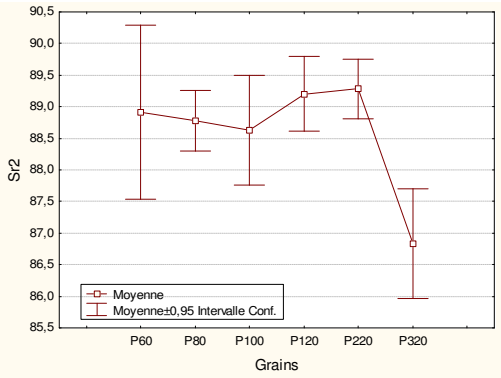
(d) S_{tr} (-)



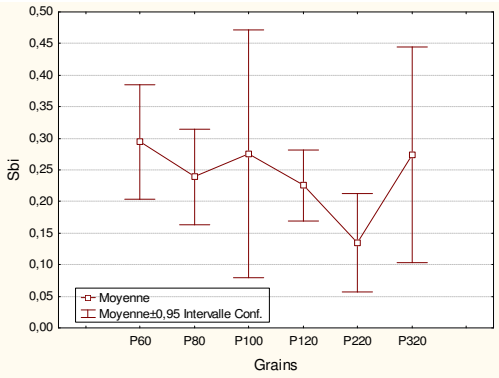
(e) S_{td} $(^\circ)$



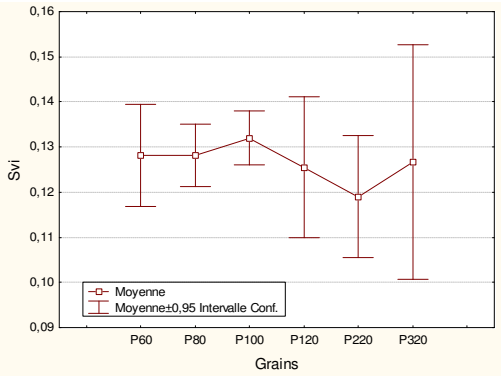
(f) S_{r1} (%)



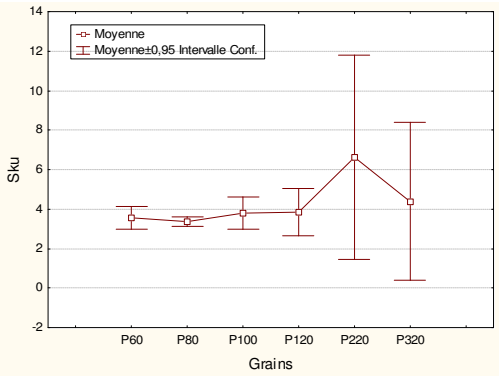
(g) S_{r2} (%)



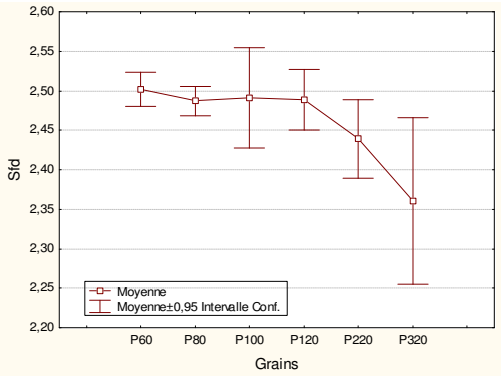
(h) S_{bi} (-)



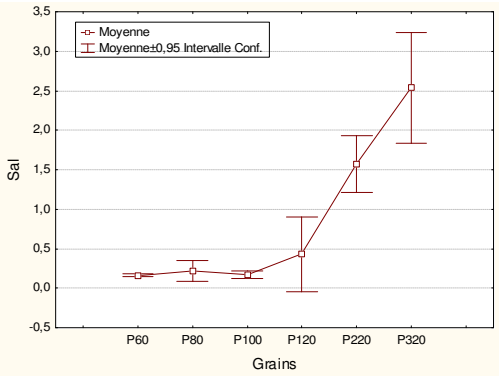
(i) S_{vi} (-)



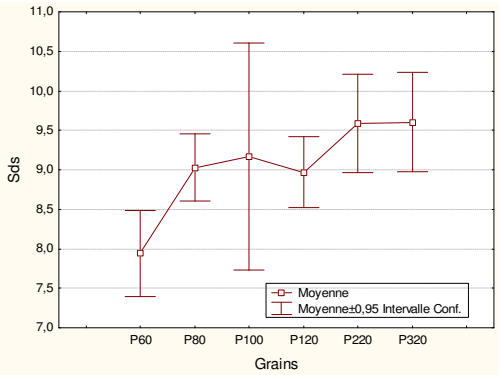
(j) S_{ku} (-)



(k) S_{fd} (-)

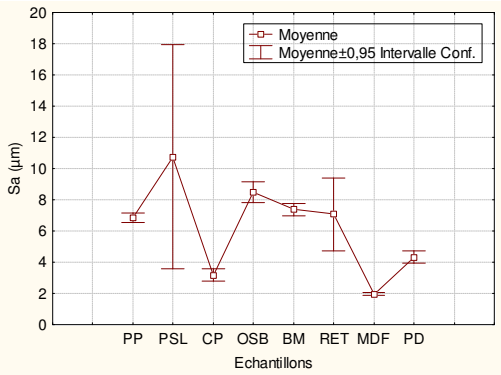


(l) S_{al} (mm)

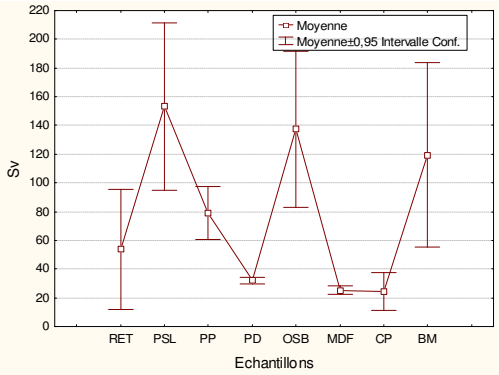


(m) S_{ds} $(pics/mm^2)$

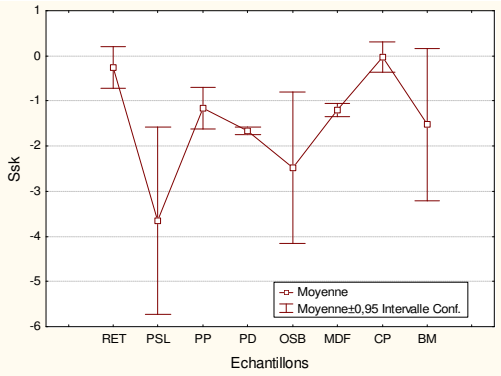
FIG. F.2 – Paramètres de rugosité calculés sur les échantillons de bois massif



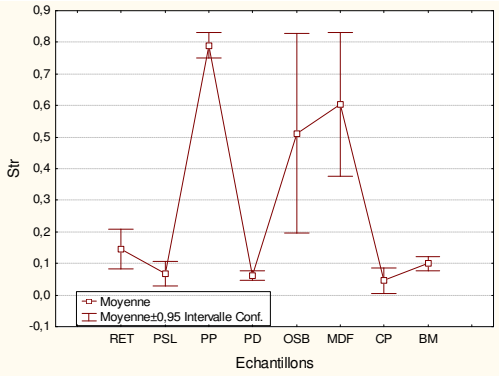
(a) S_a (μm)



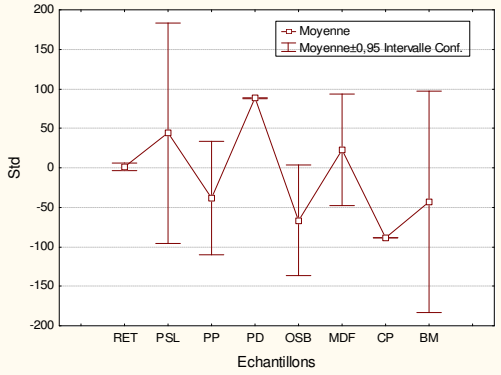
(b) S_v (μm)



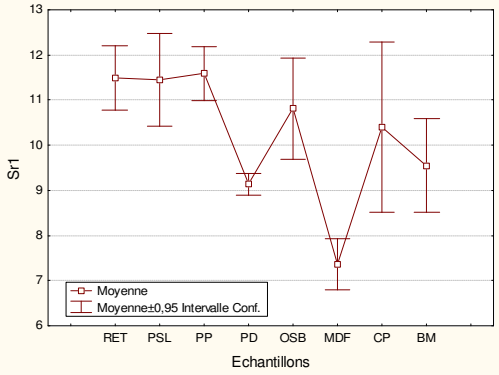
(c) S_{sk} (-)



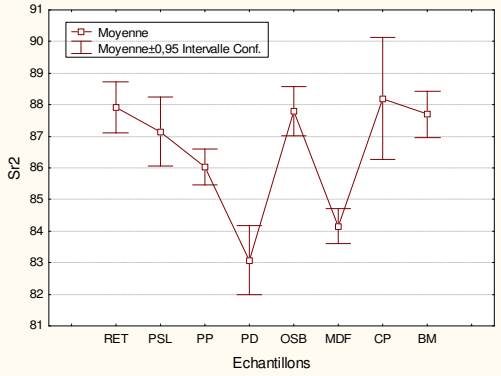
(d) S_{tr} (-)



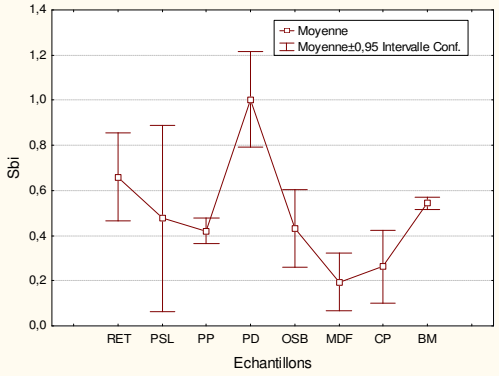
(e) S_{td} (°)



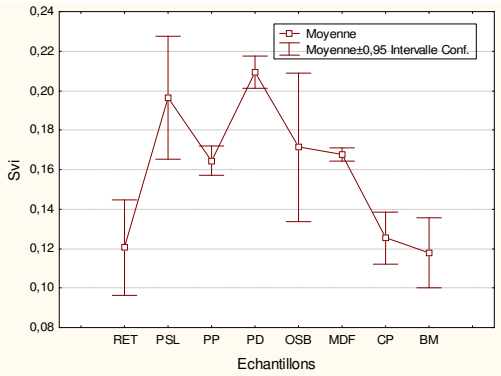
(f) S_{r1} (%)



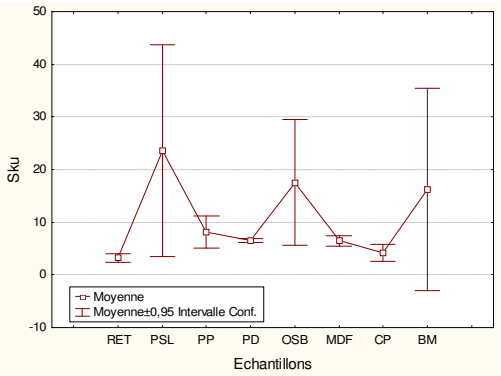
(g) S_{r2} (%)



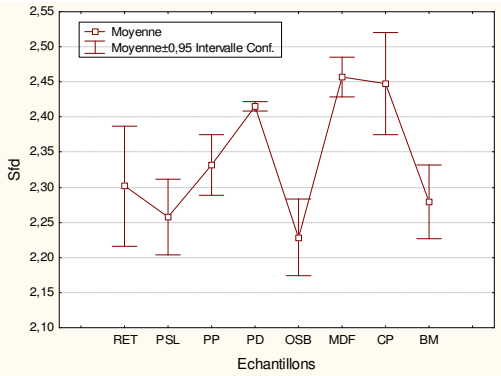
(h) S_{bi} (-)



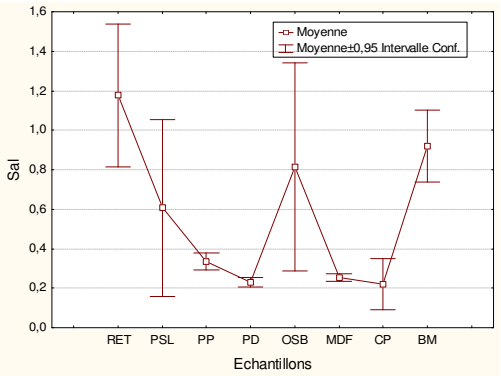
(i) S_{vi} (-)



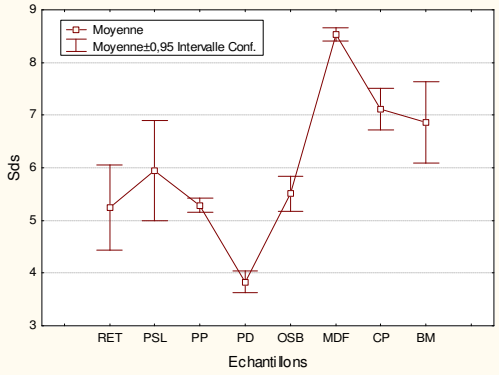
(j) S_{ku} (-)



(k) S_{fd} (-)



(l) S_{al} (mm)



(m) S_{ds} $(pics/mm^2)$

FIG. F.3 – Paramètres de rugosité calculés sur les divers échantillons dérivés du bois

Annexe G

Images couleur des plaques étudiées

Fig. G.1 – Images couleur des six plaques de MDF poncées

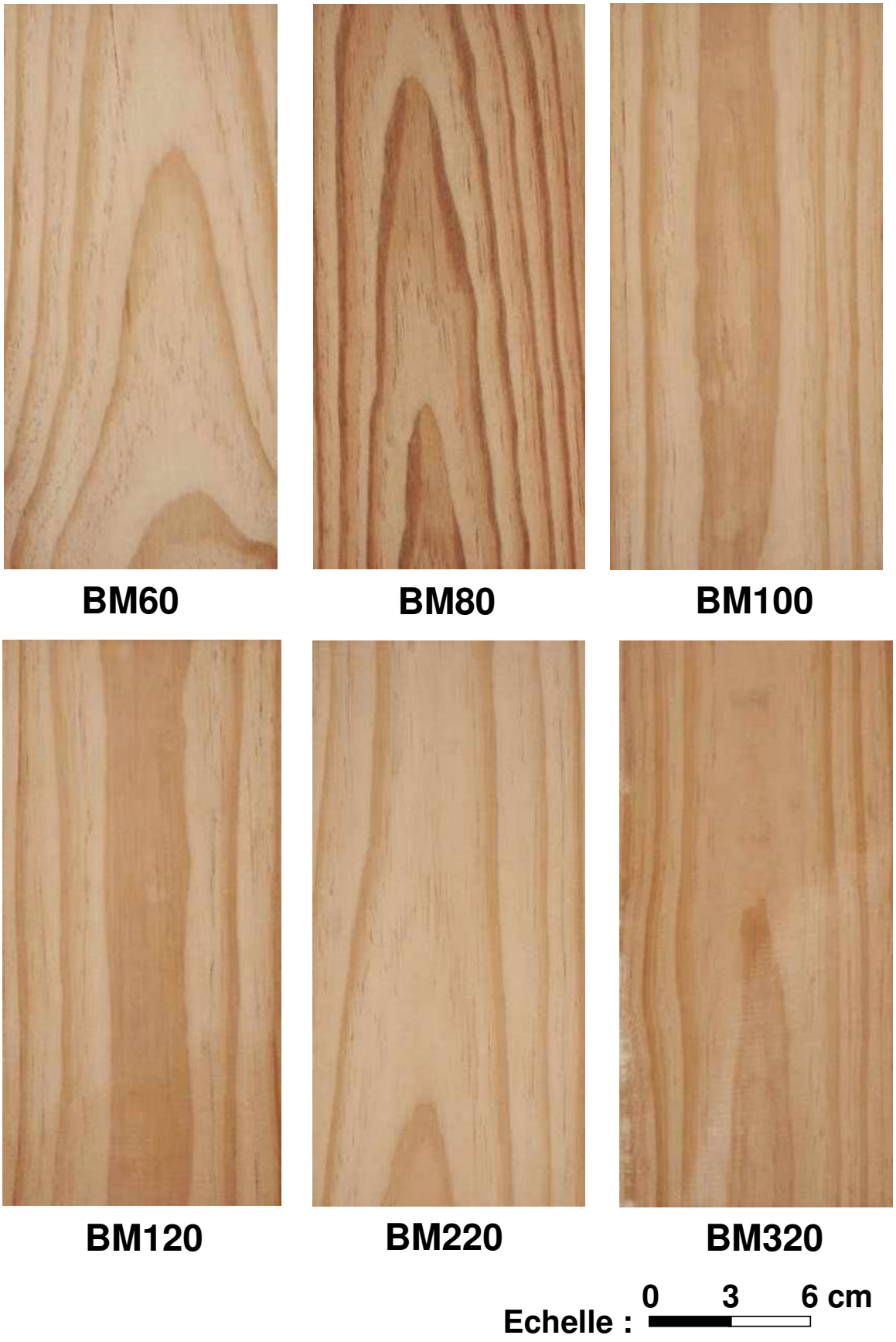


FIG. G.2 – Images couleur des six plaques de bois poncées

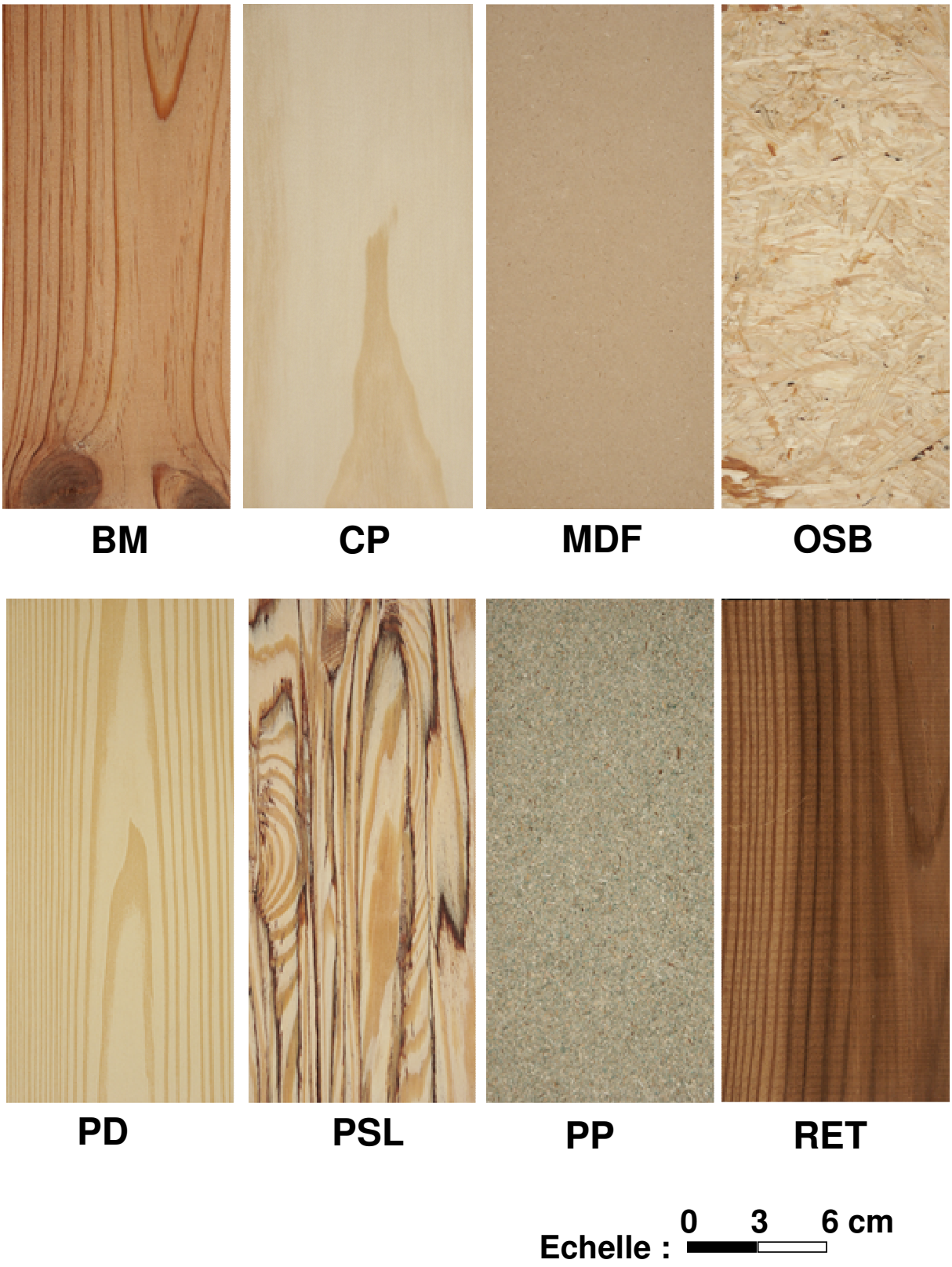


FIG. G.3 – Images couleur des huit plaques de matériaux dérivés du bois

Annexe H

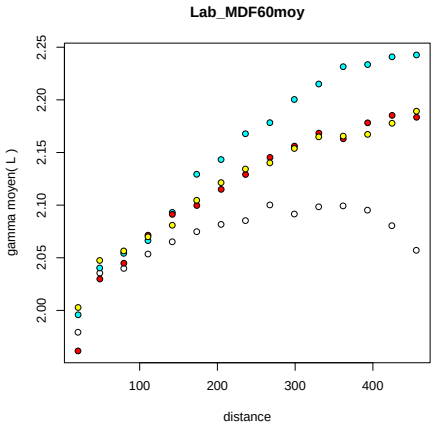
Analyse statistique des coordonnées L, a, b des images des plaques étudiées calculées au moyen du calibrage

		L	a	b
MDF	MDF60	77,9 (1,73)	6,33 (0,97)	13,57 (1,74)
	MDF80	78,0 (1,64)	6,24 (0,96)	13,72 (1,78)
	MDF100	77,9 (1,70)	6,37 (0,97)	13,60(1,75)
	MDF120	78,6 (1,58)	6,20(0,91)	12,81(1,62)
	MDF220	78,8 (1,74)	6,09 (0,93)	12,17 (1,61)
	MDF320	79,3 (1,98)	5,48 (1,02)	11,13 (1,69)
Bois	BM60	80,7 (3,28)	7,37 (2,08)	13,59 (3,70)
	BM80	72,8 (6,34)	12,58 (4,55)	20,63 (4,91)
	BM100	78,2 (3,17)	9,19 (2,11)	17,22 (4,24)
	BM120	77,0 (3,74)	10,15 (2,58)	18,55 (4,76)
	BM220	79,9 (2,56)	8,38 (1,64)	15,11 (3,32)
	BM320	75,6 (2,98)	10,85 (2,17)	20,06 (4,04)
Divers bois	BM	70,8 (7,45)	14,360 (5,30)	24,95 (7,66)
	CP	84,1 (1,45)	3,788 (0,89)	10,77 (2,35)
	MDF	77,9 (1,70)	6,376 (0,97)	13,60 (1,75)
	OSB	83,1 (4,02)	5,311 (2,36)	13,98 (4,19)
	PD	83,4 (2,25)	4,126 (1,32)	17,98 (4,75)
	PP	75,0 (5,27)	2,535 (2,55)	10,30 (3,02)
	PSL	76,3 (11,52)	8,657 (8,62)	17,42 (7,42)
	RET	52,4 (11,40)	20,771 (8,75)	39,49 (23,52)

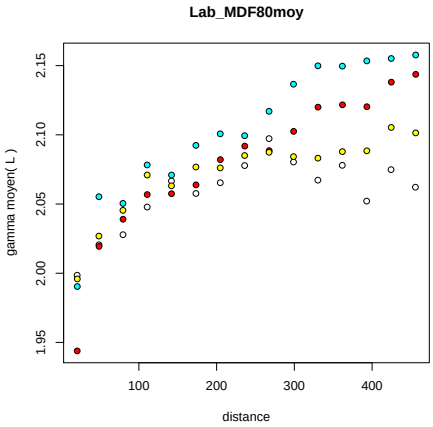
Tab. H.1 – Moyenne et écart-type des coordonnées *L, a, b* des images de chaque plaque de bois calculées au moyen du calibrage

Annexe I

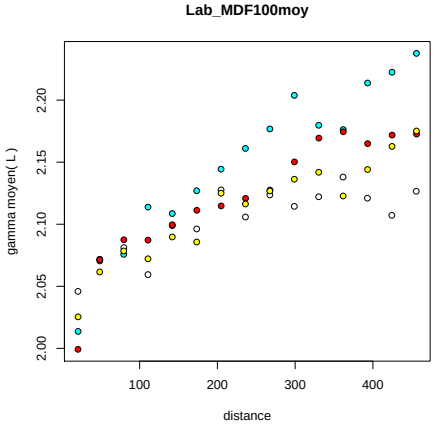
Semi-variogrammes moyens des composants L, a, b



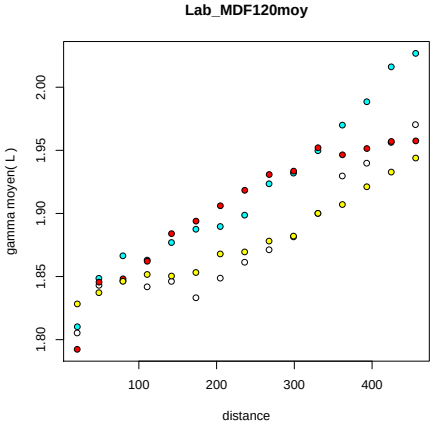
(a) MDF60



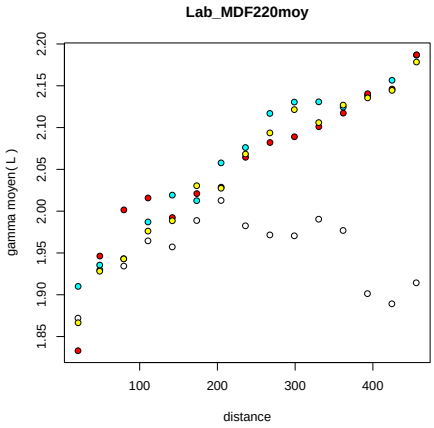
(b) MDF80



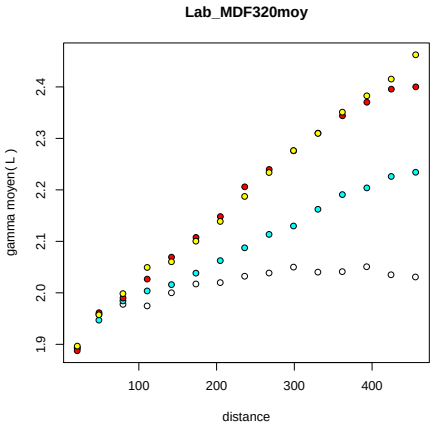
(c) MDF100



(d) MDF120



(e) MDF220



(f) MDF320

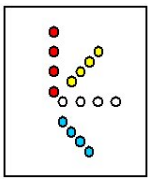
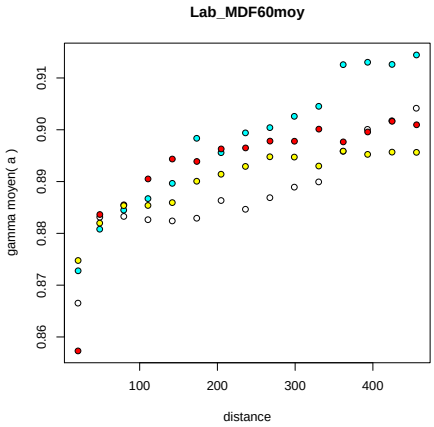
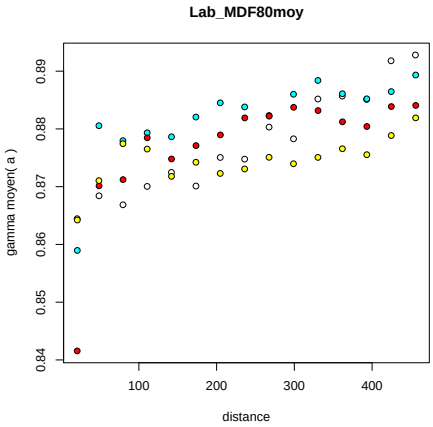


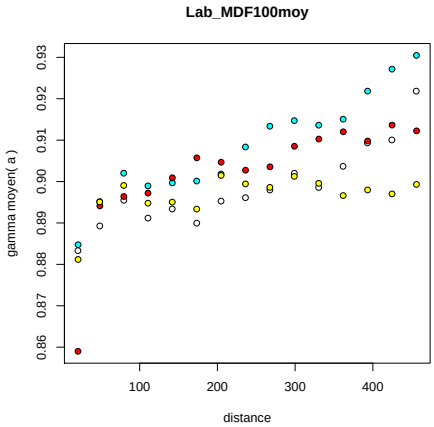
FIG. I.1 – Semi-variogrammes de L calculés sur quatre directions sur les plaques de MDF poncées



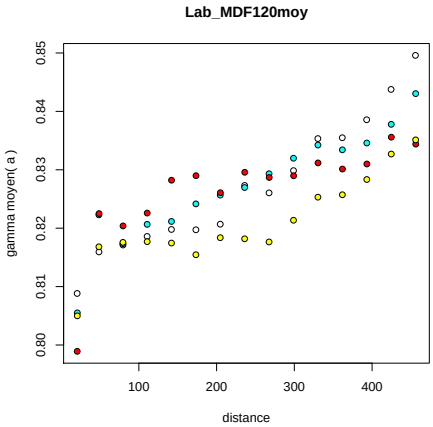
(a) MDF60



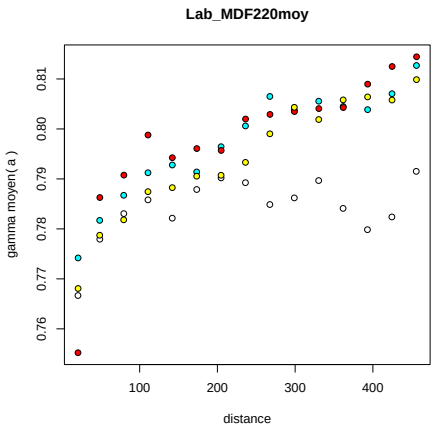
(b) MDF80



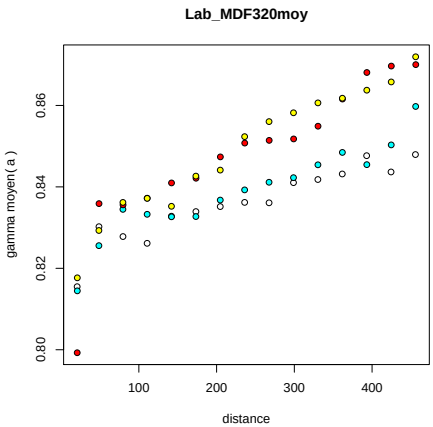
(c) MDF100



(d) MDF120



(e) MDF220



(f) MDF320

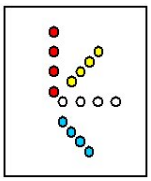
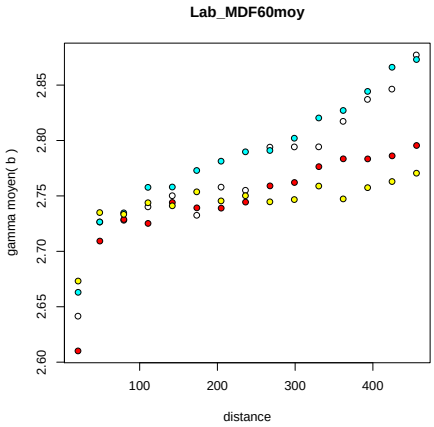
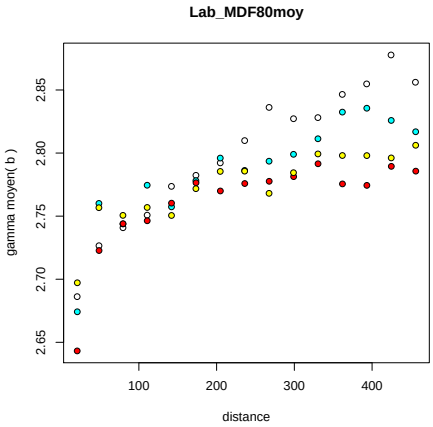


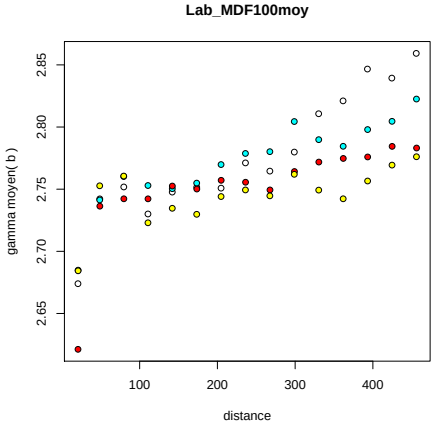
FIG. I.2 – Semi-variogrammes de a calculés sur quatre directions sur les plaques de MDF poncées



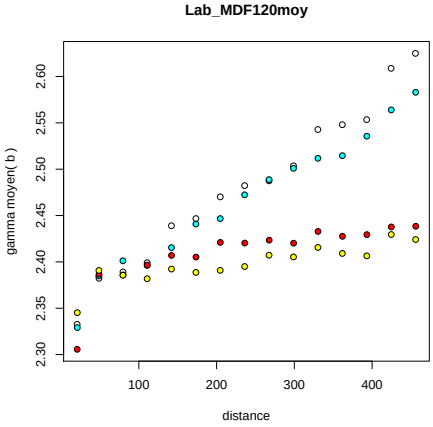
(a) MDF60



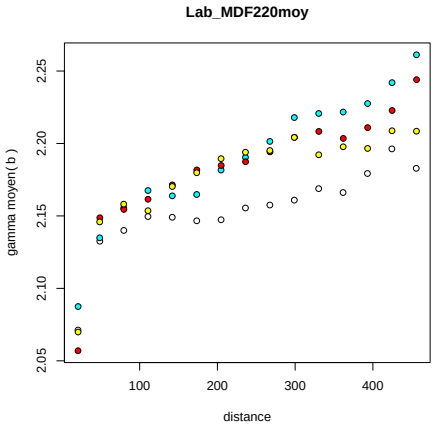
(b) MDF80



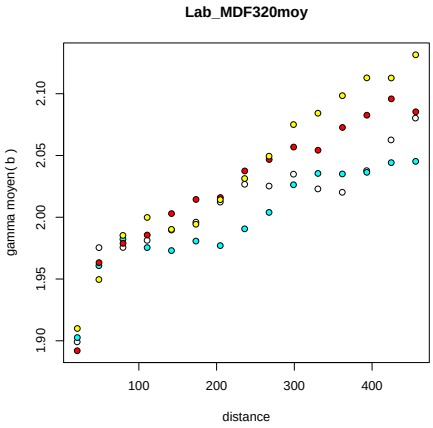
(c) MDF100



(d) MDF120



(e) MDF220



(f) MDF320

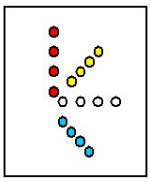
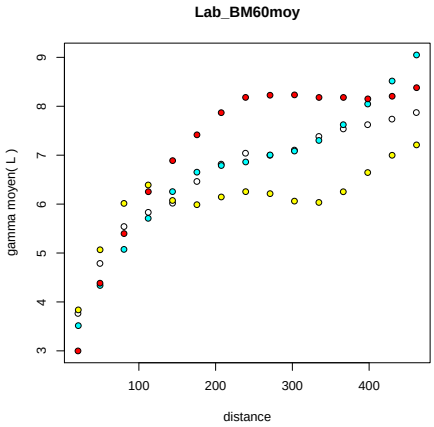
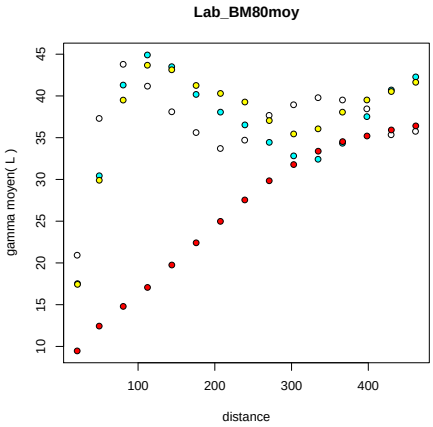


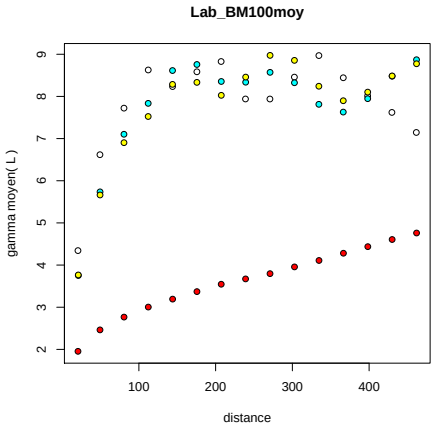
FIG. I.3 – Semi-variogrammes de b calculés sur quatre directions sur les plaques de MDF poncées



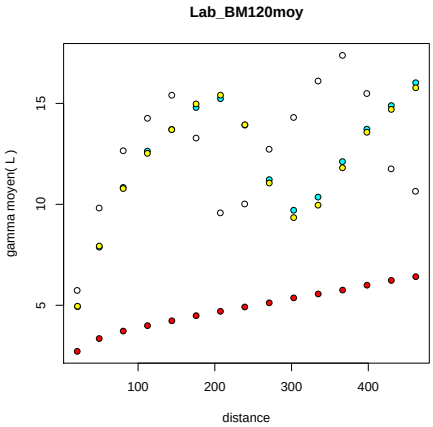
(a) BM60



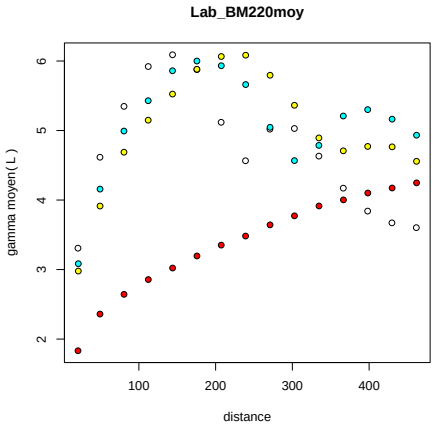
(b) BM80



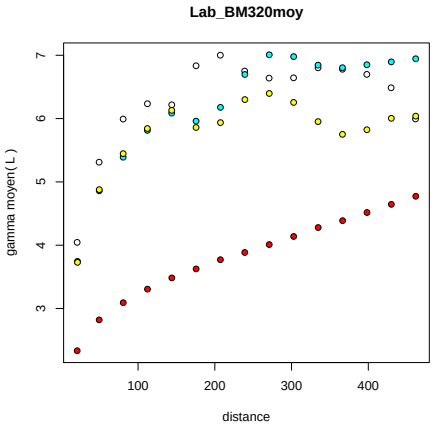
(c) BM100



(d) BM120



(e) BM220



(f) BM320

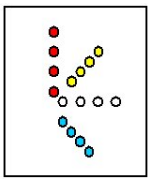
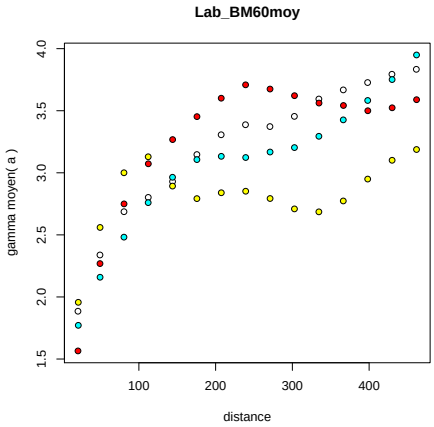
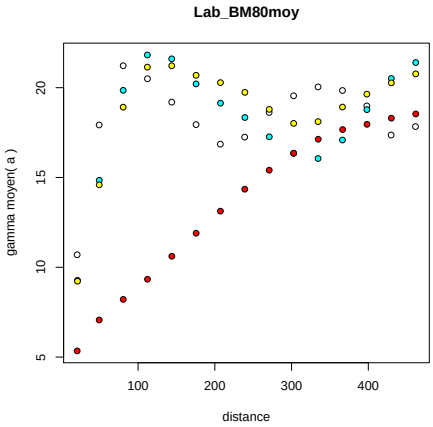


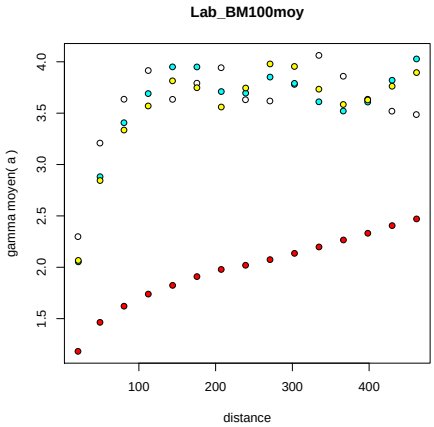
FIG. I.4 – Semi-variogrammes de L calculés sur quatre directions sur les plaques de bois poncées



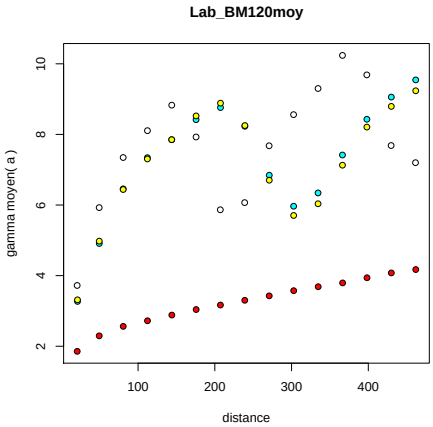
(a) BM60



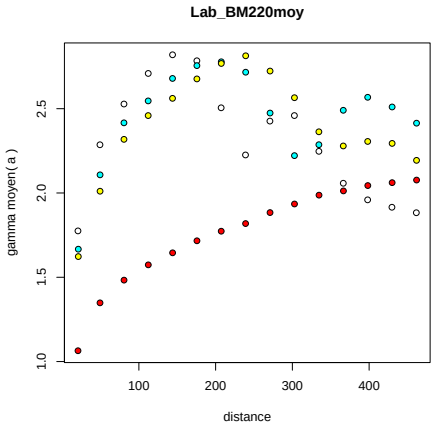
(b) BM80



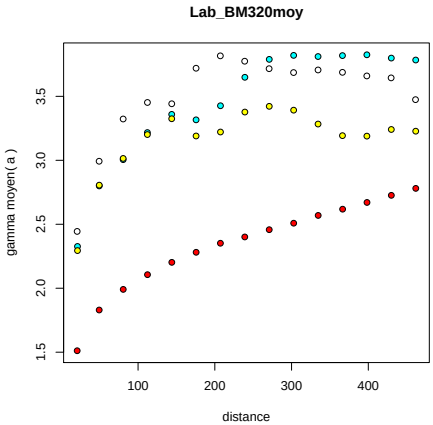
(c) BM100



(d) BM120



(e) BM220



(f) BM320

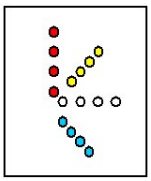
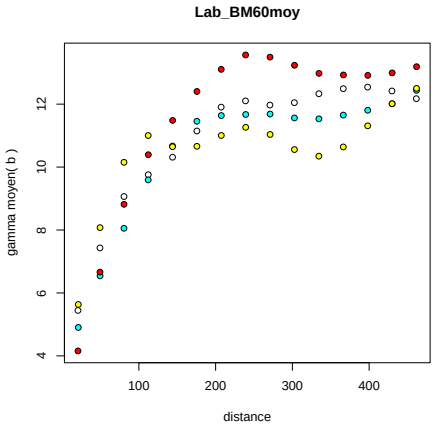
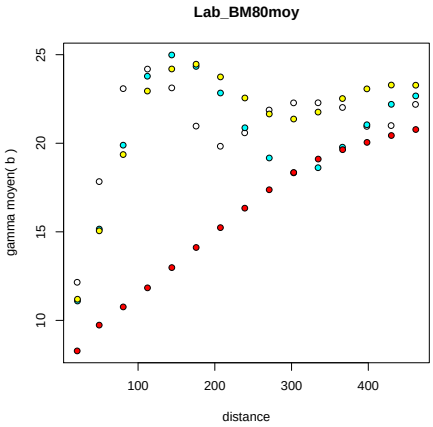


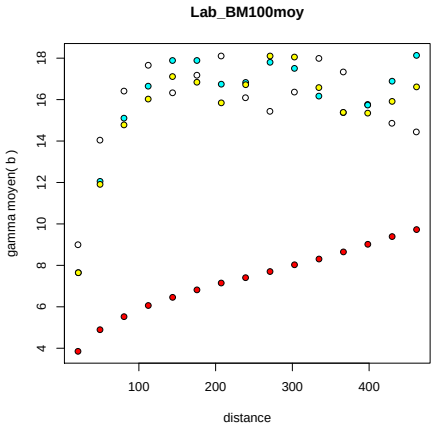
FIG. I.5 – Semi-variogrammes de a calculés sur quatre directions sur les plaques de bois poncées



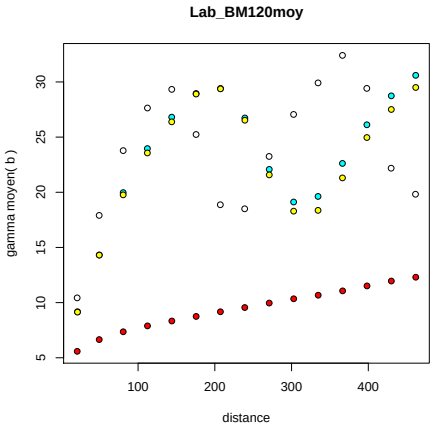
(a) BM60



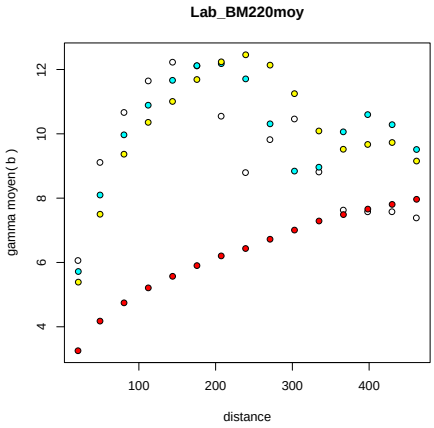
(b) BM80



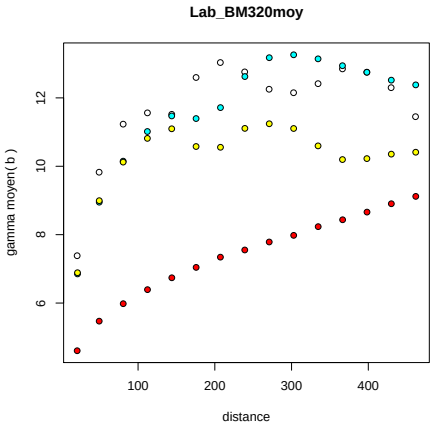
(c) BM100



(d) BM120



(e) BM220



(f) BM320

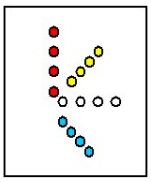


FIG. I.6 – Semi-variogrammes de b calculés sur quatre directions sur les plaques de bois poncées

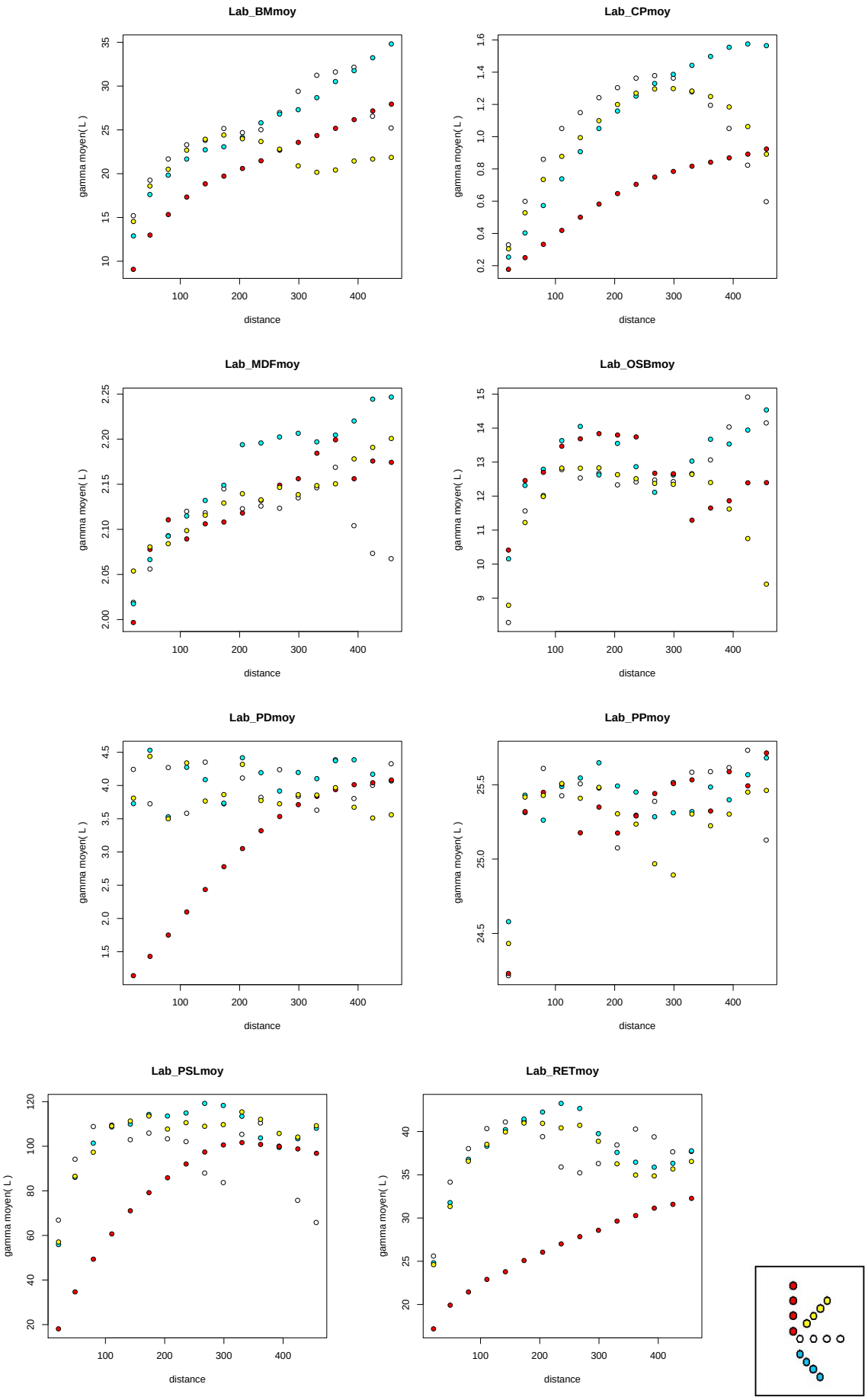


FIG. I.7 – Semi-variogrammes de L calculés sur quatre directions sur les plaques de divers matériaux dérivés du bois

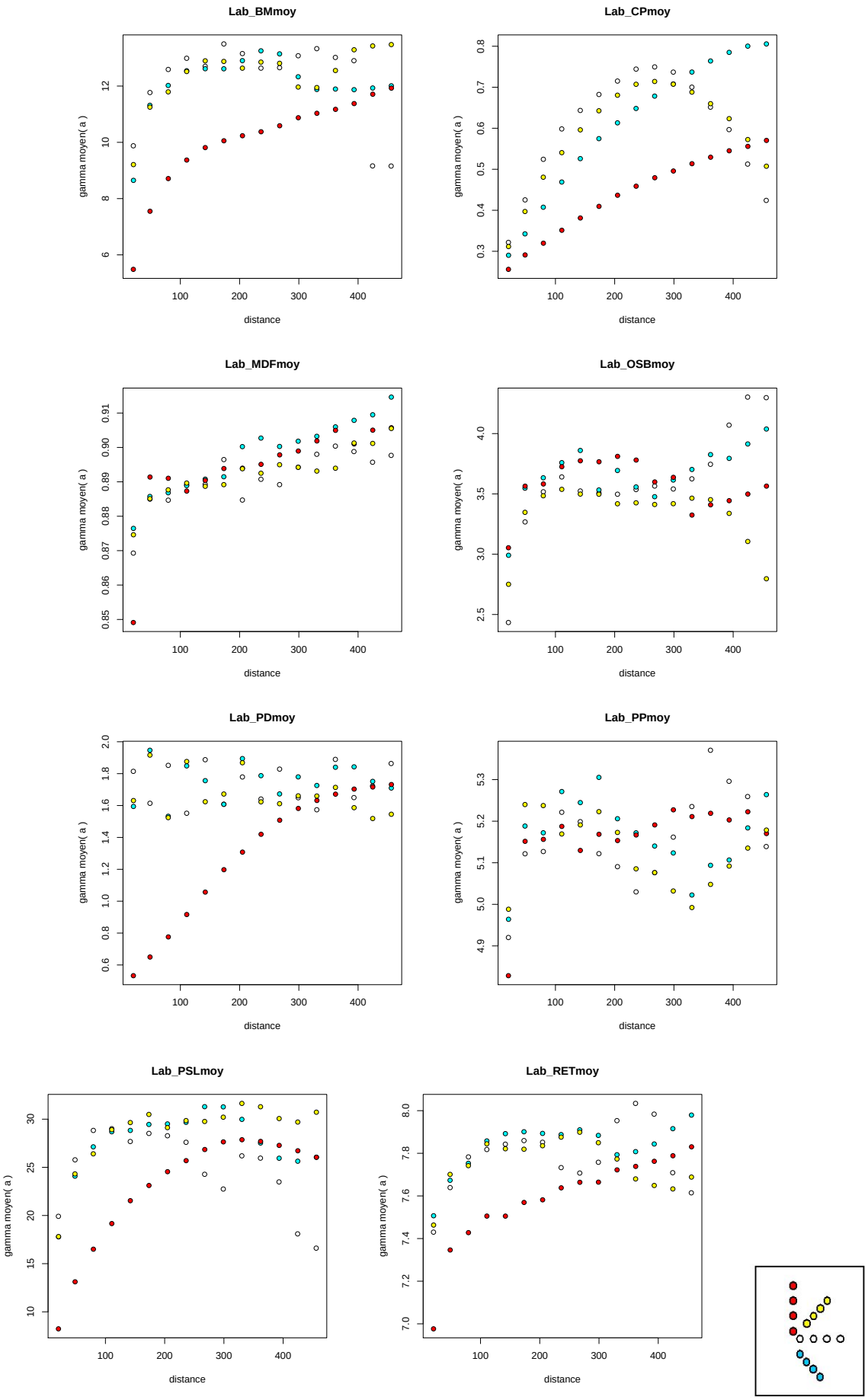


FIG. I.8 – Semi-variogrammes de a calculés sur quatre directions sur les plaques de divers matériaux dérivés du bois

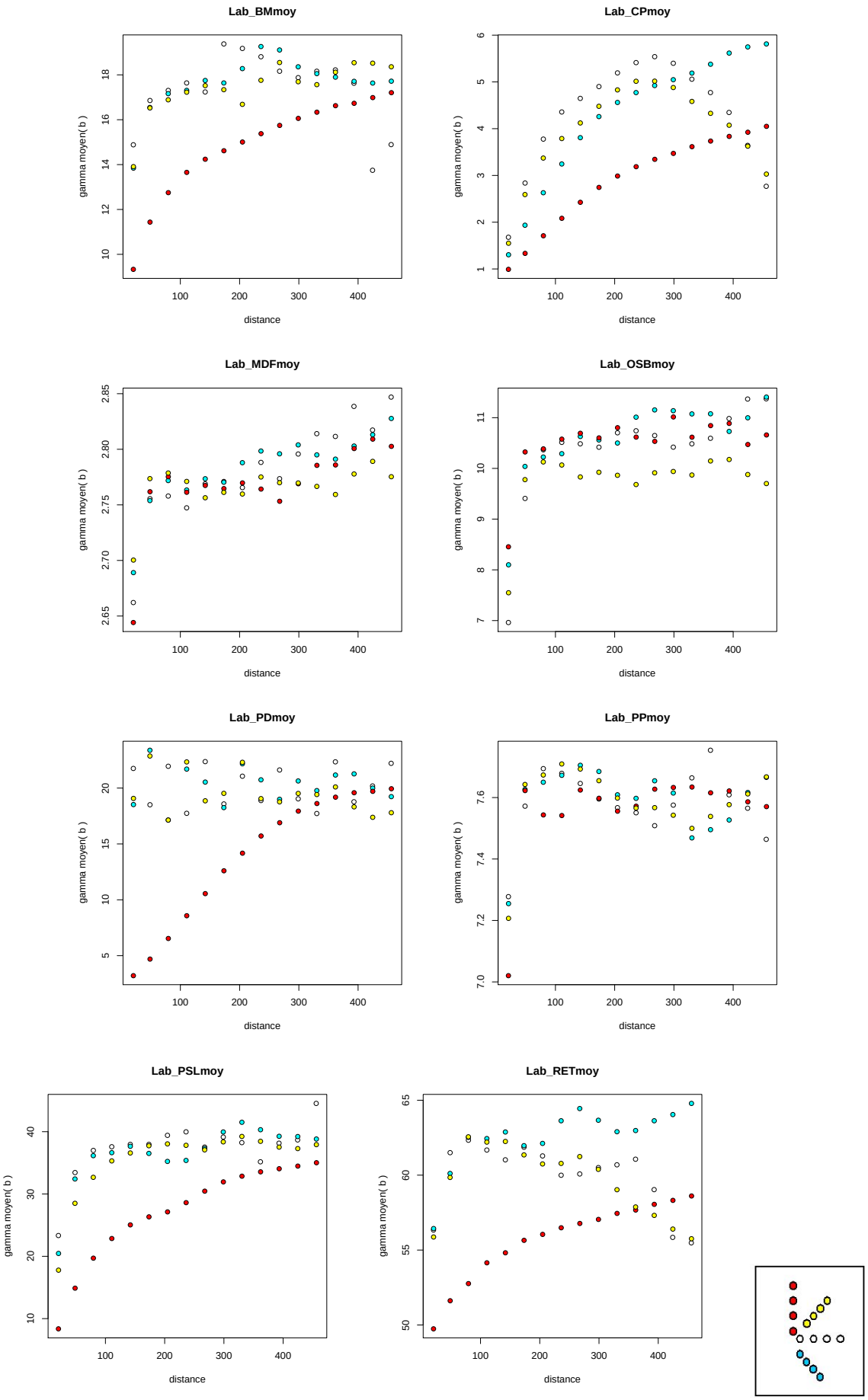
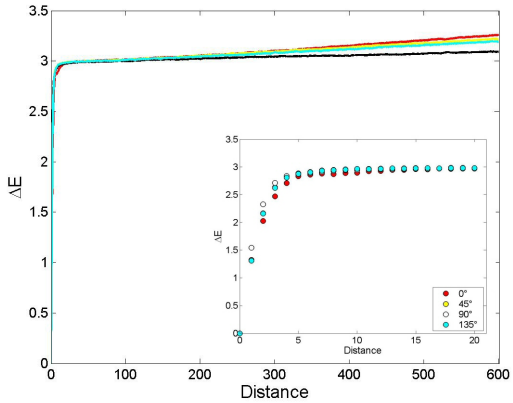


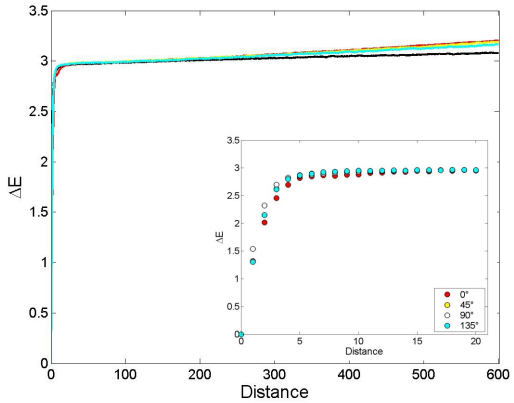
FIG. I.9 – Semi-variogrammes de b calculés sur quatre directions sur les plaques de divers matériaux dérivés du bois

Annexe J

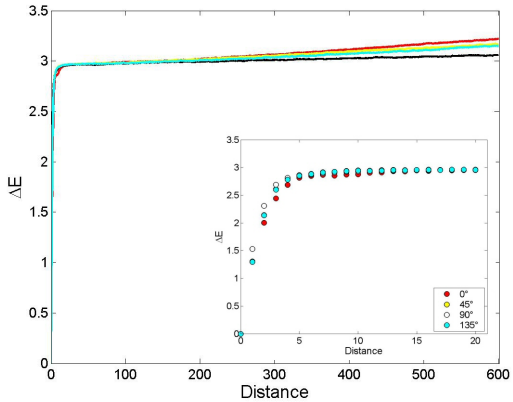
Courbes d'écart de couleur



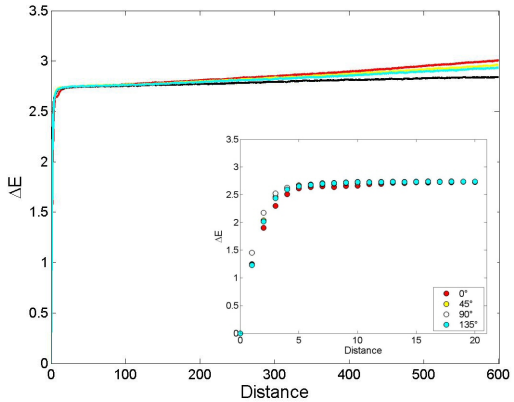
(a) MDF60



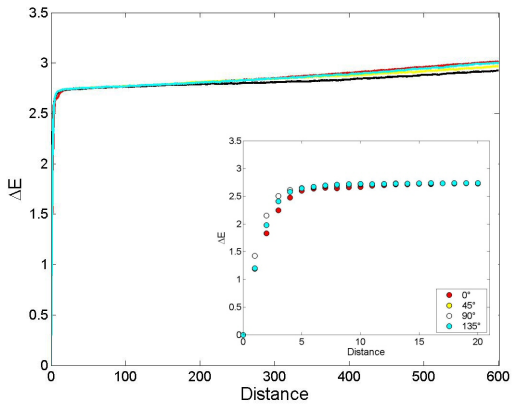
(b) MDF80



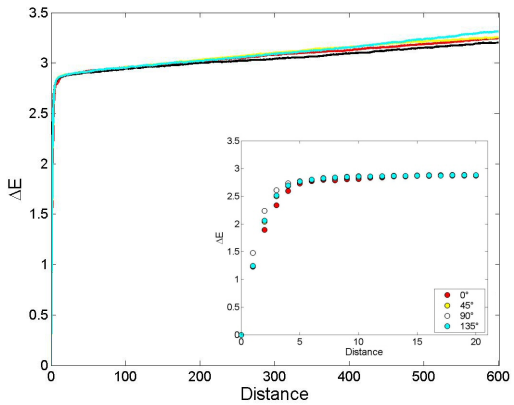
(c) MDF100



(d) MDF120

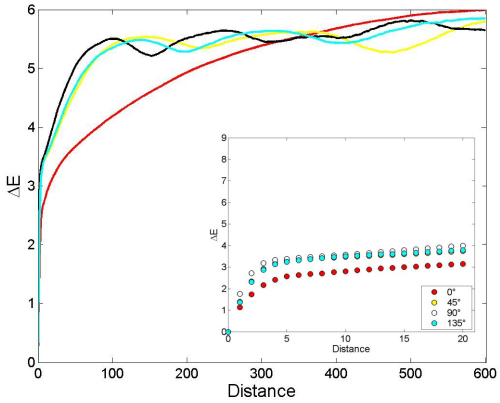


(e) MDF220

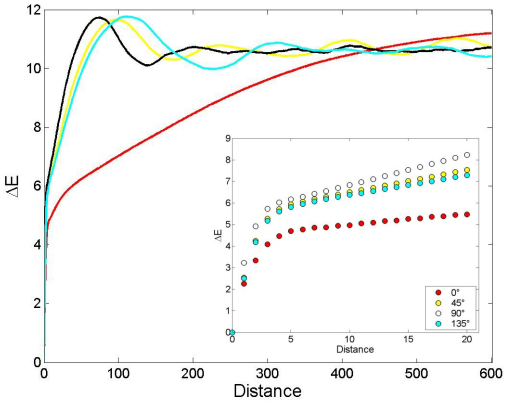


(f) MDF320

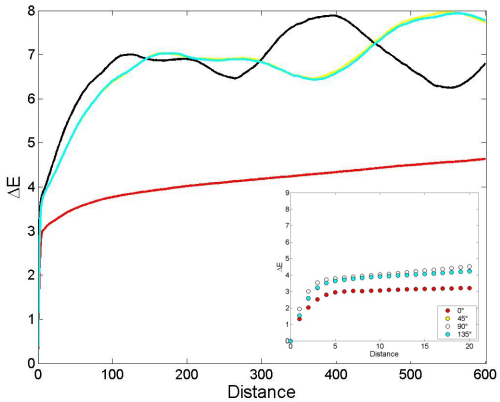
FIG. J.1 – Courbes d'écart de couleur calculées sur quatre directions sur les six plaques MDF poncées



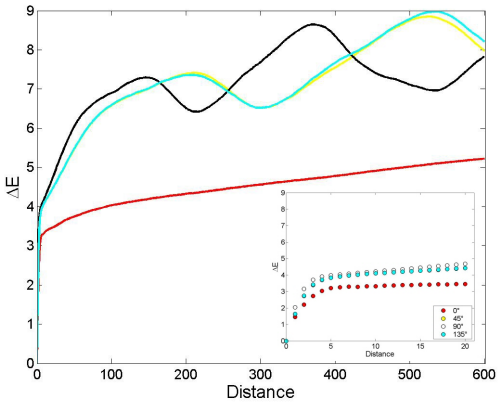
(a) BM60



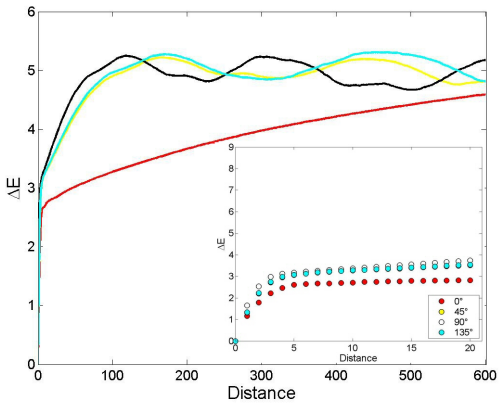
(b) BM80



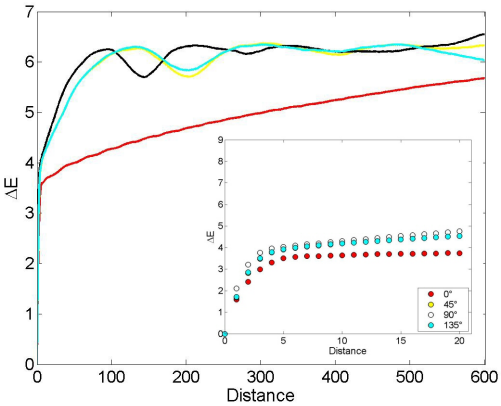
(c) BM100



(d) BM120

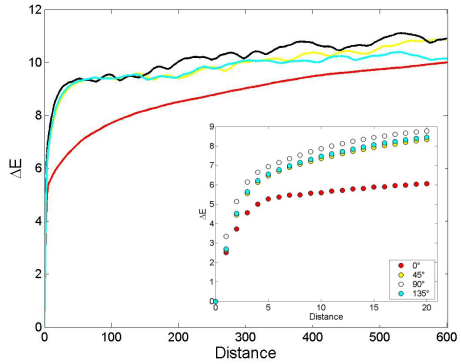


(e) BM220

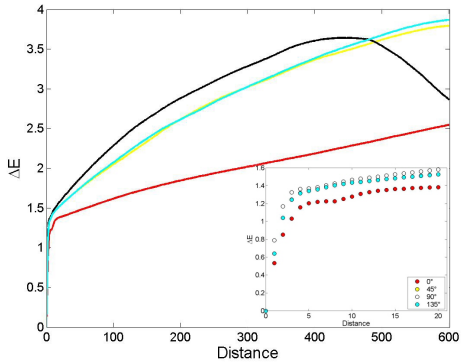


(f) BM320

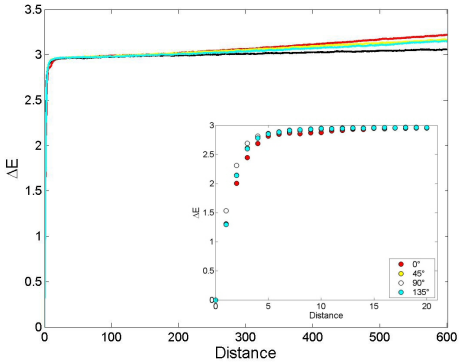
FIG. J.2 – Courbes d'écart de couleur calculées sur 4 directions sur les six plaques de bois poncées



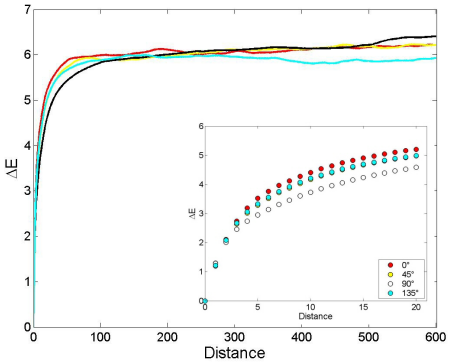
(a) BM



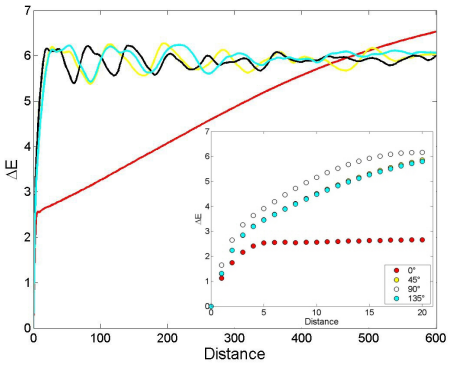
(b) CP



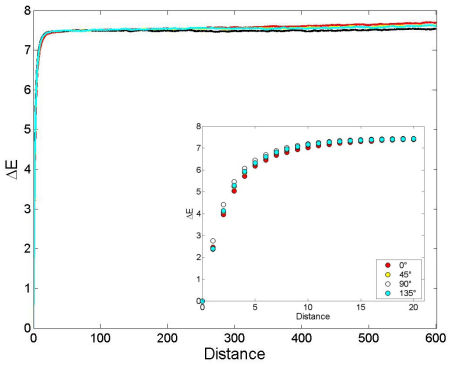
(c) MDF



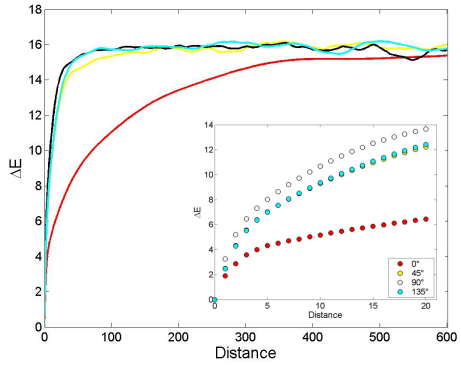
(d) OSB



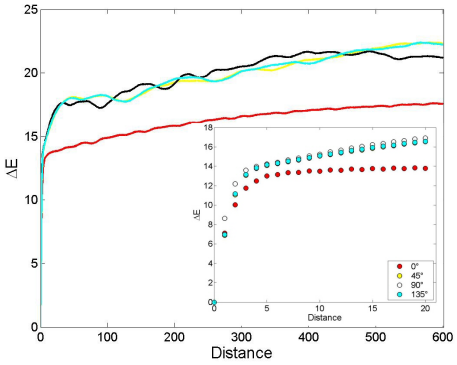
(e) PD



(f) PP



(g) PSL



(h) RET

FIG. J.3 – Courbes d'écart de couleur calculées sur quatre directions sur les plaques des huit matériaux dérivés du bois

RÉSUMÉ

Les industriels sont actuellement de plus en plus nombreux à s'intéresser aux propriétés psychosensorielles de leurs produits. Le toucher, au même titre que les autres sens, joue un rôle important dans la décision d'achat des consommateurs. Ce travail porte sur l'exploration de l'incidence des propriétés topographiques de surface sur les sensations de rugosité au toucher et sur l'influence de la texture couleur sur les perceptions de rugosité tactile. Les expériences ont été menées sur divers matériaux dérivés du bois de pin maritime. Ces matériaux sont soit bruts ou poncés avec différentes tailles de grains. Pour cela, trois études complémentaires ont été réalisées : a) mesures des paramètres de rugosité par deux techniques d'acquisition 3D sans contact, b) acquisitions d'images à l'aide d'un appareil photo numérique sous la même condition d'illumination, c) évaluation sensorielle des échantillons par un panel de sujets naïfs. Les résultats sont confrontés afin de trouver les corrélations entre les propriétés physiques mesurées et les résultats de mesures sensorielles. Les résultats des études ont montré principalement que pour caractériser l'état de surface du bois, il est plus judicieux de prendre en compte des paramètres de rugosité 3D plutôt que de considérer les paramètres 2D. Cette étude a, entre autres, fait apparaître que l'intensité de la rugosité, caractérisée par les paramètres S_a et S_{ds}, n'est pas l'unique stimulus perçu par l'homme au cours du toucher. Les sujets ont par ailleurs intégré d'autres phénomènes dans leur classement, à savoir la présence d'une direction privilégiée de la texture caractérisée par le paramètre S_{tr}, et la présence de petits pics au-dessus de la ligne moyenne (S_{r1}). La texture couleur influence aussi sur la perception de la rugosité au toucher. En effet, pour une surface avec une couleur à structure linéaire, plus le contraste entre les couleurs est important, la surface est présupposée plus rugueuse à la vue. En revanche, une surface ayant une couleur à structure aléatoire est perçue plus rugueuse quand la taille des inclusions est plus grande.

Mots clés *: bois, rugosité, toucher, géostatistiques, image couleur, analyse sensorielle*

ABSTRACT

The proper use and control of the psycho-sensorial properties of commercial materials are important features in industrial processes. Similar to other senses, the sense of touch also plays a major role in the act of purchase. The surface quality of wood material is particularly important in the furniture industry. The objectives of this study are twofold. The first one is to analyze the influence of topographical height of the surfaces of various sanded pine-based engineered wood products on tactile roughness perception. The second objective is to investigate the influence of vision on tactile roughness perception. The following three independent studies were performed to accomplish these objectives : measurement of surface profiles utilizing non contact 3D techniques, image acquisitions by means of digital camera under same lighting conditions, and sensory evaluation by test persons. The relationships between measured physical parameters and sensorial results were then examined. The data suggest that 3D roughness parameters are more interesting than 2D parameters because they can highlight large data trends and feature ; and optical device is more favourable for soft workpiece materials such as wood. Tactile roughness perception can be described with three main dimensions : one dimension is related to the parameters S_a and S_{ds} which characterize the roughness intensity. The second dimension is related to S_{r1} which characterizes the fraction of surface consisting on small peaks above the main plateau. The last dimension is related to S_{tr} which defines spatial isotropy of the surface texture. Moreover, results from this study confirm a strong interaction between color aspect and roughness tactile perception. In case of surface with oriented line structure, a surface is perceived to be rough by the eyes if it has a contrasted texture. In case of surface with random texture, a board is supposed to be rough if the particles size is bigger.

Keywords *: wood, roughness, touch, geostatistics, colour images, sensory analysis*