



HAL
open science

Vibro-acoustic analysis of the peeling process

Louis Etienne Denaud

► **To cite this version:**

Louis Etienne Denaud. Vibro-acoustic analysis of the peeling process. Engineering Sciences [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2006. English. NNT : 2006ENAM0043 . pastel-00002380

HAL Id: pastel-00002380

<https://pastel.hal.science/pastel-00002380>

Submitted on 26 Apr 2007

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.



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité "Mécanique"

*présentée et soutenue publiquement
par*

Louis Etienne DENAUD

le 30 novembre 2006

ANALYSES VIBRATOIRES ET ACOUSTIQUES DU DÉROULAGE

Directeur de thèse : Rémy MARCHAL

Codirecteur(s) de thèse : Laurent BLÉRON

Jury :

M. Frédéric MOTHE, Chargé de recherche INRA, Champenoux Président
M., Laurent SIMON, Professeur, LAUM, Université du Maine, Le Mans Rapporteur
M. Bernard THIBAUT, Directeur de recherche CNRS, ECOFOG, Guyane Rapporteur
M. Laurent BLÉRON, Maître de Conférences, LABOMAP, ENSAM, Cluny Examineur
M. Rémy MARCHAL, Professeur, LABOMAP, ENSAM, Cluny Examineur
M. Alain RATLE, Maître de Conférences, LRMA, ISAT, Nevers Examineur

Laboratoire Bourguignon des Matériaux et des Procédés
ENSAM, CER de Cluny

Remerciements

Je tiens à remercier les membres du jury pour leurs contributions respectives dans l'aboutissement de cette thèse :

M. Laurent SIMON, Professeur des Universités à l'université du Maine et M. Bernard THIBAUT, directeur de recherche CNRS en Guyane, d'avoir accepté de rapporter ces travaux, j'en suis honoré,

M. Alain RATLE, Maître de Conférences au LRMA de l'ISAT de Nevers pour son aide précieuse et ses conseils avisés tout au long de ces trois années,

M. Frédéric MOTHE, Chargé de recherche INRA, d'avoir accepté de présider ce jury,

Et bien sûr MM. Rémy MARCHAL et Laurent BLERON, respectivement Professeur des Universités de l'ENSAM et Maître de Conférences au LABOMAP à Cluny. Ils ont toujours fait beaucoup plus que m'encadrer pendant cette thèse. Merci à tous les deux.

Merci aussi aux entreprises partenaires et à leurs personnels : B.D.A., BRUGERE, LA BOISSEROLE, LACROIX et LES PLACAGES DU CHÂTILLON. Leur aide dans la définition du problème a été essentielle.

Je voudrais également remercier toutes les personnes qui ont contribué à ce travail, certes personnel, mais qui ne peut s'effectuer sans aide : Romaric MASSET, toujours disponible et impliqué, les membres de l'équipe bois (en particulier Jean-Glaude BUTAUD, Robert COLLET, Fabrice COTTIN, Jean DIOCHON, incroyables partenaires sans lesquels des nuits entières n'auraient pas suffi à écorcer tous ces rondins), les membres de l'équipe UGV, compétents et ouverts, l'équipe d'IVALSA-CNR de TRENTO (notamment Martino NEGRI et Jakub SANDAK qui sont les concepteurs des instruments de caractérisation utilisés), Julien CHERET (ingénieur commercial B&K) pour son soutien indéfectible, les membres du labo E.E.A. pour leur travail formidable sur la microdérouleuse, ainsi que tous les membres du personnel de l'ENSAM dont j'ai sollicité l'aide et qui ont toujours dépassé mes attentes.

Enfin, un immense merci à ceux qui ont partagé ma vie avant, pendant et qui la partageront après cette thèse : mes parents Jean et Chantal, mon frère Johan, ma sœur Marie-Caroline, mes amis et plus que quiconque Natacha.

Table des Matières

TABLE DES MATIERES	5
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	11
INTRODUCTION GENERALE	17
PARTIE I : GENERALITES SUR LE MATERIAU BOIS	21
1 DE L'ARBRE AU BILLON	21
2 LA STRUCTURE DU BOIS.....	23
2.1 ASPECTS ANATOMIQUES GENERAUX DU BOIS.....	23
2.2 LE PLAN LIGNEUX DES FEULLUS	24
2.3 L'ULTRASTRUCTURE.....	25
3 LES SPECIFICITES D'UN MATERIAU D'ORIGINE BIOLOGIQUE.....	26
3.1 INFLUENCE DES CONDITIONS EXTERIEURES	27
3.2 LE BOIS DE REACTION	27
3.3 LE BOIS JUVENILE	28
4 COMPORTEMENT MECANIQUE DU BOIS VERT ET DEROULAGE	29
4.1 BOIS ET EAU.....	29
4.2 INFLUENCE DE LA DENSITE	30
4.3 INFLUENCE DE LA TEMPERATURE.....	30
4.4 INFLUENCE DE LA VITESSE DE DEFORMATION	32
PARTIE II : LA COUPE PAR DEROULAGE.....	35
1 DEFINITIONS ET GENERALITES.....	35
1.1 LA FORMATION DU COPEAU EN MODE 0-90.....	35
1.2 GEOMETRIE DE LA ZONE DE COUPE.....	36
1.2.1 <i>Le couteau</i>	37
1.2.2 <i>La barre de pression</i>	37
2 LA FORMATION DU PLACAGE	37
2.1 PRINCIPE EN L' ABSENCE DE BARRE DE PRESSION	38
2.1.1 <i>Mécanisme général</i>	38
2.1.2 <i>La fissuration</i>	40
2.2 INTERVENTION DE LA BARRE DE PRESSION	45
2.3 L'EFFET HORNER.....	49
3 DEFAUTS DES PLACAGES DEROULES	49
3.1 COURBURE RESIDUELLE DU PLACAGE.....	51
3.2 LES VARIATIONS D'EPAISSEUR.....	51
3.2.1 <i>Dans le sens du fil du bois</i>	52
3.2.2 <i>Dans le sens tangentiel perpendiculaire au fil</i>	52

3.3	LA FISSURATION	54
3.4	L'ETAT DE SURFACE	54
4	APPROCHE DYNAMOMETRIQUE EN VUE D'UNE COMMANDE ADAPTATIVE.....	56
4.1	DECOMPOSITION DE L'EFFORT DE COUPE.....	56
4.2	MODELE SIMPLIFIE DES EFFORTS DE COUPE	58
4.2.1	<i>F_d</i>	58
4.2.2	<i>F_a</i>	58
4.3	INTERPRETATION DES EFFORTS	59
4.3.1	<i>Le bois</i>	60
4.3.2	<i>Les paramètres de coupe</i>	64
4.3.3	<i>Les effets de l'usure de l'outil</i>	68
4.4	SYNTHESE EN VUE D'UNE COMMANDE ADAPTATIVE.....	69
	PARTIE III : ETAT DE L'ART DES ANALYSES VIBRATOIRES ET ACOUSTIQUES SUR	
	MACHINES TOURNANTES	73
5	ORGANISATION ET PRE REQUIS.....	73
5.1	CONTEXTE	73
5.2	PROPRIETES DES SIGNAUX VIBRATOIRES DES MACHINES TOURNANTES	74
6	APPROCHES TEMPORELLES	75
6.1	EXPLOITATION DES DONNEES BRUTES : CHOIX DES INDICATEURS	76
6.1.1	<i>Descripteurs discrets</i>	76
6.1.2	<i>Techniques de moyennage statistiques</i>	78
6.2	PRETRAITEMENTS DES DONNEES.....	80
6.2.1	<i>Filtrage</i>	80
6.2.2	<i>Démodulation</i>	82
6.2.3	<i>Ré-échantillonnage cyclostationnaire</i>	83
6.2.4	<i>Séparation des sources du bruit de fond</i>	83
7	APPROCHES FREQUENTIELLES	84
7.1	ANALYSE EN BANDES D'OCTAVE	84
7.2	UTILISATION DE LA TRANSFORMATION DE FOURIER	85
7.2.1	<i>Prélude</i>	85
7.2.2	<i>Analyse du contenu d'un spectre</i>	87
7.2.3	<i>Outils et propriétés supplémentaires</i>	91
8	APPROCHES TEMPS-FREQUENCE.....	93
9	SYNTHESE.....	95
	PARTIE IV : DISPOSITIFS ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.....	99
1	ENQUETE AUPRES DES OPERATEURS.....	99
2	MISE EN PLACE D'UN BANC D'ESSAI.....	101
2.1	LA MICRODEROULEUSE.....	101
2.1.1	<i>Rapide descriptif</i>	101
2.1.2	<i>Pourquoi cette machine ?</i>	103
2.2	MISE EN PLACE DU DISPOSITIF DE MESURE.....	106

2.2.1	<i>Les Contraintes</i>	106
2.2.2	<i>Solutions employées</i>	107
2.3	CARACTERISATION MECANIQUE DE LA MICRODEROULEUSE	110
2.3.1	<i>Fixation des outils</i>	110
2.3.2	<i>Sonnage</i>	111
2.3.3	<i>Essais à vide et Usinage d'un matériau de référence</i>	116
3	PROCEDURES EXPERIMENTALES	118
3.1	CHOIX DES ESSENCES ET PREPARATION DES EPROUVETTES	118
3.2	PLAN D'EXPERIENCE : CHOIX DES VARIABLES ET DES NIVEAUX	119
3.3	DEROULEMENT DES ESSAIS	122
4	CARACTERISATION DES PLACAGES	122
4.1	MESURE DE LA FISSURATION	122
4.1.1	<i>Approche visuelle</i>	123
4.1.2	<i>Martinomètre</i>	124
4.2	MESURES DE DENSITE	126
4.3	MESURES DES VARIATIONS D'EPAISSEUR	128
4.3.1	<i>Mesures en ligne</i>	128
4.3.2	<i>Utilisation du Martinomètre et du densimètre</i>	128
4.4	LE CAS DE L'ETAT DE SURFACE	129
PARTIE V : APPROCHE TEMPORELLE DU DEROULAGE : ANALYSE PHENOMENOLOGIQUE GLOBALE		
		131
1	QUALITE GLOBALE DU PLACAGE	131
1.1	ETAT DE SURFACE	131
1.2	LA FISSURATION	132
1.2.1	<i>Fissuration moyenne des placages</i>	132
1.2.2	<i>Lien entre fréquence et profondeur des fissures</i>	134
1.3	VARIATION D'EPAISSEUR EN LIGNE	135
1.3.1	<i>Méthodologie</i>	135
1.3.2	<i>Exemples de résultats</i>	137
1.3.3	<i>Analyse des mesures de l'épaisseur des placages</i>	138
1.3.4	<i>Analyse des périodes d'oscillation</i>	143
1.4	SYNTHESE SUR L'APPROCHE DE LA QUALITE GENERALE DU PLACAGE	144
2	LES EFFORTS	145
2.1	MESURE DU COEFFICIENT DE FROTTEMENT	145
2.2	LES EFFORTS EXERCES PAR LE COUTEAU	147
2.2.1	<i>Fa ou FXc ?</i>	147
2.2.2	<i>Fd ou FYc ?</i>	150
2.2.3	<i>Choix du repère</i>	152
2.3	LES EFFORTS SUR LA BARRE	154
3	SIGNATURE VIBRATOIRE DES PHENOMENES OBSERVES	155
3.1	VIBRATIONS DU COUTEAU	157
3.1.1	<i>Calcul du RMS</i>	157

3.1.2	<i>Calcul du Kurtosis</i>	166
3.2	VIBRATIONS DE LA BARRE	167
3.3	MESURES ACOUSTIQUES : SPL	169
3.4	LE CAS DES VARIATIONS D'ÉPAISSEUR.....	170
3.5	SYNTHESE.....	170
PARTIE VI : APPORTS DES ANALYSES EN FREQUENCE ET TEMPS-FREQUENCE AU SUIVI DU DEROULAGE.....		173
1	ANALYSES VIBRATOIRES ET ACOUSTIQUES DANS LE DOMAINE SPECTRAL.....	173
1.1	LA FISSURATION	173
1.1.1	<i>Méthodes de mesure des fréquences de fissuration moyennes</i>	174
1.1.2	<i>Sensibilité de la méthode de mesure</i>	184
1.1.3	<i>Influence des paramètres de coupe sur la fréquence moyenne de fissuration des placages</i>	190
1.2	PARAMETRES DE COUPE.....	192
1.2.1	<i>Vitesse de coupe</i>	192
1.2.2	<i>Épaisseur</i>	193
1.2.3	<i>Dépouille et usure</i>	193
1.2.4	<i>Essence et densité</i>	196
1.2.5	<i>Barre de pression</i>	197
2	SPECTROGRAMME.....	199
2.1	FISSURATION ET ARRACHEMENTS	199
2.2	ROLE DE LA BARRE DE PRESSION	200
2.2.1	<i>Premier tour</i>	200
2.2.2	<i>Barre de pression et variations d'épaisseur</i>	202
2.2.3	<i>Influence de la vitesse de coupe</i>	204
PARTIE VII : APPROCHE TEMPORELLE DU DEROULAGE : ANALYSE LOCALE DU MECANISME DE FISSURATION.....		207
1	ANALYSE DES MESURES DE QUALITE DU PLACAGE.....	207
1.1	VARIATIONS D'ÉPAISSEUR	207
1.1.1	<i>Mesurées par le Martinomètre</i>	207
1.1.2	<i>Mesurées par le densimètre</i>	209
1.2	MESURES DE LA FISSURATION AVEC LE MARTINOMETRE	210
1.2.1	<i>Démarche de traitement des données</i>	210
1.2.2	<i>Influence des hétérogénéités de densité sur la position des fissures avant séchage</i>	214
2	SIGNATURE VIBRATOIRE DE LA FISSURATION.....	215
2.1	VISUALISATION	215
2.2	PROCEDURE DE DETECTION	217
2.2.1	<i>Principe</i>	217
2.2.2	<i>Choix des paramètres</i>	219
2.3	CARACTERISATION DES PLACAGES	221
3	CONCLUSION : VERS UNE MESURE DU TAUX DE FISSURATION	222
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		225

1	LE SUIVI DE LA QUALITE DU PLACAGE DEROULE.....	225
1.1	LA FISSURATION CYCLIQUE DU PLACAGE.....	225
1.2	VARIATIONS D'EPAISSEUR	226
2	COMPORTEMENT VIBRATOIRE ET PARAMETRES DE COUPE.....	226
3	PERSPECTIVES.....	227
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	231
	ANNEXE I	6 p.
	ANNEXE II	11 p.

Table des illustrations

FIGURE 1 : ENROULAGE DU PLACAGE EN SORTIE DE DEROULAGE	17
FIGURE 2 : COUPE TRANSVERSALE D'UN BILLON DE DOUGLAS (PSEUDOTSUGA MENZIESII)	22
FIGURE 3 : ORIGINE D'UN NŒUD SUR UNE COUPE RADIALE D'UN BOIS DE CERISIER.....	23
FIGURE 4 : DIRECTIONS PRIVILEGIEES D'UN BOIS DE RESINEUX OBSERVE AU UN M.E.B.....	23
FIGURE 5 : PLAN LIGNEUX D'UN FEILLU.....	25
FIGURE 6 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTES COUCHES CONSTITUANT LA PAROI CELLULAIRE	26
FIGURE 7 : MISE EN EVIDENCE VISUELLE D'UN SECTEUR ANGULAIRE (90° ENVIRON) DE BOIS DE REACTION : (A) BOIS DE COMPRESSION (PIN SYLVESTRE) (B) BOIS DE TENSION (CHATAIGNIER), D'APRES [RAPPORT D'ACTIVITE LMGC _1999-2002].	27
FIGURE 8 : OBSERVATION DE LA COUCHE G DU BOIS DE TENSION DE PEUPLIER	28
FIGURE 9 : INFLUENCE DU TAUX D'HUMIDITE SUR LE MODULE ELASTIQUE LONGITUDINAL D'ECHANTILLONS DE CHENE.....	30
FIGURE 10 : EVOLUTION DE 12 CRITERES MECANQUES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE POUR UNE ESSENCE TROPICALE.....	31
FIGURE 11 : EVOLUTION DE LA CONTRAINTE LIMITE ELASTIQUE RADIALE DE COMPRESSION (A) EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA VITESSE DE DEFORMATION ET (B) DE LA CONTRAINTE DE COMPRESSION RADIALE EN FONCTION DE LA DEFORMATION POUR DIFFERENTES TENEURS EN EAU ET DIFFERENTES VITESSES DE DEFORMATION POUR LE BOIS D'EPICEA D'APRES [UHMEIER_1996]... ..	33
FIGURE 12 : MODES PRINCIPAUX DE COUPE DU BOIS.....	35
FIGURE 13 : TYPES DE FORMATION DE COPEAUX D'APRES [FRANZ_1958].....	35
FIGURE 14 : GEOMETRIE DU DEROULAGE [DECES-PETIT_1996].....	36
FIGURE 15 : FORMATION DU COPEAU SANS BARRE DE PRESSION D'APRES [THIBAUT_1988].....	38
FIGURE 16 : OUVERTURE ET CHEMINEMENT D'UNE FISSURE DE DEROULAGE D'APRES [THIBAUT_1988].....	40
FIGURE 17: DIRECTIONS DE COUPE	44
FIGURE 18 : PRINCIPAUX PHENOMENES MECANIQUES INTERVENANT LORS DU DEROULAGE AVEC BARRE DE PRESSION D'APRES [THIBAUT ET BEAUCHÊNE_2004]	45
FIGURE 19 : SCHEMA DES CONSEQUENCES DE L'UTILISATION DE LA BARRE DE PRESSION SUR L'EPAISSEUR DU PLACAGE DEROULE.....	47
FIGURE 20 : EFFET HORNER D'APRES [MOTHE_1988].....	49
FIGURE 21 : PLACAGE RUGUEUX MICRODEROULE DE HETRE.....	53
FIGURE 22 : VARIATION D'EPAISSEUR D'APRES [DECES -PETIT_1996] (PEUPLIER, $Ep=1\text{mm}$, $\delta=1^\circ$, $Vc=1\text{m/s}$).....	53
FIGURE 23 : VARIATION DE L'ANGLE DE FROTTEMENT EN FONCTION DE LA VITESSE DE COUPE (CHATAIGNER) D'APRES [BEAUCHÊNE_1996]	57
FIGURE 24 : DECOMPOSITION DE L'EFFORT TOTAL SUR LES DEUX FACES DE L'OUTIL EN F_a ET F_d D'APRES [THIBAUT_1988]	57
FIGURE 25 : EFFORTS SUR LA BARRE DE PRESSION	57
FIGURE 26 : EFFORTS DE COUPE ET EPAISSEUR DES PREMIERS PLACAGES SUIVANT LA MISE AU ROND (DISQUE DE DOUGLAS, $Ep=0.6\text{mm}$, $\delta=2^\circ$, $Vc=5\text{mm/s}$).....	60
FIGURE 27 : EVOLUTION DES EFFORTS ET DE LA DENSITE DANS UN BOIS TRES HETEROGENE D'APRES [THIBAUT_1988]	61
FIGURE 28 : INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DE PASSE SUR LES EFFORTS DE COUPE POUR LE HETRE D'APRES [THIBAUT_1988].....	64
FIGURE 29 : EFFORT DE COUPE FRONTAL D'UN PLACAGE FISSURE D'APRES [KINOSHITA_1984]	65
FIGURE 30 : EVOLUTION F_d AVEC L'ANGLE DE DEPOUILLE ET LE RAYON DE DEROULAGE D'APRES [THIBAUT_1988]	66
FIGURE 31 : INFLUENCE DE LA VITESSE DE COUPE SUR F_a ET F_d DANS LE NOYER D'APRES [DECES-PETIT_1996] ($Ep=1\text{mm}$ ET $\Delta=0^\circ$)	68
FIGURE 32 : EVOLUTION DES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DE LA LONGUEUR USINEE (HETRE, $Ep=0.3\text{mm}$, $\Delta=1^\circ$, $Vc=1\text{m/s}$) D'APRES [DJOUADI ET AL_1999].....	69
FIGURE 33 : PARAMETRES INTERVENANTS DANS LE DEROULAGE ET ARCHITECTURE POSSIBLE DE LA COMMANDE DE LA MACHINE D'APRES [MARCHAL ET MESSI N'DONGO_1998].....	70
FIGURE 34 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA DISTRIBUTION D'UNE VARIABLE ALEATOIRE DANS TROIS CAS CARACTERISTIQUES	79
FIGURE 35 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE ET EXPRESSIONS SIMPLIFIEES (DEPHASAGE NUL) D'UNE MODULATION D'AMPLITUDE (A ONDE MODULANTE, B ONDE PORTEUSE, C ONDE MODULEE)	82
FIGURE 36 : SPECTRE D'UNE MODULATION SINUSOÏDALE	82
FIGURE 37: DECOMPOSITION D'UN SIGNAL VIBRATOIRE [ANTONI_2004].....	84
FIGURE 38 : SPECTRES DE PUISSANCE DES SIGNAUX SONORES POUR DEUX COPEAUX CARACTERISTIQUES (A CONTINUE, B FISSURE)	88
FIGURE 39 : INFLUENCE DE L'USURE SUR LE SPECTRE SONORE D'APRES [KOPAC_2001] (VB : USURE EN DEPOUILLE).....	88
FIGURE 40 : ACCELERATION EN FONCTION DU TEMPS D'USINAGE EN TOURNAGE DES METAUX D'APRES [LIM_1995]	90
FIGURE 41 : ENTREE, SORTIE D'UN SYSTEME LINEAIRE INVARIANT.....	92
FIGURE 42 : COHERENCE DES SPECTRES DES SIGNAUX VIBRATOIRES EN TOURNAGE D'APRES [LI ET AL_1997].....	93

FIGURE 43 : A, WATERFALL DES VIBRATIONS TANGENTIELLES EN PERÇAGE D'APRES [EL-WAERDANY ET AL_1996], B, CONTOUR DE LA COMPOSANTE TANGENTIELLE DE L'EFFORT DE COUPE EN TOURNAGE D'APRES [DILMA ET LISTER_2000].....	94
FIGURE 44 : RATIO DE L' AIRE SOUS LES COURBES DE DSP DE DEUX BANDES DE FREQUENCE EN FONCTION DU NOMBRE DE PASSES EN DEFONÇAGE D'APRES [LEMASTER ET AL (B)_2000]	94
FIGURE 45 : PARTIE MECANIQUE DE LA MICRODEROULEUSE.....	102
FIGURE 46 : SCHEMA DE PRINCIPE DU DYNAMOMETRE DU COUPEAU	103
FIGURE 47 : PENDULE DE CHARDIN.....	104
FIGURE 48 : EVOLUTION DE LA VITESSE DE ROTATION DU BILLON EN FONCTION DU RAYON DE DEROULAGE A VITESSE LINEAIRE CONSTANTE (VC EN M/S, EP=3 MM).....	105
FIGURE 49 : VUE EN 3D DU COUPEAU ET DE LA BARRE DE PRESSION REALISES	107
FIGURE 50 : DISPOSITIF DE MESURE DES EFFORTS (FXC, FYC, FXB, FYB), DES VIBRATIONS (XC, YC, XB, YB) ET DES SONS.....	108
FIGURE 51 : FIXATION DU COUPEAU SUR LE PORTE-OUTIL ET DU PORTE-OUTIL SUR LA COURONNE D'APRES [BUTAUD_1994].....	111
FIGURE 52 : DIRECTION ET LOCALISATION DES POINTS SOLLICITES AVEC LE MARTEAU INSTRUMENTE	112
FIGURE 53 : SONNAGE DANS LA DIRECTION DE COUPE X ; A FONCTIONS DE TRANSFERT (XC, MARTEAU) EN DB (REFERENCE 1M/S ²) ; B FONCTIONS DE COHERENCE (XC, MARTEAU)	113
FIGURE 54 : SONNAGE DANS LA DIRECTION RADIALE Y ; A FONCTIONS DE TRANSFERT (YC, MARTEAU) EN DB (REFERENCE 1M/S ²) ; B FONCTIONS DE COHERENCE (YC, MARTEAU)	114
FIGURE 55 : SONNAGE DANS LA DIRECTION DE COUPE X EN (1), A FONCTIONS DE TRANSFERT EN DB (REFERENCE 1M/S ²) ; B FONCTIONS DE COHERENCE.....	115
FIGURE 56 : SPECTRES DE XC (A) ET YC (B), ET DU MICRO (C) PENDANT UN ENREGISTREMENT A VIDE ET LORS D'UN DEROULAGE DE PTFE ET DE HETRE (VC=0.5M/S ; EP=1MM).....	117
FIGURE 57 : PREPARATION SPECIFIQUE DES EPROUVETTES DES ESSAIS 108 A 125	119
FIGURE 58 : SCHEMA DE PRINCIPE DES ESSAIS REALISES.....	120
FIGURE 59 : PLACAGE FISSURE DE HETRE Gx20.....	124
FIGURE 60 : MARTINOMETRE.....	124
FIGURE 61 : RELEVÉ TYPIQUE DU MARTINOMETRE (HETRE, SANS BARRE, EP=2.7MM)	126
FIGURE 62 : MONTAGE DE MESURE DU PROFIL DE DENSITE D'UN PLACAGE	127
FIGURE 63 : MESURE D'UN PLACAGE DE DOUGLAS DE 2.3 MM D'ÉPAISSEUR AVEC LE DENSIMETRE EXPERIMENTAL.....	127
FIGURE 64 : PLACAGE RUGUEUX	128
FIGURE 65 : ARRACHEMENTS SUR LE BILLON DE HETRE SUITE A LA FABRICATION D'UN PLACAGE RUGUEUX	132
FIGURE 66 : ÉPAISSEURS DE TROIS PLACAGES EN FONCTION DU NOMBRE DE TOURS.....	137
FIGURE 67 : REPRESENTATION DES CRITERES RETENUS POUR L'ESSAI 27	139
FIGURE 68 : INFLUENCE DE L'USURE SUR LE REFUS DE COUPE LORS DE DEROULAGES DE PTFE	141
FIGURE 69 : GRAPHIQUE DES EFFETS DE LA MOYENNE ET DE L'ECART TYPE DE L'EFFORT FXC SUR UN TOUR (92 ESSAIS)	149
FIGURE 70 : GRAPHIQUE DES EFFETS DE LA MOYENNE ET DE L'ECART TYPE DE L'EFFORT FYC SUR UN TOUR (92 ESSAIS)	152
FIGURE 71 : COEFFICIENTS DE CORRELATION OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE LA MOYENNE ET L'ECART TYPE DE FXC, FA, FYC ET FD ET LES DESCRIPTEURS DES VARIATIONS D'ÉPAISSEUR DU PLACAGE (CALCUL SUR 40 ECHANTILLONS, SANS LA MODALITE USURE DE L'OUTIL ET SANS ESSAI 30).....	153
FIGURE 72 : EFFORTS EXERCES SUR LA BARRE DE PRESSION (44 ESSAIS)	155
FIGURE 73 : RELEVÉS DES DIFFERENTS CAPTEURS (FXC (x-1), XC, FYC, YC, FXB, XB, FYB (x1/10), YB ET MICRO, EFFORTS EN N/2CM, VIBRATIONS EN M/S ² ET PRESSION EN PA) LORS DES 6 PREMIERES SECONDES D'UNE OPERATION DE MICRODEROULAGE DE HETRE (ESSAI 23 : VC=0.5M/S, EP=3MM, Δ=0°, OUTIL RODE, AVEC BARRE DE PRESSION).....	156
FIGURE 74 : GRAPHIQUE DES EFFETS DE LA VALEUR RMS DES SIGNAUX XC ET YC SUR UN TOUR (92 ESSAIS APRES FILTRAGE (15KHZ)).....	157
FIGURE 75 : VALEURS RMS DU SIGNAL XC FILTRE CALCULÉ (DERNIER TOUR VS ESSAI COMPLET-92 ESSAIS)	159
FIGURE 76 : RMS DES ACCELEROMETRES DE L'OUTIL EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DEROULEE (CALCULE SUR 4 S, VC=0.1M/S, Δ=0°, SANS BARRE DE PRESSION)	160
FIGURE 77 : RMS YC EN FONCTION DU TAUX DE PRESSION DE LA BARRE (CALCULE SUR 4 SECONDES, PEUPLIER, VC=0.5M/S, EP=3MM ET Δ=0°, ESSAIS 126 A 129 REPETES UNE FOIS)	161
FIGURE 78 : GRAPHIQUE DES EFFETS DES RMS DE XC ET DE YC POUR 8 ESSAIS SUR UN TOUR DE DEROULAGE (SIGNAL BRUT, PTFE).....	162
FIGURE 79 : PRINCIPE DU MICROSABLAGE	163
FIGURE 80 : EVOLUTION DU RMS DE L'ACCELEROMETRE POSITIONNE SUIVANT LA DIRECTION DE COUPE EN FONCTION DE LA LONGUEUR USINEE (HETRE, VC=1M/S, Δ=1°, EP=1MM)	165
FIGURE 81 : REcul D'ARETE EN FONCTION DE LA LONGUEUR USINEE (5 OUTILS).....	165
FIGURE 82 : EVOLUTION DE FYC MOYEN EN FONCTION DE LA LONGUEUR USINEE POUR LES 5 COUPEAUX TESTES.....	166
FIGURE 83 : COMPARAISON DES NIVEAUX DE PRESSION SONORES MESURES AVEC OU SANS FILTRAGE (92 ESSAIS)	169
FIGURE 84 : DSP DES SIGNAUX DES ACCELEROMETRES XC ET YC POUR L'ESSAI 35	175
FIGURE 85 : DSP DU SIGNAL DU MICRO EN DB (ESSAI 35).....	176
FIGURE 86 : RAPPORT DES AMPLITUDES DES DSP DES ACCELEROMETRES XC ET YC ET DU MICRO POUR LES ESSAIS 35 ET 3	177

FIGURE 87 : RAPPORT DES AMPLITUDES DES DSP DES EFFORTS DE COUPE FXC ET FYC POUR LES ESSAIS 35 ET 3 (PEUPLIER ESSAI 35-PTFE ESSAI 3)	178
FIGURE 88 : ANALYSE EN DOUZIEME D'OCTAVE DU SIGNAL DU MICROPHONE (ESSAI 35)	179
FIGURE 89 : RAPPORT DES ANALYSES EN TIERS D'OCTAVE EN DB DES ESSAIS 35 ET 3	179
FIGURE 90 : FONCTIONS DE COHERENCE ENTRE LES ACCELEROMETRES Xc, Yc, ET LE MICROPHONE POUR L'ESSAI 11 (HETRE, Ep=3MM, Vc=0.5M/S, δ=0°, SANS BARRE, OUTIL RODE).....	180
FIGURE 91: FONCTIONS DE COHERENCE ENTRE LES ACCELEROMETRES Xc, Yc, ET LE MICROPHONE POUR L'ESSAI 35 (PEUPLIER, Ep=3MM, Vc=0.5M/S, δ=0°, SANS BARRE, OUTIL RODE).....	181
FIGURE 92 : AUTOSPECTRE DE L'ENVELOPPE DU SIGNAL DE Yc (BANDE D'ANALYSE 25.6 KHZ, FREQUENCE CENTRALE 12.8 KHZ, T=250MS, N=3200) POUR L'ESSAI 35	181
FIGURE 93 : RAPPORT DES AMPLITUDES DES DSP DE Xc, Yc ET DU MICROPHONE POUR LES ESSAIS 35 ET 47 (PEUPLIER, Ep=3MM, Vc=0.5M/S, δ=0°, OUTIL RODE, TAUX DE COMPRESSION RESPECTIFS DE 0 ET 15.67 %)	183
FIGURE 94 : RAPPORT DES AMPLITUDES DES DSP DE Xc, Yc ET DU MICROPHONE POUR LES ESSAIS 12 ET 24 (HETRE, Ep=1MM, Vc=0.5M/S, δ=0°, OUTIL RODE, TAUX DE COMPRESSION RESPECTIFS DE 0 ET 5.66 %)	184
FIGURE 95 : RAPPORT DES AMPLITUDES DES DSP DE Xc, Yc ET DU MICROPHONE POUR LES ESSAIS 9 ET 21 (HETRE, Ep=3MM, Vc=2M/S, δ=0°, OUTIL RODE, TAUX DE COMPRESSION RESPECTIFS DE 0 ET 15.67 %).....	185
FIGURE 96 : RAPPORT DES DSP DU MICROPHONE ET DE Xc POUR Ep=1MM ET Vc= 2M/S (ESSAI 10 : HETRE, δ=0° ; ESSAI 14 : HETRE, δ=1° ; ESSAI 34 : PEUPLIER, δ=0° ; REFERENCE : 22, 26, 46, ESSAI CORRESPONDANT AVEC BARRE DE PRESSION).....	187
FIGURE 97 : RAPPORT DES DSP DE Xc POUR DIFFERENTS TAUX DE COMPRESSION DE LA BARRE LORS DE DEROULAGES DE PEUPLIER EN 3 MM D'EPaisseur (ESSAIS 35, 126, 127, 128, REFERENCE ESSAI 129 TAUX DE COMPRESSION = 20%).....	188
FIGURE 98 : EVOLUTION DE LA BANDE FREQUENTIELLE DE FISSURATION EN FONCTION DE LA VITESSE DE COUPE (SIGNAL Xc, ESSAIS 112 ET 130 A 137 : HETRE, Ep=2MM, δ=0°, SANS BARRE DE PRESSION, OUTIL RODE).....	190
FIGURE 99 : EVOLUTION DU SPL DU MICRO (A) ET DE LA DSP DE Yc (B) EN FONCTION DE LA VITESSE LINEAIRE DE COUPE (ESSAIS 130, 131, 133, 135, 137, Ep=2MM, SANS BARRE)	192
FIGURE 100 : INFLUENCE DE L'USURE DE L'OUTIL (A) ET DE LA VALEUR DE L'ANGLE DE DEPOUILLE (B) SUR LES DSP DES ACCELEROMETRES Xc ET Yc ET LE SPL DU MICROPHONE POUR DES DEROULAGES DE HETRE	194
FIGURE 101 : INFLUENCE DE L'USURE DE L'OUTIL SUR LES DSP DE Yc (ESSAIS 36 ET 84, PEUPLIER)	195
FIGURE 102 : INFLUENCE DE L'USURE DE L'OUTIL (A) ET DE LA VALEUR DE L'ANGLE DE DEPOUILLE (B) SUR LES DSP DE Xc	196
FIGURE 103 : DSP DES SIGNAUX DE Xc (A) ET DE Yc (B) POUR LES ESSAIS 1 (PTFE), 12 (HETRE) ET 36 (PEUPLIER)	197
FIGURE 104 : DSP DES SIGNAUX DE Xc (A), DE Yc (B) POUR LES ESSAIS 35 (SANS BARRE) ET 39 (AVEC BARRE).....	198
FIGURE 105 : SPECTROGRAMME DES DSP DE L'ACCELEROMETRE Xc LORS DU DEROULAGE 11 (T= 125 MS, N=200 ; ESSAI 11 : HETRE, Ep=3MM, Vc=0.5M/S, OUTIL RODE, SANS BARRE)	200
FIGURE 106 : ARRACHEMENTS DETECTES PAR L'ACCELEROMETRE Xc (CATEGORIE (B) DE PLACAGES)	200
FIGURE 107 : WATERFALL (DSP) DE Xc POUR LE PREMIER TOUR DE L'ESSAI 23	201
FIGURE 108 : SPECTROGRAMME DES DSP DE L'ACCELEROMETRE Xc LORS DU DEROULAGE 23	202
FIGURE 109 : EVOLUTION DES DSP DES SIGNAUX DES ACCELEROMETRES Xc, Yc ET Yb CALCULES SUR DES BANDES FREQUENTIELLES SPECIFIQUES ET DE L'EPaisseur DU PLACAGE DEROULE EN FONCTION DU TEMPS POUR L'ESSAI 23 (HETRE, Ep=3MM, Vc=0.5M/S, TAUX DE COMPRESSION= 15.67%, OUTIL RODE).....	203
FIGURE 110 : SPECTROGRAMMES DES DSP DE Yc ET DU SPL DU MICROPHONE POUR LA DEROULAGE D'UN DISQUE COMPLET A VITESSE LINEAIRE CONSTANTE (A) OU A VITESSE DE ROTATION CONSTANTE (B)	204
FIGURE 111 : EPAISSEURS MOYENNES OBTENUES A PARTIR DU CAPTEUR DE DEPLACEMENT LVDT DU MARTINOMETRE (ESSAIS 108 A 125).....	208
FIGURE 112 : EPAISSEURS MOYENNES OBTENUES A PARTIR DES CAPTEURS LASER DU DENSIMETRE (ESSAIS 108 A 125)	209
FIGURE 113 : LONGUEURS DES FISSURES (EN MM) EN FONCTION DU NOMBRE DE FISSURES DETECTEES.....	211
FIGURE 114 : POSITIONS DES PICS RELATIFS AUX FISSURES LE LONG DES 60 PREMIERS MILLIMETRES D'UN PLACAGE DE HETRE PARTIELLEMENT SEC (ESSAI 115 : Ep=3MM, DEROULE SANS BARRE DE PRESSION)	212
FIGURE 115 : PROCEDURE DE DETECTION DE PICS ASSOCIES A UNE FISSURE	213
FIGURE 116 : EFFET DE LA PRISE EN COMPTE DE LA DENSITE LOCALE POUR LE CALCUL DU RETRAIT D'UN PLACAGE HOMOGENE (HETRE, ESSAI 115).....	215
FIGURE 117 : SIGNATURE DE LA FISSURE SUR LES RELEVES VIBRATOIRES ET DYNAMOMETRIQUES* DANS LES DIRECTIONS X ET Y (ESSAI 114, HETRE, Vc=0.1M/S, Ep=2.7MM, SANS BARRE DE PRESSION, OUTIL RODE)	216
FIGURE 118 : PROFILS OSCILLATOIRES DE L'OUVERTURE DE FISSURES SELON Xc (PEUPLIER, Ep=3MM, Vc=0.5M/S, SANS BARRE).....	217
FIGURE 119 : SIGNAL BRUT, RMS LOCAL ET PICS DETECTES POUR LE MICROPHONE (ESSAI 115 : HETRE, Vc=0.1M/S, Ep=2.7MM, SANS BARRE, OUTIL RODE).....	218
FIGURE 120 : INTERFACE D'AIDE AU CHOIX DES PARAMETRES L ET Ψ (5) DE DETECTION DES FISSURES	219
FIGURE 121 : DETERMINATION D'UN OPTIMUM POUR L EN FONCTION DE L'EPaisseur DEROULEE (ESSAI 108-125).....	220
FIGURE 122 : MESURE DE LA POSITION DE CHAQUE FISSURE A PARTIR DU PROFIL RELEVÉ PAR LE LASER DU MARTINOMETRE ET DU SIGNAL LISSE DE Xc SUR 100 MM D'UN PLACAGE DE HETRE DE 3 MM D'EPaisseur (ESSAI 115).	220

FIGURE 123 : DISTANCE MOYENNE ENTRE DEUX FISSURES CONSECUTIVES MESUREE A PARTIR DES SIGNAUX DE Xc, DE Yc, DU MICRO OU DU MARTINOMETRE EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DEROULEE POUR LE CAS DU HETRE (A) ET DU PEUPLIER (B).....	222
FIGURE 124 : WATERFALL DU SIGNAL D'UN ACCELEROMETRE FIXE SOUS LE COUTEAU D'UNE DEROULEUSE SEMI-INDUSTRIELLE.....	228
TABLEAU 1 : VALEURS DE P ET K_{Ic} EN DEBUT DE FISSURATION D'APRES [THIBAUT_1988]	43
TABLEAU 2 : TOLERANCES PROPOSEES POUR LES VARIATIONS D'ÉPAISSEUR, LA PROFONDEUR MOYENNE DES FISSURES ET LA RUGOSITE DES DEUX FACES POUR DES PLACAGES DEROULES DE FEUILLIS ET DE RESINEUX D'APRES [FEIHL_1986].....	51
TABLEAU 3 : TYPES DE DEFAUTS DETECTABLES PAR LES OPERATEURS EN FONCTION DES MOYENS EMPLOYES	100
TABLEAU 4 : REPONSE DES DEROULEURS AUX DEFAUTS AUDIBLES DU PLACAGE	100
TABLEAU 5 : FREQUENCES DE RESONANCE MESUREES SUR L'OUTIL MONTE DANS LES DEUX DIRECTIONS X ET Y (± 8 Hz)	114
TABLEAU 6 : FREQUENCES DE RESONANCE MESUREES SUR LA BARRE MONTEE SUIVANT X (± 8 Hz).....	115
TABLEAU 7 : MODALITES DE DEROULAGE DU PTFE (ESSAIS 1 A 8).....	116
TABLEAU 8 : FISSURATION MOYENNE DES PLACAGES (PEUPLIER ET HETRE, $Ep=3$ MM, OUTIL RODE)	133
TABLEAU 9 : LIEN ENTRE LA PROFONDEUR ET LE PAS DES FISSURES POUR 5 PLACAGES FORTEMENT FISSURES	134
TABLEAU 10 : CORRELATIONS AU MOINS SIGNIFICATIVES A 10% DES PARAMETRES ET CRITERES DESCRIPTEURS DES VARIATIONS D'ÉPAISSEUR (85 MODALITES DE DEROULAGE).....	140
TABLEAU 11 : CORRELATION ET TAUX DE CONFIANCES RELIANT PERIODES MOYENNE D'OSCILLATIONS, PARAMETRES ET DESCRIPTEURS (23 ESSAIS)	144
TABLEAU 12 : A CORRELATIONS PAR RAPPORT A Φ ($^{\circ}$), B ANGLES DE FROTTLEMENTS MOYENS (EN $^{\circ}$)	146
TABLEAU 13 : COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE CORRELATION OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE (A) LA MOYENNE ET (B) L'ÉCART TYPE DE FXc ET DE Fa ET LES FACTEURS EXPERIMENTAUX (CALCUL SUR 47 ECHANTILLONS SANS LA MODALITE USURE DE L'OUTIL).....	148
TABLEAU 14 : COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE CORRELATION OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE (A) LA MOYENNE ET (B) L'ÉCART TYPE DE FYc ET DE Fd ET LES FACTEURS EXPERIMENTAUX (CALCUL SUR 47 SANS LA MODALITE USURE DE L'OUTIL).....	150
TABLEAU 15 : COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE CORRELATIONS OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE LA MOYENNE ET L'ÉCART TYPE DE FXb (A) ET DE FYb (B) ET LES FACTEURS EXPERIMENTAUX (CALCUL SUR 44 ECHANTILLONS).....	154
TABLEAU 16 : COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE CORRELATIONS OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE LES VALEURS RMS DES SIGNAUX Xc ET Yc FILTRES (15kHz) ET LES FACTEURS EXPERIMENTAUX (CALCUL SUR 92 ECHANTILLONS).	157
TABLEAU 17 : VALEURS RMS DES SIGNAUX VIBRATOIRES BRUTS DES ESSAIS 105 A 107 CALCULEES SUR 2 SECONDES.....	158
TABLEAU 18 : COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE CORRELATIONS OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE LES VALEURS DU KURTOSIS DES SIGNAUX Xc ET Yc BRUTS ET LES FACTEURS EXPERIMENTAUX (CALCUL SUR 92 ECHANTILLONS).....	166
TABLEAU 19 : COEFFICIENTS DE CORRELATION OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE LES VALEURS RMS DES SIGNAUX Xb ET Yb FILTRES (15kHz) ET LES FACTEURS EXPERIMENTAUX (CALCUL SUR 92 ECHANTILLONS).....	168
TABLEAU 20 : COEFFICIENTS DE CORRELATION OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE LE SPL DU MICRO ET LES FACTEURS ET DESCRIPTEURS RETENUS (92 ESSAIS)	169
TABLEAU 21 : COEFFICIENTS DE CORRELATION OBTENUS SUR UN TOUR ENTRE LES VALEURS RMS DES SIGNAUX Xc, Yc, LE SPL DU MICROPHONE ET LES COEFFICIENTS DESCRIPTEURS DES VARIATIONS D'ÉPAISSEUR (41 ESSAIS, SANS MODALITE USURE)	170
TABLEAU 22 : SYNTHESE DES TENDANCES DES MESURES DES EFFORTS (MOYENNE, ECART TYPE), DES NIVEAUX DE PRESSION SONORE ET DES VIBRATIONS (RMS) POUR LES 92 ESSAIS DU PLAN COMPLET	171
TABLEAU 23 : MESURES DES FREQUENCES DE FISSURATION PAR RAPPORTS DES DSP DU SIGNAL Xc (SANS BARRE, OUTIL RODE).....	191
TABLEAU 24 : APTITUDE DES CAPTEURS UTILISES A DECRIRE LES PHENOMENES RECHERCHES AU COURS DES ESSAIS REALISES	205
TABLEAU 25 : RAPPORT DE LA MOYENNE DE L'AMPLITUDE DES PICS SUR LE NIVEAU RMS DU SIGNAL ASSOCIE POUR Xc, Yc, ET LE MICRO EN FONCTION DE L'ESSENCE ET DE L'ÉPAISSEUR DEROULEE.....	221
TABLEAU 26 : REGRESSION LINEAIRES ASSOCIEES AUX DISTANCES ENTRE FISSURES PAR ESSENCE SELON LES MOYENS DE MESURE RETENUS (Xc, Yc OU MICRO ET MARTINOMETRE) POUR LES ESSAIS 108 A 125.....	222
ÉQUATION 1 : RATIO DU RISQUE DE FISSURATION	41
ÉQUATION 2 : ANGLE DE FROTTLEMENT BOIS/METAL Φ	56
ÉQUATION 3 : DECOMPOSITION DES EFFORTS DE COUPE SUIVANT LES FACES D'ATTAQUE ET DE DEPOUILLE DU COUTEAU	57
ÉQUATION 4 : MODELE SIMPLIFIE DE L'EFFORT DE COUPE SUR LA FACE D'ATTAQUE OU :	59
ÉQUATION 5 : CONTRAINTE MOYENNE NORMALE SUR LE PLAN DE CISAILLEMENT	65
ÉQUATION 6 : SPL EN DB.....	76
ÉQUATION 7 : RMS D'UN SIGNAL CONTINU ET D'UN SIGNAL DISCRET	77
ÉQUATION 8 : ÉCART TYPE D'UN SIGNAL DISCRET	77
ÉQUATION 9 : DENSITE DE PROBABILITE D'UNE VARIABLE ALEATOIRE CONTINUE	79
ÉQUATION 10 : RMS ET DE L'ÉCART TYPE D'UNE VARIABLE ALEATOIRE CONTINUE	79
ÉQUATION 11 : MOMENT STATISTIQUE D'ORDRE Q D'UNE VARIABLE ALEATOIRE X CONTINUE OU DISCRETE	79
ÉQUATION 12 : COEFFICIENTS D'ASYMETRIE ET D'APLATISSEMENT	79
ÉQUATION 13 : TRANSFORMEES DE FOURIER.....	85

ÉQUATION 14 : SPECTRES DES AMPLITUDES ET DES PHASES.....	86
ÉQUATION 15 : TRANSFORMÉE DE FOURIER DISCRÈTE	86
ÉQUATION 16 : FONCTION D'AUTOCORRELATION DE x	91
ÉQUATION 17 : FONCTION DE TRANSFERT	92
ÉQUATION 18 : COHERENCE DE DEUX SIGNAUX ALEATOIRES $x(t)$ ET $y(t)$	92
ÉQUATION 19 : LONGUEUR D'UNE PORTION ÉLÉMENTAIRE DE SPIRALE	135
ÉQUATION 20 : LONGUEUR D'UNE SPIRALE COMPTANT N ÉLÉMENTS ANGULAIRES	135
ÉQUATION 21 : NOMBRE DE POINTS À CONSIDÉRER POUR UNE SPIRALE COMPTANT M MILLIÈMES DE TOURS.....	136
ÉQUATION 22 : INCERTITUDE SUR LA LONGUEUR USINÉE.....	136
ÉQUATION 23 : MESURE DE DENSITÉ.....	214
ÉQUATION 24 : NOMBRE DE POINTS RETENUS POUR LE CALCUL DU RMS.....	218

Introduction Générale

Le déroulage est un procédé de première transformation du bois qui permet de fabriquer des placages. Son principe est simple. Une section du tronc d'un arbre, ou billon, est entraînée en rotation par deux broches coaxiales. Un outil de faible angle de bec et dont la longueur dépasse celle du billon est fixé sur un chariot mobile qui se rapproche de manière régulière de l'axe de rotation des broches. Un ruban continu de bois, le placage, est alors formé. Il défile sur un tapis avant d'être coupé par un massicot en feuilles de dimensions prédéfinies. Le déroulage, comme le tranchage, se distingue des procédés d'usinage classiques puisque le produit est le copeau.

La fabrication de placage ne représente que 8% de la production totale forestière en France mais constitue néanmoins un secteur à haute valeur ajoutée. La production française de panneaux de contreplaqué, débouché majeur des placages, est stabilisée depuis plusieurs années à près de 500 000 m³/an (dont 70% d'okoumé), ce qui place la France au 16ème rang mondial parmi les nations productrices de placage (1% de la production mondiale - source FAO 2002). Les enjeux mondiaux de la maîtrise du procédé sont considérables en particulier en Asie et outre-Atlantique ; ces derniers consommant 68% de la production mondiale de contreplaqué soit 20 millions de mètres cubes équivalent bois rond.



Figure 1 : Enroulage du placage en sortie de déroulage

Toute la difficulté pour l'opérateur se résume à produire le placage le plus homogène et le plus continu possible. De la réussite de cette opération vont dépendre les performances de toute la chaîne de production puisqu'elle permettra d'optimiser le rendement matière, de fluidifier le transfert des produits, d'éliminer une post-opération de ponçage, de limiter la consommation de colle dans la fabrication des produits dérivés,... Suivant les objectifs de

production ou la matière première, cette tâche peut s'avérer plus ou moins ardue et l'expérience du dérouleur est alors d'un grand secours.

Le contexte actuel tend vers une réduction des diamètres moyens des essences tropicales surexploitées et une diversification des bois employés dont en particulier les essences hétérogènes. Dans ces conditions difficiles, seuls les dérouleurs aguerris sont capables d'agir sur les paramètres de coupe pour traverser rapidement les transitoires inhérents au procédé et dont l'emprise est d'autant plus grande que le diamètre des bois est petit. L'exigence de tirer le meilleur parti de la matière première en augmentant les rendements quantitatifs et qualitatifs est toujours plus forte mais la flexibilité nécessaire des entreprises et des hommes à l'économie de marché ne permet plus la formation des dérouleurs sur plusieurs années. Forcés de constater que cette population s'amenuise, les entrepreneurs cherchent des solutions pour conserver ce savoir-faire. Autrement dit, comment procèdent les opérateurs pour ajuster les paramètres de la machine ? La réponse est assez urgente puisque certaines d'entre elles ont déjà perdu ces compétences fondamentales comme nous l'avons constaté lors d'un projet d'expertise conduit en 2005 pour une grande société, notamment productrice de panneaux de contreplaqué d'okoumé. Le diagnostic a montré l'emploi, entre autres dysfonctionnements, de conditions de coupe mal adaptées.

Comme tout « système » expert, les opérateurs captent une information, tantôt sensorielle, tantôt objective, la traitent à l'aide d'une base de données et de règles de décision implicites, leur expérience, et appliquent des corrections sur les consignes des paramètres de sortie directs comme les réglages de la machine ou indirects tels que le traitement hygrothermique préalable des billons. Pour répondre à la question posée, il faut analyser chaque étape à commencer par les sources de l'information pertinente.

Les conditions de travail peuvent être très différentes d'une entreprise à une autre mais la « constante » reste toujours le facteur humain. Guidé par ses sens, l'opérateur s'adapte en fonction des indicateurs supplémentaires mis à sa disposition. Traditionnellement, il écoute sa machine, observe le placage produit et le touche. En rentrant un peu plus dans le détail, on s'apercevrait que les informations tactiles ou visuelles servent à caractériser la qualité du placage. A ce titre, leurs mesures ont naturellement été reproduites avec des réussites diverses par des systèmes de vision et de palpement numérisés. Quant aux sons émis pendant la coupe, ils permettent de « savoir si tout se passe bien » selon les opérateurs. Nébuleuse description d'un contrôle de qualité ! Pourtant il s'agit d'un élément essentiel de leur savoir-faire. Ils sont capables de détecter l'apparition d'une avarie lors du process « à l'oreille », ce qu'on retrouve d'ailleurs dans de nombreux autres corps de métiers (laminage, sciage, défonceage,...). Les dérouleurs utilisent le terme explicite de « chant » de la machine lorsqu'elle usine dans de bonnes conditions. Cela sous-entend qu'ils sont capables de détecter et d'identifier les signatures acoustiques et vibratoires des défauts du placage ou de leurs causes (l'usure de l'outil par exemple). Bien que ce constat puisse paraître trivial, les travaux visant à alimenter

un système de contrôle en ligne ou d'aide à la décision des opérateurs sur dérouleuse par des mesures vibratoires et acoustiques sont quasiment inexistantes. La raison principale provient sans doute de la difficulté d'interprétation des informations collectées.

Etant donné la nécessité de maîtriser le déroulement du procédé en temps réel et cette capacité des opérateurs expérimentés à prendre la bonne décision à partir des sons ou des vibrations de la machine, une question se pose : est-il envisageable d'alimenter un système de contrôle en ligne du déroulage à partir de mesures acoustiques et vibratoires ?

Pour y répondre, il faut avant tout déterminer quelles sont les données d'entrée pertinentes et mesurables. Autrement dit, quelles signatures des phénomènes identifiés par les opérateurs sommes-nous capables de mesurer ? Il s'agit d'un préalable indispensable. Sa réussite ouvrira la possibilité de définir des règles de décision calquées sur le comportement des dérouleurs. Enfin, il sera temps de développer un asservissement adapté.

Ce travail, dans son ensemble, est bien entendu extrêmement ambitieux et nécessite plusieurs années d'études. La première étape, notoirement exploratoire, requiert une bonne connaissance du procédé de déroulage afin de définir et de produire les phénomènes recherchés, c'est-à-dire conduisant à des défauts du placage. Heureusement, une riche littérature principalement basée sur la mesure des efforts de coupe est aujourd'hui disponible. Elle nous offre une base de données des situations caractéristiques, leurs interprétations et parfois des modèles. Ces informations sont précieuses puisqu'elles serviront de références dans le suivi des signaux acoustiques et vibratoires. La description du mécanisme de formation du copeau nécessite une certaine connaissance des spécificités structurelles du matériau usiné. En effet, sa nature même, qui constitue une famille de données et sur laquelle on ne peut pas agir, est souvent la source des perturbations observées pendant la coupe. Nous débiterons donc dans une première partie par un bref rappel de ses propriétés avant de détailler dans la partie II, les phénomènes mis en jeu lors de la fabrication de placages déroulés.

Si rien, ou presque, n'a encore été entrepris en matière de détection de défaut de déroulage par des mesures acoustiques et vibratoires, les essais sont moins confidentiels dans l'usinage des métaux. C'est aussi le cas pour le suivi des machines tournantes qui ont suscité un engouement certain. Lorsqu'on connaît le coût d'une interruption de production dans une grande ligne, on comprend mieux pourquoi les entreprises et les chercheurs ont investi dans le développement de procédures de maintenances préventives. Les techniques basées sur des mesures acoustiques ou vibratoires, qui présentent l'immense avantage de ne pas nécessiter d'interruption du process, se sont logiquement imposées comme des standards. Le déroulage en France ne fait pas complètement exception puisqu'une tentative a été entreprise en ce sens par le biais d'un projet de fin d'étude d'ingénieur de l'ENSAM, [BERGER et al_2001], encadré par MARCHAL et TEBEC.

L'ensemble de ces travaux a apporté une batterie d'outils mathématiques plus ou moins complexes dont les performances sont liées à un contexte précis. Un état de l'art, présenté dans la partie III, permettra un emploi judicieux des technologies et des techniques en fonction des défauts rencontrés. Le postulat de départ reposant sur la capacité des dérouleurs à écouter les signatures de défauts, limite notre champ d'investigation au domaine de l'audible c'est-à-dire entre 20 Hz et 20 kHz.

L'intégration des connaissances des domaines de l'usinage et des vibrations en général permet de cibler dans la quatrième partie les équipements et les conditions expérimentales à même de produire et de mesurer les situations caractéristiques « aux oreilles » des opérateurs. Mais pour valider les hypothèses issues des observations, une méthode de mesure objective du défaut est indispensable. Ce point est malheureusement encore flou dès qu'il s'agit de bois à l'état vert. Enfin, il sera temps d'analyser les résultats pour répondre à notre objectif : dresser une première carte des données accessibles en vue d'un système de contrôle en ligne.

Cette étude non-exhaustive ne peut constituer qu'un premier pas vers la question posée. Elle nous place dans une démarche exploratoire d'un domaine expérimental encore vierge.

PARTIE I : Généralités sur le matériau bois

Le terme « bois » est défini par la norme NF B 50-003 (vocabulaire du bois) : « *Ensemble de tissus résistants secondaires (de soutien, de conduction et de mise en réserve) qui forment les troncs, branches et racines des plantes ligneuses. Issu du fonctionnement du cambium périphérique, il est situé entre celui-ci et la moelle.* ». Quelques informations supplémentaires permettent de mieux comprendre cette définition qui peut sembler hermétique au premier abord. Comme la plupart des matériaux, le bois apparaît complètement différemment suivant l'échelle d'observation. Une démarche de description des plus didactiques consiste en une augmentation progressive de la résolution. Nous débuterons par l'arbre pour nous arrêter aux cellules.

1 De l'arbre au billon

L'arbre nous apparaît d'abord comme constitué de racines, d'un tronc (tige principale verticale), de branches (tiges secondaires) et de feuilles. La partie qui nous intéresse en premier lieu pour le déroulage est bien entendu le tronc qui parvient ébranché et privé de la cime de l'arbre et de sa souche sur les sites de production. On parle alors de grume. Elle est ensuite tronçonnée en billons de plus ou moins grandes longueurs en fonction de leur qualité, de leur rectitude, de la dérouleuse utilisée et des types de produit à réaliser. Ainsi, pour le peuplier, une entreprise telle que LACROIX (71), qui fabrique des placages destinés à l'emballage alimentaire, utilisera principalement des billons de 1,2 m de longueur tandis que la société LES PLACAGES DU CHATILLON (21), dont les produits sont destinés à la confection de contreplaqués, sera amenée à dérouler une forte proportion de billons de 2,2 m.

Cette opération de tronçonnage, qui la plupart du temps fait suite à un écorçage, révèle à une première échelle la structure interne d'un arbre : le bois. En partant de la périphérie du billon et en se rapprochant de son cœur ou moelle, on distingue à l'œil nu (cf. Figure 2):

➤ l'écorce. Elle protège la partie vivante de l'arbre des agressions extérieures. On différencie l'écorce externe, ou suber, de l'écorce interne, ou liber.

➤ l'aubier. Constitué de matière ligneuse non duramenisée, il joue un rôle fondamental dans la vie et la croissance de l'arbre : on parle de bois fonctionnel. La sève brute y circule et les éléments nutritifs s'y accumulent. Il est très souvent sensible aux attaques d'insectes, bactériologiques ou de champignons.

➤ le duramen ou bois parfait. C'est la partie de l'arbre dont la valeur commerciale est traditionnellement la plus importante. Les cellules de bois sont mortes et n'assurent plus de circulation de sève et présentent une meilleure durabilité. En transformant l'aubier en

duramen, le processus de duraminisation confère au bois d'oeuvre ses caractéristiques chimiques. Il peut être très variable suivant les espèces : rapide ou lent, marqué en terme de couleur et de durabilité (châtaigner) ou difficilement visible (peuplier). Pour une large majorité des essences tempérées et même tropicales, on distingue une succession de « cercles » plus ou moins réguliers et concentriques centrés sur la moelle, appelés cernes (traces d'une année de croissance secondaire).

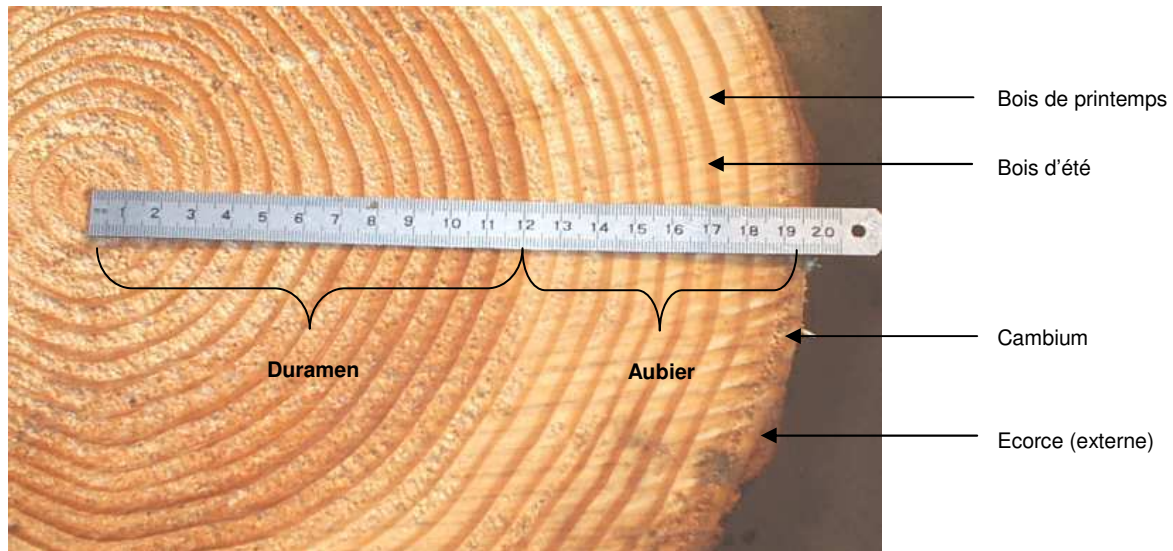


Figure 2 : Coupe transversale d'un billon de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*)

Cette structure, pour le tronc comme pour les autres tiges, est le résultat d'un double mode de croissance :

- une croissance en longueur (primaire ou apicale). Chaque année, une longueur de tige est produite appelée unité de croissance.

- une croissance en diamètre (secondaire) qui est réalisée par le fonctionnement vers l'intérieur de l'assise génératrice libéro-ligneuse ou cambium. Cette assise génératrice est une couche continue de cellules vivantes. Elle se caractérise par sa faculté à se diviser indéfiniment pour former les cellules de zones cambiales à l'origine de cellules de l'écorce interne (liber) et de bois.

Chaque année, le cambium produit une couche épaisse de cellules : un cerne. Pour des bois « homogènes », il peut être difficile de distinguer les cernes. Par contre pour de nombreux bois européens, les cernes sont clairement identifiables (cf. Figure 2). Ils sont alors composés de deux sous-couches : le bois initial (ou bois de printemps), souvent peu dense et clair en comparaison du bois final (ou bois d'été). Cette hétérogénéité est un des facteurs clef de la déroulabilité d'une essence. En effet, la succession de zones « tendres » et de zones « dures », qui nécessiteraient en théorie des conditions de coupe différenciées, impose un compromis des paramètres de coupe. La variation des efforts qui en résulte entretient ou génère des phénomènes oscillatoires parfois forts dommageables pour la qualité finale du produit.

Concrètement, cette architecture nous permet de considérer une tige (branche ou tronc) comme un empilement de cônes dont l'angle est très faible. Un billon prélevé dans la tige principale pourra donc être assimilé à un cylindre multicouches (assez semblables deux à deux en première approximation). Il est aussi susceptible de présenter des ramifications ou branches plus ou moins inclinées par rapport à l'axe de l'arbre. La structure de ces tiges secondaires est similaire à celle du billon lui-même (double mode de croissance). Lorsque la branche est coupée comme sur la Figure 3, sa base sera peu à peu englobée au cours de la croissance radiale de l'arbre pour recouvrir totalement le nœud.



Figure 3 : Origine d'un nœud sur une coupe radiale d'un bois de cerisier

2 La structure du bois

2.1 Aspects anatomiques généraux du bois

Pour décrire la structure du bois, on utilise très couramment trois coupes réalisées dans des plans perpendiculaires : la coupe transversale perpendiculaire à l'axe de la tige (cf. Figure 2), la coupe radiale passant par l'écorce et la moelle (cf. Figure 3) et la coupe tangentielle dans un plan excentré, parallèle à l'axe de la tige et tangent à un cerne. Cette découpe met en lumière R, L et T, les trois directions d'anisotropie du bois du point de vue de ses propriétés physiques et mécaniques (cf. Figure 4). Elle permet aussi de visualiser le « plan ligneux » caractéristique d'une essence donnée en passant à l'échelle microscopique.

Dans le plan transversal (RT), la structure du bois se rapproche du type « nid d'abeille ». L'assise génératrice libéro-ligneuse, qui produit toutes les cellules du bois, est constituée de deux types de cellules initiales : fusiformes et isodiamétriques.

Les initiales fusiformes donnent naissance à des cellules allongées longitudinalement principalement vouées à la conduction des fluides nécessaires à la vie et/ou au soutien mécanique de l'arbre. Elles confèrent au bois observé au microscope dans le plan longitudinal un aspect alvéolaire visible sur la Figure 4.

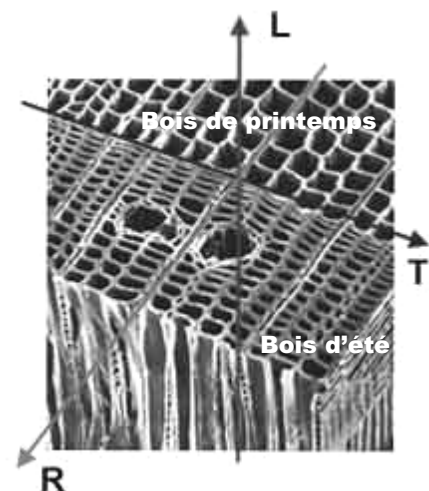


Figure 4 : Directions privilégiées d'un bois de résineux observé au un M.E.B.

Les initiales isodiamétriques, souvent regroupées en îlots de dimension très variable suivant les essences, sont à l'origine des rayons ligneux et libériens : « *éléments radiaux et transversaux perpendiculaires à la direction principale des éléments issus des initiales fusiformes* » [KELLER_1994]. Ces cellules peuvent jouer un rôle majeur pour certains phénomènes intervenant lors du déroulage. Ainsi, un rayon ligneux constitue une discontinuité sévère du milieu qui favorisera l'apparition et la propagation de fissures dans le placage. [MOVASSAGHI_1985] note : « *L'observation au M.E.B. [d'un élément d'un placage] montre que le cheminement des fissures accidentelles est beaucoup influencé par le plan ligneux. La plupart de ces fissures suivent les rayons ligneux et la direction des petits vaisseaux, surtout en fin de cheminement* ».

Deux feuillus européens (hêtre et peuplier), couramment utilisés dans l'industrie française du déroulage, ont principalement été employés pour cette étude. Nous verrons par la suite pourquoi. Afin de mieux cerner les caractéristiques qui conditionneront au final la qualité du placage, il est nécessaire de décrire plus précisément leur structure, et donc leurs plans ligneux¹.

2.2 Le plan ligneux des feuillus

Témoignant d'une évolution plus avancée d'un point de vue botanique, l'organisation des bois des feuillus est plus élaborée que celle des résineux. Les cellules sont souvent spécialisées dans une fonction précise contrairement aux résineux où, par exemple, les trachéides longitudinales (90% de l'ensemble des cellules des résineux) jouent à la fois le rôle de conduction et de soutien mécanique.

Dans le cas des feuillus (cf. Figure 5), pour toutes les espèces, on trouvera :

➤ des fibres libriformes ou fibres-trachéides généralement plus courtes et effilées que des trachéides (de 20 à 40 µm de diamètre pour moins de 2,5 mm de longueur en général) assurant le soutien mécanique. Elles constituent 50 à 60% de la masse du bois. « *La densité du bois dépend de la proportion relative de fibres par rapport aux autres types de cellules, notamment les éléments de vaisseaux, ainsi que de l'épaisseur propre de leurs parois cellulaires* » [KELLER_1994].

➤ des vaisseaux de dimensions et de répartition variables dans le cerne (jusqu'à 500 µm pour le chêne), organisés en longues files (de quelques décimètres à plusieurs mètres) qui assurent l'ascension de la sève brute depuis les racines jusqu'aux feuilles. Dans le cas du peuplier et du hêtre, on parle de bois à pores diffus : les vaisseaux (et les fibres également) ont

¹ Le plan ligneux des résineux comporte quelques spécificités vis-à-vis de celui des feuillus. Le lecteur curieux se reportera à une riche littérature sur ce point notamment [CORE_1979].

à peu près le même diamètre tout au long de l'accroissement annuel et sont répartis uniformément. Pour le hêtre, on note toutefois une légère diminution du diamètre entre le bois initial et le bois final. Quant au peuplier, il peut appartenir aux bois à zone semi-poreuse où les vaisseaux de diamètre constant ont tendance à être plus nombreux dans le bois initial que dans le bois final.

➤ le parenchyme longitudinal voué essentiellement au stockage et à la restitution de réserves.

➤ les cellules de parenchyme des rayons ligneux, seules cellules issues des initiales isodiamétriques. Si dans le cas du peuplier, les rayons sont larges d'une cellule, pour le hêtre comme pour le chêne, leurs dimensions sont variables. Ces éléments peuvent jouer un rôle de « raidisseurs » transversaux ou d'éléments localement durs dans la formation du copeau d'après [THIBAUT_1988].

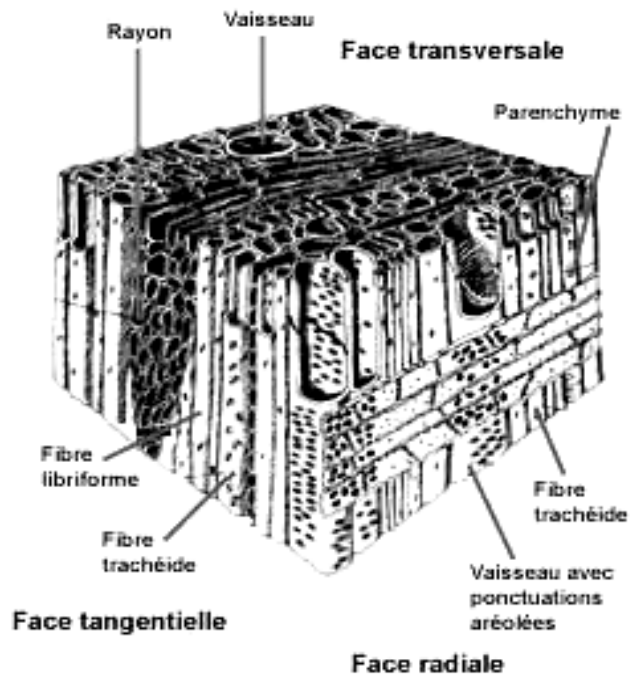


Figure 5 : Plan ligneux d'un feuillu

Il existe d'autres types de cellules présentes chez certaines espèces de feuillus mais leur intérêt est plus limité dans le cadre de cette étude.

Les vaisseaux sont agencés suivant une structure proche du type « nid d'abeille » avec renforts en fibres. Il est utile de connaître la structure fine de parois cellulaires pour mieux comprendre le mécanisme de formation du copeau.

2.3 L'ultrastructure

Le diamètre des trachéides avoisine 30 à 50 μm tandis que celui des fibres varie généralement de 2 à 40 μm . La paroi d'une cellule ligneuse présente de l'extérieur vers l'intérieur trois couches : une couche intercellulaire, une couche primaire et une couche secondaire (cf. Figure 6). La couche intercellulaire est assez mince, de l'ordre du micron. Elle assure la cohésion intercellulaire c'est pourquoi on l'assimile souvent en première approximation à un joint de colle entre les cellules. C'est une membrane amorphe, riche en lignine (polymères amorphes fortement ramifiées et très variables d'une essence à l'autre en terme de nature et de quantité) et en substances pectiques (leurs structures complexes leur confèrent une certaine élasticité). Elle est presque dépourvue de cellulose (longues chaînes polymériques, de poids moléculaire élevé, non ramifiées et orientées). Elle joue un rôle clef puisqu'elle est presque toujours le

siège de la rupture transversale permettant la formation du placage (cf. II.2.1.2). La couche primaire, première à être formée, est encore plus mince, de l'ordre du dixième de micron. Enfin, la couche secondaire, dont l'épaisseur varie de 2 à 10 μm , est constituée de trois sous-couches S1, S2, S3 représentant respectivement 5 à 10%, 75 à 85%, et 2 à 10% de l'épaisseur totale de la paroi cellulaire.

Toutes ces couches ou sous-couches peuvent être considérées comme des composites fibreux constitués d'une matrice dans laquelle sont agencées de manière plus ou moins ordonnée des fibres élémentaires : les microfibrilles (les hachures en indiquent l'orientation). Elles sont très cristallines et presque exclusivement constituées de cellulose. Leurs longueurs sont variables et leurs diamètres sont compris entre 10 et 30 nm. Dans la matrice, on retrouve deux grandes familles de polymères complexes qui s'enchevêtrent : les hémicelluloses et les lignines. Les hémicelluloses sont des polymères plus ou moins ramifiés et partiellement cristallisés. Elles jouent le rôle de substances incrustantes pour les hémicelluloses et la cellulose. La paroi primaire est constituée de plusieurs couches de microfibrilles enchevêtrées dans lesquelles se déposent les lignines, les hémicelluloses ainsi que des substances pectiques.

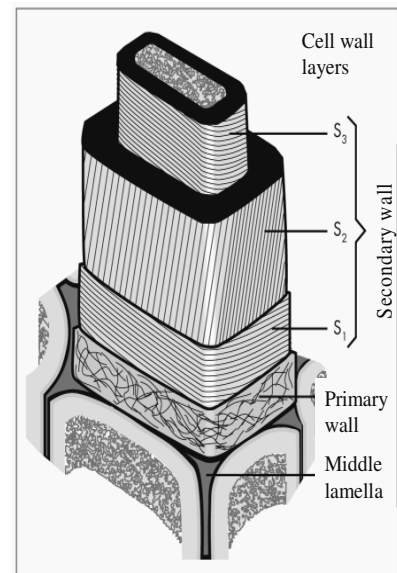


Figure 6 : Représentation schématique des différentes couches constituant la paroi cellulaire

La sous-couche la plus épaisse est S2 où l'angle d'inclinaison des microfibrilles est le plus faible : de 10 à 30° par rapport à l'axe vertical de la cellule. Cet angle a des conséquences directes sur les caractéristiques physico-mécaniques du bois. La nature allongée des fibres et l'orientation marquée de la paroi cellulaire concourent à l'anisotropie du bois.

Le bois peut donc être considéré comme un matériau poreux, inhomogène et anisotrope mais les variantes observables sont nombreuses, aussi bien au niveau macroscopique que microscopique.

3 Les spécificités d'un matériau d'origine biologique

L'arbre est un individu qui doit s'adapter en fonction de ses caractéristiques génétiques et des contraintes de son environnement. Il a développé au cours de son évolution des mécanismes de défense qui conditionnent directement la nature de son bois. Nous n'aborderons ici que les spécificités ayant une répercussion directe sur les qualités mécaniques de la matière ligneuse en vue de la fabrication de placages mais il en existe bien d'autres.

3.1 Influence des conditions extérieures

Le bois est constitué de couches de cellules issues du fonctionnement de l'assise génératrice suivant un modèle strict. Toutefois, les conditions extérieures telles que le type de sylviculture, la fertilité de la station, les variations de température, la lumière accessible, les réserves en eau dans la saison de végétation, la concurrence entre arbres voisins ou encore l'âge de l'arbre vont fortement influencer la vigueur de l'accroissement et donc la qualité du bois. Le plan ligneux est respecté mais la quantité et les proportions des différentes cellules pourront être grandement modifiées. Ainsi, dans le contexte d'une sylviculture dynamique, suite à une éclaircie prononcée (on retire les arbres de manière systématique ou selon leur valeur potentielle dans le futur), les arbres sont inondés de lumière brutalement et libérés d'une grande part de la concurrence racinaire. Ils produisent alors beaucoup de bois. On retrouvera facilement la trace de cette intervention sur les billons qui présenteront quelques cernes bien plus larges. Cette hétérogénéité locale du bois pourra avoir des conséquences importantes sur la qualité du placage. Suivant les essences, cette couche épaisse présentera une densité plus grande (chêne et feuillus à zone initiale poreuse en général) ou plus faible (résineux) qui se traduira par une discontinuité supplémentaire de la densité moyenne et des efforts de coupe, en particulier dans le cas du déroulage.

3.2 Le bois de réaction

Certaines sollicitations telles que le vent, l'inclinaison du sol, ou la mise en compétition entre congénères pour accéder au maximum de lumière entraînent l'arbre ou ses branches en dehors de leurs positions respectives d'équilibre : verticale pour le tronc et inclinée suivant un angle donné pour les branches. Suite à un mécanisme complexe, l'arbre va développer un bois de nature particulière, appelé bois de réaction, afin de lutter contre ces agressions extérieures. On parle de bois de compression pour les résineux puisqu'il se trouve le plus souvent dans la partie externe de la courbure des troncs penchés ou des branches soumises à une compression (cf. Figure 7a).

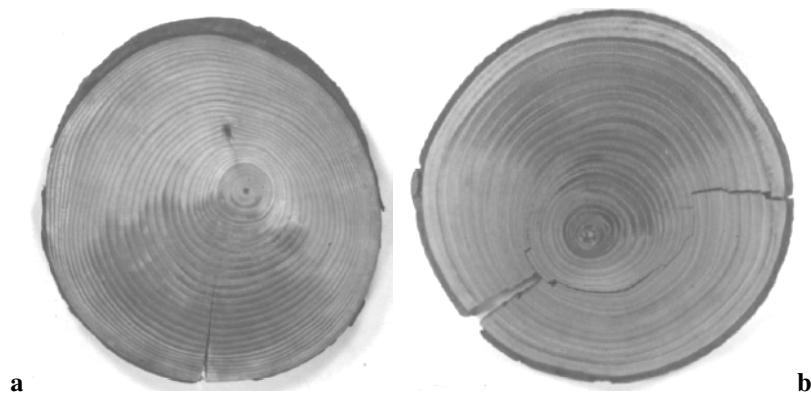


Figure 7 : Mise en évidence visuelle d'un secteur angulaire (90° environ) de bois de réaction : (a) bois de compression (Pin sylvestre) (b) bois de tension (châtaignier), d'après [Rapport d'activité LMGC _1999-2002].

Dans chaque cas, la plus grande densité du bois de réaction se traduit par une couleur plus foncée.

Pour les feuillus, on utilise le terme de bois de tension (cf. Figure 7b) car il est généralement, mais pas uniquement, produit dans la partie interne de cette courbure ou sur la partie supérieure des branches, là où l'accroissement de la largeur des cernes est le plus marqué. Ce mode de développement dissymétrique se concrétise très souvent par une excentration de la moelle par rapport au centre géométrique du billon.

Les conséquences pour le déroulage sont non négligeables car le positionnement des billons est presque toujours réalisé par des centreurs automatiques optimisant le rendement. Le plus grand cylindre inscrit dans le billon est alors privilégié au détriment de l'homogénéité finale du placage.

La fonction du bois de tension est de redresser l'arbre ou la branche. Il présente donc des caractéristiques qui lui sont propres. D'un point de vue anatomique, « *les différences principales par rapport au bois normal sont observées chez les fibres; les vaisseaux dans le bois de tension sont seulement moins nombreux et de plus faible diamètre* » [KELLER_1994]. La densité en fibres est plus importante. Leurs diamètres sont plus faibles, leurs longueurs plus grandes et les parois sont plus épaisses. L'angle des microfibrilles des couches S1 et S2 est beaucoup plus important ce qui expliquerait un retrait longitudinal plus marqué après séchage.

L'apparition d'une nouvelle couche (couche G ou gélatineuse visible sur la Figure 8) est aussi très caractéristique, même si elle n'est pas systématique. L'angle des microfibrilles y est particulièrement faible : 5% environ par rapport à l'axe de la cellule. Elle s'accompagne d'un manque de lignification chez presque toutes les espèces. Son épaisseur est supérieure ou égale à celle de la couche S2 des cellules normales. Elle est presque exclusivement constituée de cellulose (98%) très cristalline et présente un fort retrait axial.

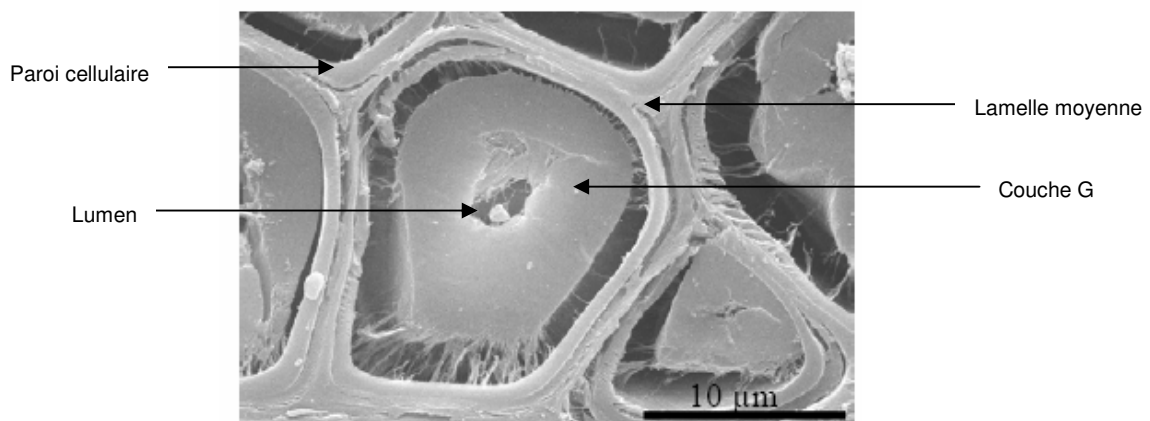


Figure 8 : Observation de la couche G du bois de tension de peuplier (M.E.B. d'après [Rapport d'activité LMGC_1999-2002])

3.3 Le bois juvénile

La croissance de l'arbre, du fait même de son mécanisme, se produit en périphérie, vers l'intérieur. Les cellules fabriquées en dernier, se trouvant en périphérie du tronc, sont les plus

anciennes par rapport à l'âge du cambium tandis qu'elles sont les plus jeunes selon le sens commun. Cette distinction permet d'introduire la notion de bois juvénile. «*Il est admis qu'il se forme dans le houppier vivant de l'arbre* » d'après [NEPVEU_94]. Sans rentrer dans le détail, ses caractéristiques anatomiques, chimiques, physiques et mécaniques particulières résulteraient d'un dérèglement du fonctionnement de l'assise libéroligneuse suite à la production d'hormones (auxines) par des branches vivantes. Le bois juvénile présente globalement des caractéristiques, moins intéressantes en vue de son exploitation en particulier d'un point de vue mécanique. La distinction bois juvénile/bois mature se détermine à l'aide de divers indicateurs anatomiques (longueur des fibres, angle des microfibrilles,...). Elle est généralement plus marquée pour les résineux que pour les feuillus sans oublier que d'une manière générale, la zone considérée est plus petite pour les feuillus dont la croissance est souvent plus lente que celle des résineux. La limite oscille entre 5 et 20 cernes depuis la moelle d'après [BENTSEN_1978 cité par NEPVEU_1994] pour les résineux et varie selon les auteurs de 20 à 40 voir même 50 ans pour les feuillus. Remarquons néanmoins qu'elle peut être variable d'un arbre à l'autre et à l'intérieur même d'un arbre suivant la hauteur considérée et les indicateurs retenus.

4 Comportement mécanique du bois vert et déroulage

NB: L'étude du mécanisme de formation du copeau de la partie II permettra de comprendre pourquoi certains descripteurs mécaniques² sont privilégiés dans l'approche du déroulage.

4.1 Bois et eau

Le bois présente une très forte affinité avec l'eau qui va grandement influencer son comportement. L'interaction entre le bois et l'eau est un sujet vaste et complexe dont l'origine se situe à l'échelle macromoléculaire. Nous nous contenterons une nouvelle fois d'expliquer les seules notions nécessaires à la poursuite de cette étude.

On trouve l'eau sous deux formes dans le bois : l'eau dite « libre » et l'eau « liée ». La première se trouve au niveau des lumens des cellules tandis que la seconde est localisée dans les parois cellulaires par l'intermédiaire de sites de sorption. A l'état vert, le bois d'un arbre présente toujours de l'eau liée et une part plus ou moins importante d'eau libre. Peu après l'abattage, il est fréquent, de mesurer des taux d'humidité du bois supérieurs à 100 % soit une masse d'eau supérieure ou égale à la masse de matière ligneuse sèche. En fonction des conditions extérieures, une partie de l'eau va être évacuée par différents mécanismes. D'abord,

² [Thibaut_1988] a choisi E_R (le module d'élasticité transversal), σ_f (la valeur seuil plastique en compression transversale), τ (la contrainte de cisaillement de roulement RT) et K_{IC} (la résistance à la rupture en RT mode I). Par la suite, d'autres critères sont présentés (cf. Figure 10) mais les phénomènes visés restent les mêmes.

l'eau libre se retire des vides cellulaires. Une fois toute l'eau libre évacuée (ressuyage), on atteint le point de saturation des parois cellulaires, usuellement qualifié de Point de Saturation des Fibres (P.S.F.). On retient en général 30% d'humidité comme ordre de grandeur pour qualifier le P.S.F. Pour peu qu'on se situe suffisamment loin du P.S.F ($H\% > 50\%$), ce qui est généralement le cas des bois déroulés, les différents paramètres mécaniques du bois à faible vitesse de déformation (modules d'élasticité ou constantes élastiques dans les trois directions privilégiées sur la Figure 9) sont indépendantes du taux d'humidité.

Par la suite, la baisse de teneur en eau se fait par extraction de l'eau liée des parois. Le départ de l'eau des sites de sorption entraîne une réorganisation à l'échelle macromoléculaire qui génère les variations dimensionnelles concrétisées par un retrait principalement fonction de la direction du bois (longitudinale, radiale ou tangentielle). [BADEL et PERRE_2005] remarquent : « Depuis la phase de lignification, les parois cellulaires ont toujours été saturées d'eau, même si l'arbre a plusieurs siècles. Le passage au domaine hygroscopique est donc un état complètement nouveau pour les parois du bois. Cela explique en particulier pourquoi du bois réhumidifié ne sera jamais identique à du bois vert. ». En dessous du P.S.F., les caractéristiques mécaniques ont tendance à augmenter lorsque le taux d'humidité diminue (cf. Figure 9).

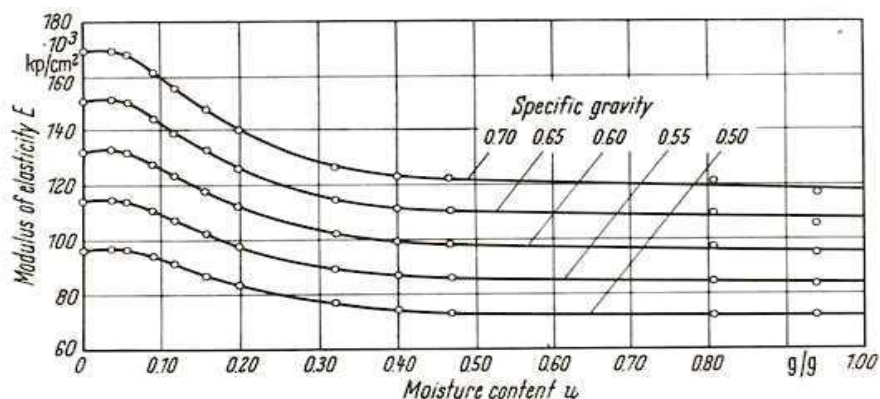


Figure 9 : Influence du taux d'humidité sur le module élastique longitudinal d'échantillons de chêne (d'après [KOLLMANN et al_1960] cité dans [KOLLMANN et al_1984])

4.2 Influence de la densité

De nombreuses études, parfois anciennes, ont permis de mettre à jour une forte corrélation entre les différentes constantes élastiques d'un échantillon de bois et sa densité. Ainsi, sur la Figure 9, on note une augmentation du module d'élasticité longitudinal avec l'infra densité (masse anhydre sur volume saturé).

4.3 Influence de la température

D'une manière générale, l'élévation de la température d'un bois diminue toutes ses propriétés mécaniques d'après [GERHARDS_1982]. [BARDET et al_2003] ont analysé l'influence de la densité et de la température sur les propriétés mécaniques intéressantes pour le déroulage

de dix bois guyanais à partir d'essais de compression, de ténacité et de cisaillement. Ils ont retenus quatre paramètres par type de sollicitations provenant tous des courbes chargement/déplacement:

➤ En compression radiale : E_R le module d'Young en compression radiale, σ_y la contrainte limite élastique, ε_y la déformation dans la direction associée et $W_{20\%}$ un critère énergétique tiré de l'aire sous la courbe contraintes/déformations (jusqu'à 20% de déformation).

➤ En cisaillement radial : G_R le module apparent en cisaillement radial, $W_{4.6^\circ}$ critère énergétique obtenu à partir de l'aire sous la courbe jusqu'à une déformation angulaire de 4.6° , τ_R la contrainte à la rupture en compression et γ_R la déformation angulaire associée.

➤ Rupture : P_f critère de rigidité, G_f critère énergétique obtenu à partir de l'aire sous la courbe, σ_R la valeur de la contrainte maximale avant rupture et d_f le déplacement associé.

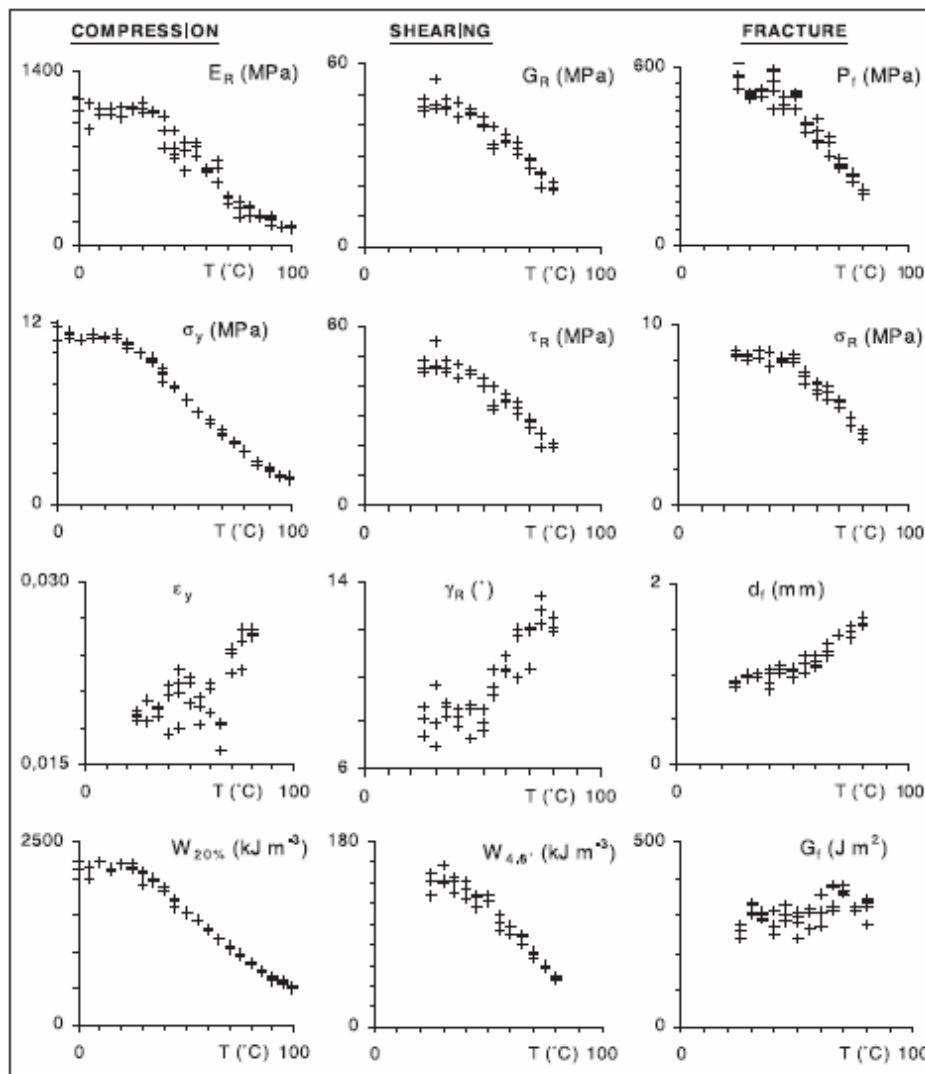


Figure 10 : Evolution de 12 critères mécaniques en fonction de la température pour une essence tropicale (Angélique rouge ou Dicorynia, chaque point est issu de 3 répétitions d'après [BARDET et al_2003])

La Figure 10 représente l'évolution de ces 12 critères en fonction de la température pour une des 10 essences (*Dicorynia*). Remarquons d'abord qu'une hausse de la température se traduit par une plus grande déformabilité du bois puisque les critères associés aux déformations augmentent avec celle-ci (ϵ_y , γ_R , d_f).

Les courbes obtenues pour E_R , G_R , P_f , σ_y , τ_R , σ_R , $W_{20\%}$ et $W_{4.6^\circ}$, sont semblables par catégories et typiques d'un matériau viscoélastique. Pour des températures basses (10°C), les différents critères sont approximativement constants (zone vitreuse) puis ils diminuent fortement aux alentours de 55°C, température de transition vitreuse, pour redevenir presque constant (zone d'état caoutchouteux). Les auteurs précisent toutefois que le processus ne semble pas achevé à 80°C, température maximale des essais. Le point d'inflexion observé pour ces différents critères peut être attribué, comme d'autres auteurs l'ont déjà proposé, à la température de transition vitreuse des lignines. Le bois étant un polymère composite, il présente donc plusieurs transitions vitreuses qui sont le fruit des diverses interactions entre ses constituants (notamment lignines – polysaccharides).

Restons très prudents quant aux extrapolations de ces résultats pour des vitesses de déformations élevées. En effet, la plupart des essais mécaniques réalisés à ce jour ont été menés dans des conditions quasi-statiques. Les vitesses de déformations atteintes, c'est-à-dire les vitesses auxquelles se produisent ces déformations, sont bien inférieures à celles rencontrés lors d'un déroulage (de l'ordre de 10^3 à 10^4 s⁻¹ d'après [THIBAUT et BEAUCHÊNE_2004]).

4.4 Influence de la vitesse de déformation

Il n'existe pas à ce jour de loi de comportement pour le bois vert sollicité à haute vitesse de déformation (>100 s⁻¹). [UHMEIER et SALMEN_1996] observent une nette influence des vitesses de déformation, même intermédiaires (i.e. entre 1 et 100 s⁻¹), sur les contraintes de limite élastique radiale en compression (direction importante dans le cas du déroulage) pour des bois d'épicéa.

L'allure générale des courbes Figure 11b est classique du comportement du bois en compression radiale : trois zones principales se dessinent. La première représente le comportement élastique en compression des parois cellulaires en petites déformations. Au passage du premier coude (limite élastique), on distingue un palier. Cette zone correspond au flambement viscoélastique des parois cellulaires. Un fois tous les lumens des cellules fermés, le bois se comporte comme un matériau de porosité nulle. Les contraintes augmentent alors très fortement avec les déformations.

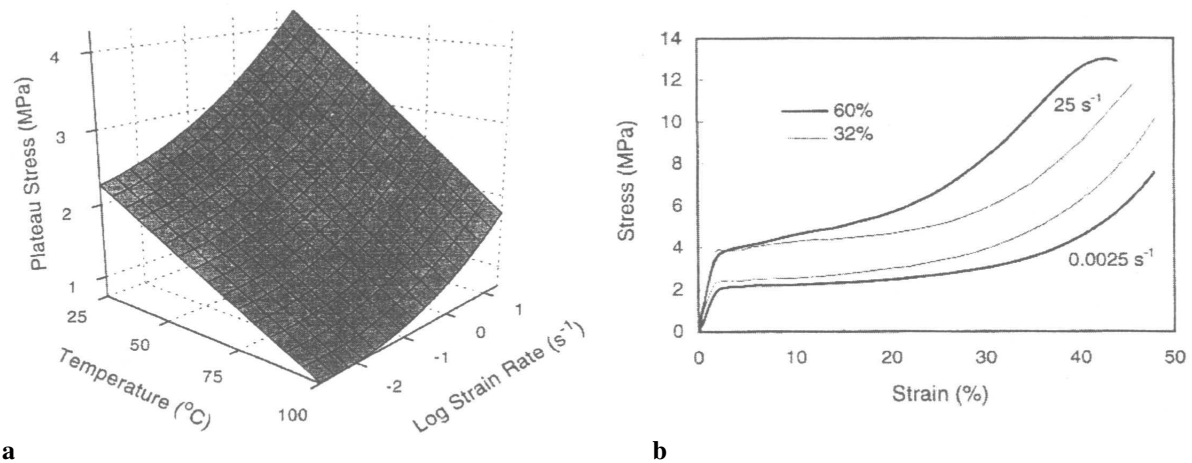


Figure 11 : Evolution de la contrainte limite élastique radiale de compression (a) en fonction de la température et de la vitesse de déformation et (b) de la contrainte de compression radiale en fonction de la déformation pour différents teneurs en eau et différentes vitesses de déformation pour le bois d'épicéa d'après [UHMEIER_1996] [UHMEIER et SALMEN_1996] révèlent aussi l'existence d'un fort couplage entre la teneur en eau (libre en particulier) et ces vitesses qui devrait s'accroître encore à mesure qu'elles augmentent. En effet, le bois est poreux et présente une certaine quantité de liquide dans les vides cellulaires à l'état vert. Evacuer cette eau sera d'autant plus difficile que la vitesse de sollicitation sera élevée ce qui se traduit par une augmentation apparente des raideurs des parois cellulaires.

Ces quelques notions parcourues permettent de mieux appréhender le mécanisme de coupe, une des sources principales des vibrations identifiées par les opérateurs. Plusieurs travaux de référence ont permis d'en établir une description assez détaillée.

PARTIE II : La coupe par déroulage

1 Définitions et généralités

1.1 La formation du copeau en mode 0-90

[MAC KENZIE_1961] a proposé une nomenclature des différents modes de coupe d'une pièce de bois tenant compte de son orthotropie représentée sur la Figure 12. Le premier terme correspond à l'angle entre l'arête de l'outil et les fibres de bois ; le second caractérise l'angle entre la direction de coupe et ces mêmes fibres. Dans le cas du déroulage, on parle donc d'un mode 0-90 T puisqu'on distingue dans cette catégorie, deux sous modes : T et R qui correspondent à la direction de coupe.

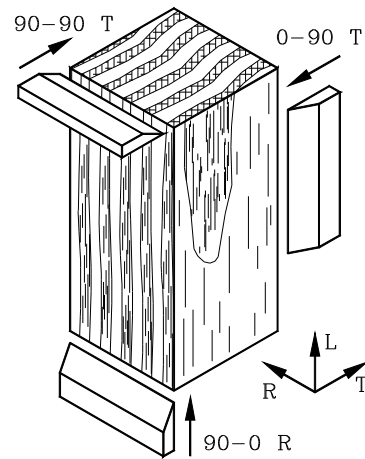


Figure 12 : Modes principaux de coupe du bois

C'est le mode de coupe nécessitant les plus faibles efforts, toutes choses égales par ailleurs : 5 fois moins qu'en mode 90-90. Ce dernier mode est toutefois susceptible d'intervenir ponctuellement pendant le déroulage lorsque le couteau rencontre un nœud. Comme [LENEY_1960] ou [THIBAUT_1988] et de nombreux autres auteurs, on peut choisir de modéliser la coupe par déroulage comme une coupe orthogonale (l'outil présentant une seule arête, constitué d'un dièdre). Ce terme est utilisé lorsque l'arête de coupe reste perpendiculaire à la direction de coupe lors du déplacement relatif entre l'outil et le matériau usiné. C'est un cas des plus simple puisqu'un plan perpendiculaire à l'arête suffit à décrire complètement le processus.

Dans un travail qui a fait référence pour la plupart des auteurs, [FRANZ_1958] étudiant la coupe en mode 90-0, a distingué trois types de formation de copeau :

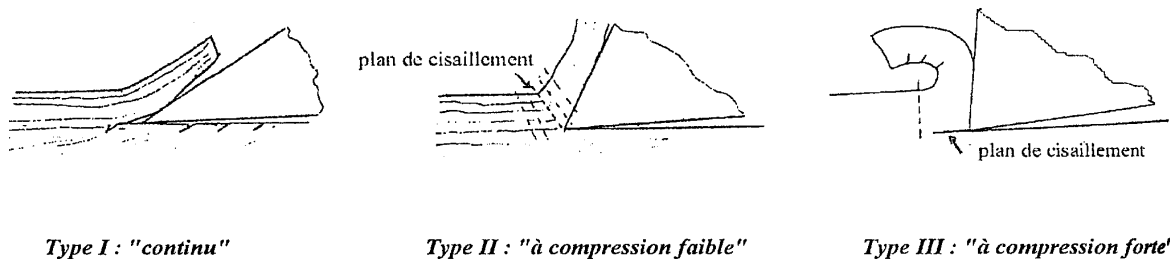


Figure 13 : Types de formation de copeaux d'après [FRANZ_1958]

➤ Type I : Le copeau est obtenu par fendage : l'outil pénètre dans le bois en séparant la matière grâce à une fente qui se propage en avant de l'arête de coupe. Puis, le bois se comporte comme une poutre encastrée en se brisant sur la face d'attaque de l'outil. Une faible résistance à la traction perpendiculaire et une bonne résistance en flexion favorisent ce type de copeau. Il s'agit donc quasiment d'un mode de coupe interrompue entraînant de grandes variations des efforts plus ou moins périodiques.

➤ Type II : Il résulte de la compression des fibres et ce, jusqu'à la rupture. Cette rupture se fait par cisaillement le long d'un plan oblique (plan de cisaillement) allant de l'arête de coupe à la surface de travail. Ce type de copeau est recherché car il permet l'obtention d'un bon état de surface malgré une usure de l'outil plus prononcée qu'en type I. De plus, les efforts sont continus.

➤ Type III : Il est obtenu par flambage (efforts de coupe fortement variables). Il apparaît lorsque les efforts de coupe compriment puis cisailent le bois en avant de l'arête de coupe. L'état de surface n'est pas excellent et ce type de copeau est relativement peu rencontré dans le déroulage.

Ces trois types de mécanismes peuvent apparaître successivement et même simultanément lors d'un déroulage. D'après [DECES-PETIT_1996], « *Lorsqu'on observe une fissuration cyclique du copeau (cf.II.2.1.2), on peut avoir d'abord une coupe par plan de cisaillement et effort de refoulement. Quand l'effort de refoulement causé par la surface cylindrique de l'arête et par les forces de frottement s'exerçant sur les faces d'attaque et de dépouille devient trop important, il y a formation d'une fente adventive qui va avoir tendance à rejoindre la surface du copeau.* ». De plus, la structure même du matériau usiné est l'une des raisons majeures de la non homogénéité du régime de coupe (rayons ligneux, variations de densités, variations de largeur de cerne,...).

Remarque : [MACKENZIE_1961] a également introduit un autre type de copeau : copeau de type 0 à flux continu, correspondant au minimum de déformation.

1.2 Géométrie de la zone de coupe

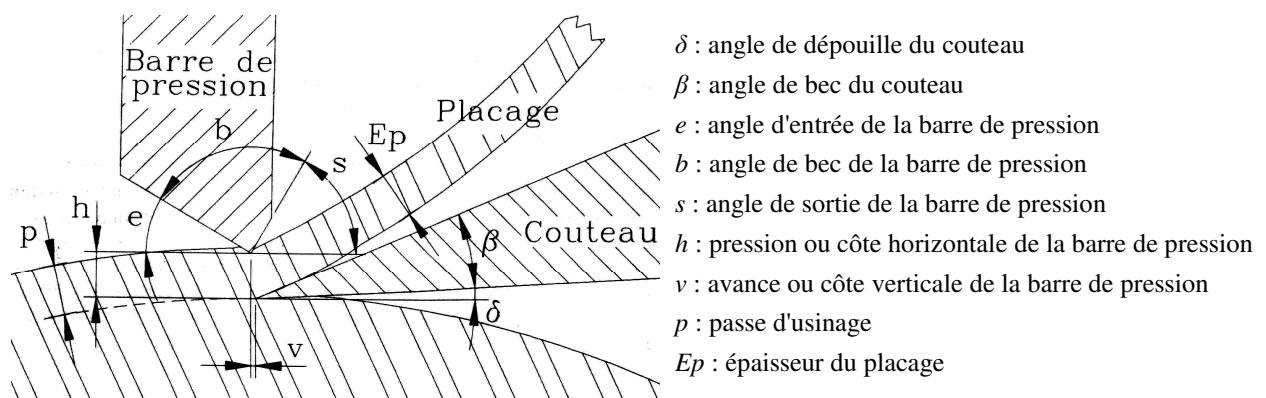


Figure 14 : Géométrie du déroulage [DECES-PETIT_1996]

1.2.1 Le couteau

Les couteaux des dérouleuses industrielles mesurent de 90 cm à 5 m de longueur suivant les machines. L'angle d'attaque élevé (de l'ordre de 70°) et l'angle de dépouille δ faible (variant généralement de -2° à $+2^\circ$) se traduisent par un angle de bec du couteau β faible lui aussi puisqu'il varie entre 19° et 21° . Ils présentent une grande acuité d'arête, ce qui confère au biseau une bonne flexibilité. Cette géométrie permet de produire un copeau continu en mode II pratiquement sans endommagement mais elle s'accompagne aussi de l'apparition cyclique de fissures typiques du déroulage (cf. II.2.1.2). De plus, la faible valeur de l'angle de bec, comparativement au défonçage par exemple, confère aussi une certaine fragilité à l'arête de coupe, qui peut localement se retourner sur un point dur comme un nœud mal étuvé, un nœud pourri contenant des éléments siliceux ou un corps étranger de type métallique par exemple. On peut utiliser un renfort local en ménageant un micro biseau sur l'arête de l'outil de manière à améliorer sa durée de vie. Dans des conditions normales d'utilisation, on considère qu'un outil peut usiner, sans être démonté pour affûtage, pendant toute la durée d'un poste (8 heures voir plus suivant le type d'essence et les conditions de coupe retenues).

Un couteau de déroulage doit être parfaitement bien affûté sur toute la longueur utilisée. Le rayon de bec de l'outil ne dépasse pas $5 \mu\text{m}$ pour conserver des conditions optimales. Cela permet de diminuer les efforts de coupe et d'obtenir un placage de bonne qualité. En effet, le moindre retournement local de l'arête de coupe se traduit par une marque sur le placage susceptible de déclasser le produit. Seule une enquête auprès des opérateurs pourrait nous permettre de savoir s'ils sont capables d'identifier la signature acoustique ou vibratoire de ce phénomène.

1.2.2 La barre de pression

Le rôle principal d'une barre de pression est d'exercer localement un effort de compression qui s'oppose aux contraintes de traction perpendiculaire, responsables de la fissuration cyclique du placage (cf. II.2.1.2). Au niveau mondial et surtout en Europe, une large majorité des dérouleuses est équipée d'une barre de pression statique ronde (généralement utilisée pour les résineux et ce, surtout outre-atlantique) ou angulaire qui permet des réglages plus fins et plus précis. Dans ce dernier cas, l'angle d'entrée e est d'environ 15° ce qui correspond à la valeur proposée par [LUTZ_1974] et confirmée par [FONDRONNIER et GUILLERM_1979]. L'angle de sortie s peut être grand ($70-100^\circ$) ou petit (45°), la face de sortie servant de face de décompression afin d'éviter un éclatement du placage. Nous reviendrons plus en détail sur son rôle dans le mécanisme de formation du placage en II.2.2.

2 La formation du placage

Plusieurs travaux fondateurs ont permis de mieux appréhender le procédé ([LENEY_1960], [LUTZ_1974]), notamment par une observation détaillée de la zone de coupe, mais c'est

[THIBAUT_1988] qui, le premier, a proposé un modèle cohérent de formation du placage. [MOVASSAGHI_1985], [MOTHE_1988], [MARCHAL_1989], [DECES-PETIT_1996] et [BEAUCHÊNE_1996] constituent des travaux complémentaires et forts utiles à une description précise du processus. Sans vouloir effectuer un synthèse bibliographique qui contiendrait inévitablement des redites, nous allons aborder le mécanisme de formation du placage afin de mieux comprendre quelles peuvent être les sources sonores et vibratoires détectables par l'opérateur.

2.1 Principe en l'absence de barre de pression

2.1.1 Mécanisme général

[THIBAUT_1988] a défini trois zones essentielles Figure 15 :

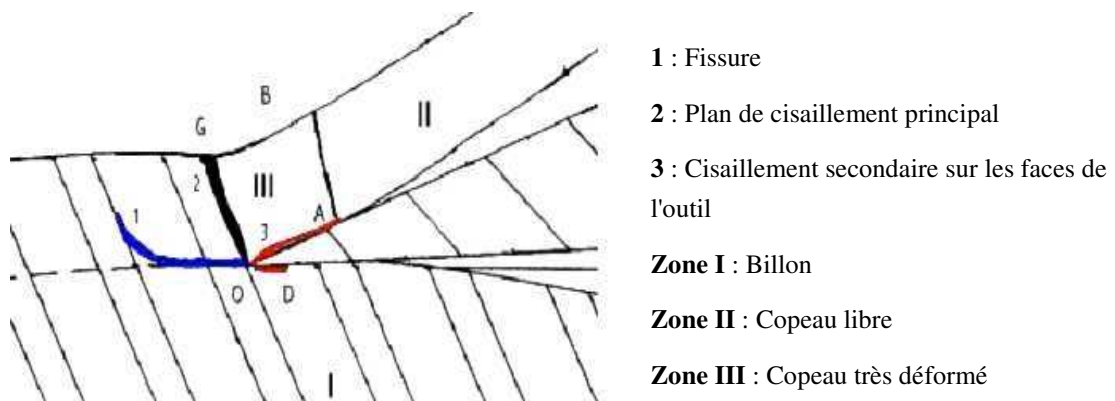


Figure 15 : Formation du copeau sans barre de pression d'après [THIBAUT_1988]

➤ La première se situe en amont de l'arête de coupe et sous l'outil. Le comportement du bois y est supposé élastique linéaire en petites déformations. Le billon se déforme légèrement sous l'action du couteau et retrouve son état initial après le passage de ce dernier. Cela peut se traduire par une légère sur-épaisseur du billon d'autant plus marquée que l'angle de dépouille est faible et le placage est mince (sur-épaisseur estimée inférieure à 10% de l'épaisseur du copeau). En effet, suite à un déroulage avec des réglages appropriés, lorsqu'on inverse le sens de rotation, la face de dépouille de l'outil frotte sur le billon. C'est d'ailleurs de cette manière que certains auteurs ont mesuré le coefficient de frottement entre le bois et le métal [MOVASSAGHI_1985]. A contrario, une forte dépouille et une profondeur de passe importante favoriseront l'apparition d'une sous-épaisseur du billon.

➤ La seconde zone se trouve au-delà de la surface de contact entre le placage et la face d'attaque. Le copeau n'est donc soumis qu'à son propre poids. Il présente alors une courbure caractéristique, appelé tuilage (cf. II.3.1). La courbure instantanée observable juste après la coupe est beaucoup plus grande que celle mesurée après relaxation.

➤ La troisième zone, ainsi que ses frontières, est le siège d'importantes déformations. Elle est limitée par le plan de cisaillement 2, la surface de contact copeau/face d'attaque et la frontière AB (AB défini arbitrairement orthogonal à la face de l'outil).

Grâce à de nombreux enregistrements vidéo focalisés sur la zone de coupe, [THIBAUT_1988] souligne : « *L'observation en continu de l'écoulement du copeau suggère un mécanisme très proche de celui de la coupe des métaux et des polymères.[...] Le phénomène principal du déroulage sans barre de pression peut s'assimiler à un cisaillement localisé dans un plan quasiment orthogonal à la surface usinée (le plan OG)* ». [THIBAUT et BEAUCHÊNE _2004] observent une forte déformation par cisaillement (environ 35%) de l'ensemble du copeau dans la zone proche du plan considéré. Conformément à la théorie de Merchant, elle s'accompagne d'un allongement et d'une diminution de l'épaisseur de 4 à 8%. Par contre, cet allongement n'est plus discernable dès que l'on s'éloigne d'environ 5 fois l'épaisseur déroulée. C'est une illustration des caractéristiques viscoélastiques du bois vert. L'observation de l'inclinaison des rayons ligneux au passage de A est très significative sur ce point puisqu'ils se redressent et semblent ne jamais avoir été inclinés.

Dans (3) et à proximité de G, le copeau subit des déformations importantes respectivement en cisaillement et en compression. La zone proche de G fortement comprimée (taux de compression de 30 à 40%) est souvent une zone privilégiée d'évacuation de l'eau libre des lumens des cellules. Ce phénomène peut parfois conduire au flambement local de la structure pour des bois tendres déplaçant ainsi le point G à l'arrière de l'arête de coupe.

Ensuite, ces déformations disparaissent presque complètement grâce à la récupération viscoélastique du bois comme lors d'essais de compression quasi-statiques jusqu'à des déformations comparables. Il subsiste toutefois une déformation résiduelle de 1 à 2% qui se concrétise par le tuilage.

A l'échelle cellulaire, l'outil ne sectionne pratiquement que des vaisseaux ou les fibres et les trachéides dont les parois sont minces. Dans le cas général, la déformation des parois cellulaires entraîne rapidement une délamination intercellulaire au niveau de la lamelle moyenne. Les fibres ainsi séparées passent de part et d'autre de l'arête de coupe. Très fréquemment, et particulièrement dans des parties tendres, un paquet de fibres très fortement comprimées se forme en amont de l'arête de coupe.

On peut donc considérer qu'une fissure adventive se propage entre les fibres générant ainsi un état de surface fait de relief et de creux dont l'amplitude varie entre 2 et 3 diamètres de cellules soit une centaine de microns. Lorsque les paquets de fibres sont évacués de la zone de coupe, cela génère un foisonnement de cellules sur le placage. C'est pourquoi l'épaisseur du placage mesurée est supérieure d'une quarantaine de microns à l'épaisseur nominale.

Remarque : L'angle entre OG et la normale à la face usinée est anormalement faible pour ce type de mécanisme. Cela provient du comportement particulier du bois en compression

transversale (zone de flambement viscoélastique avec changement de volume) bien modélisé par [BONIN_2006].

2.1.2 La fissuration

2.1.2.1 Genèse

La géométrie du couteau permet de limiter la déformation locale du copeau et d'éviter un effondrement de l'arête. Pourtant, cette configuration génère un problème majeur notamment pour la manutention ou l'encollage du placage : la fissuration. [THIBAUT_1988] a effectué une analyse particulièrement détaillée de ce phénomène dont quelques planches sont visibles sur la Figure 16 suivante.

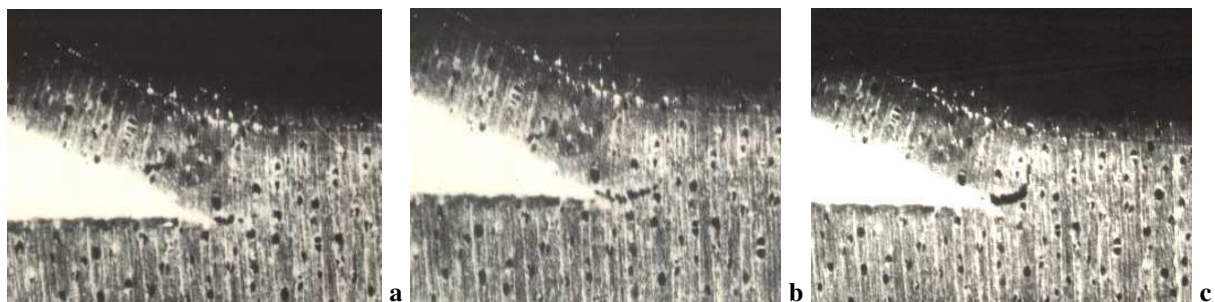


Figure 16 : Ouverture et cheminement d'une fissure de déroulage d'après [THIBAUT_1988]

La déformation imposée au copeau crée une zone de contrainte en traction perpendiculaire juste devant l'arête et lorsque le facteur d'intensité de contrainte K_{IC} (cf. II.2.1.2.3) dépasse une valeur critique, une fissure apparaît brutalement en mode I (a) dans une direction quasiment parallèle au plan de coupe. Cette fissure s'ouvre alors (b) (d'autant plus longue que le placage est épais ou que l'angle de dépouille est important) sous l'action de contraintes quasiment perpendiculaires au plan de coupe. L'analyse de la distribution des contraintes principales devant l'arête a permis de confirmer ces observations puisque : « *si la fissure se produit, elle doit normalement se diriger vers l'intérieur de la pièce de bois, créant un arrachement de la matière sous le plan de coupe* ». Ensuite, la fissure change brutalement d'orientation (c) sous l'action combinée de contraintes de traction et de cisaillement induites par la flexion du copeau pour devenir presque perpendiculaire au plan de coupe en se dirigeant vers la surface libre de la matière mais de façon plus lente.

[THIBAUT et BEAUCHÊNE _2004] présentent une nouvelle manière de décrire ce phénomène basée sur un bilan énergétique dans la zone de coupe. Lorsque l'énergie nécessaire à la fabrication du placage dissipée dans le plan de cisaillement et les zones fortement comprimées proches de l'arête devient supérieure à celle permettant l'ouverture d'une fissure macroscopique, alors cette dernière apparaît. Un facteur déterminant pour connaître le risque de fissuration sera donc le rapport entre l'énergie de rupture et l'énergie dissipée en compression ou cisaillement. [BEAUCHÊNE_1996] a mené une étude complète sur le

comportement mécanique de 10 essences tropicales à l'état vert en fonction de la température. Il a mis en évidence quatre ratios permettant de caractériser le risque de fissuration, la résistance au flambement (effet Horner cf. II.2.3) et l'influence de la barre de pression. L'Équation 1 décrit le risque de fissuration à partir de l'énergie de rupture G_f et de l'énergie de cisaillement RT $W_{4.6^\circ}$ pour une déformation angulaire de 4.6° en intégrant l'influence de la température :

$$\text{Risque de fissuration} = \frac{G_f}{W_{4.6^\circ}}$$

Équation 1 : Ratio du risque de fissuration

Plus ce ratio est grand et plus l'énergie nécessaire à la création d'une nouvelle surface est grande par rapport à celle requise pour le cisaillement du copeau. Il s'agit donc bien d'un indicateur de la prédisposition d'un bois à fissurer dans des conditions données. En cours de déroulage, les gradients de densité ou de température rencontrés, même pour des essences « homogènes », nécessitent une mesure en temps réel pour s'adapter aux conditions locales d'usinage et la seule connaissance d'un ratio moyen ne peut suffire. Rappelons aussi la nécessité d'être prudent avant d'extrapoler des résultats obtenus lors d'essais mécaniques réalisés à faibles vitesses de déformation. Les travaux regroupés dans [BONIN_2006], reposant sur une loi de comportement hyper élastique, proposent une première réponse convaincante sur ce dernier point.

2.1.2.2 Influence des paramètres de coupe

Parmi les paramètres de coupe, la profondeur de passe et la température sont les plus influents. Toutefois, suivant les conditions, la vitesse et la valeur de l'angle de dépouille peuvent eux aussi favoriser l'apparition ou la progression de fissures. Le rôle de la barre de pression sur la fissuration sera davantage détaillé dans II.2.1.2.

➤ La passe d'usinage

Pour une essence donnée (essentiellement fonction de la densité), il existe une épaisseur maximum au delà de laquelle les fissures apparaissent en l'absence de barre de pression. En effet, les efforts nécessaires à la formation du copeau augmentent avec l'épaisseur de ce dernier. En pointe d'outil, le facteur d'intensité de contrainte dépasse alors sa valeur limite K_{TC} et une fissure s'ouvre. [THIBAUT_1988] définit le rapport $Fi=d/p$ entre d , le pas de la fissuration, et p , la passe d'usinage. Ce rapport évolue peu pour des copeaux où la fissuration est bien marquée puisqu'il reste compris entre 1,3 et 1,7. Il observe aussi que pour des essences homogènes, plus le placage est épais, et plus les fissures sont profondes et espacées.

➤ La température du bois

Nombreuses sont les références bibliographiques, notamment [THIBAUT_1988] et [MARCHAL_1989], qui relatent une augmentation de l'épaisseur maximale possible sans

fissuration lorsque la température augmente. Les dérouleurs connaissent bien cette caractéristique du bois vert et chauffent une majorité d'essences afin de diminuer les fissures du placage (cf. II.4.3.1.3). [BEAUCHÊNE_1996] a confirmé cette tendance en montrant que le ratio défini par l'Équation 1 augmente avec la température (G_f est constant et $W_{4,6^\circ}$ diminue, (cf Figure 10).

➤ La vitesse de coupe

[MOVASSAGHI_1985] constate, comme d'autres auteurs, que la probabilité d'apparition de fissures est moins grande à très faible vitesse (0.005 m/s) qu'à des vitesses plus élevées (0.5 m/s). Si les conditions de coupe et l'essence conduisent à la formation de fissures sur une partie seulement du placage, un accroissement de la vitesse de coupe augmentera très fortement la probabilité d'obtenir des fissures sur une plus large zone. Le comportement à grande vitesse de déformation du bois, bien qu'encore mal connu à ce jour, conduit à une augmentation des caractéristiques mécaniques avec la vitesse de sollicitation. Il se rigidifie à mesure que la vitesse de déformation augmente et la fissuration se développe. Il faut noter aussi qu'à forte vitesse, l'expulsion de l'eau libre contenue dans les lumens des cellules nécessite très probablement davantage d'efforts (I.4.4.). Par contre, selon l'auteur, une fois le seuil de fissuration nettement dépassé, l'augmentation de la vitesse de coupe ne semble plus modifier significativement le risque d'apparition de fissures.

➤ L'angle de dépouille

Son influence est assez faible voir nulle suivant les auteurs. Ainsi, [THIBAUT_1988] note que le rapport Fi augmente légèrement avec la valeur de l'angle de dépouille (accompagnée d'une faible augmentation de la profondeur des fissures d'après [MOVASSAGHI_1985]). Selon THIBAUT, « *il faut sans doute attribuer cela à la restitution d'énergie élastique plus importante de la part de l'outil qui est soumis dans ce cas à un moment fléchissant notable* ».

L'influence réelle de ces deux derniers facteurs reste assez floue et contradictoire selon les auteurs. Il serait bon de se pencher sur ces points.

2.1.2.3 Influence des paramètres structuraux

➤ Masse volumique

D'une manière générale, plus un bois est dense et plus la fissure apparaît tôt à mesure que l'épaisseur augmente. De nombreuses références bibliographiques l'attestent. [THIBAUT_1988] a défini un facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} qui décrit bien, de manière qualitative au moins, la forte augmentation du risque d'apparition de fissure avec la densité.

Essences	Densité anhydre (g/cm ³)	Passer où commence la fissuration nette (mm)	Facteur d'intensité de contrainte critique K _{IC} (Mpa·m ^{1/2})
<i>Samba</i>	0.32	1.10	0.25
<i>Hêtre</i>	0.65	1.00	0.45
<i>Merisier</i>	0.70	0.90	0.58
<i>Buis</i>	1.00	0.30	0.76

Tableau 1 : Valeurs de p et K_{IC} en début de fissuration d'après [THIBAUT_1988]

L'approche énergétique proposée dans [THIBAUT et BEAUCHÊNE_2004] confirme les précédents résultats. Globalement, le ratio de l'énergie de rupture sur l'énergie dissipée en cisaillement ou en compression diminue avec l'augmentation de la masse volumique. Autrement dit, à épaisseur de placage constante, l'énergie nécessaire à la formation d'un copeau par fissuration (type I selon FRANZ) augmente moins vite avec la densité que celle requise pour obtenir ce même copeau par cisaillement (type II).

D'autre part, [MOVASSAGHI_1985], étudiant la fissuration de placages de châtaigner, remarque que « l'augmentation de la densité moyenne du placage entraîne l'augmentation de la profondeur, de la longueur et de l'angle des fissures, mais diminue leur fréquence ».

Pour des bois homogènes, la fissuration est périodique dès qu'elle est suffisamment nette. Notons cependant qu'à densité égale, le risque de fissuration peut être fortement variable d'une essence à l'autre. Le seul critère densité ne peut pas suffire bien qu'il soit essentiel.

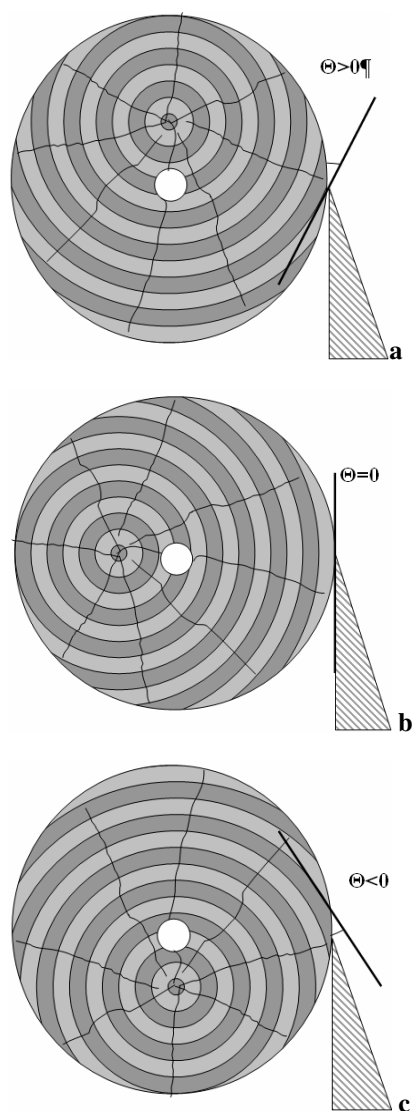
➤ La présence de rayons ligneux dans le placage

Certaines essences présentent des rayons ligneux très épais comme le chêne par exemple. Ils constituent non seulement un obstacle à la coupe mais sont des lieux majeurs de concentrations de contraintes. [MARCHAL_1989], en déroulant du chêne vert, pubescent ou liège, observe une fissuration très précoce (dès 5 dixièmes d'épaisseur). Il précise : « il ne s'agit pas de fissurations de type « classique », mais plutôt de ruptures exclusivement localisées à l'intérieur des gros rayons ligneux et dirigées radialement ».

Pour la plupart des essences, ils ont davantage d'influence sur le cheminement des fissures de déroulage que sur leurs genèses puisqu'ils constituent des directions d'hétérogénéité du matériau.

➤ La direction de coupe

[MOVASSAGHI_1985] a mené une étude complète pour deux essences (châtaignier et Douglas) de l'angle θ qui caractérise l'orientation de la structure du bois par rapport au plan de coupe (3 orientations principales définies Figure 17). Ce paramètre est essentiel puisque bien peu d'arbres sont parfaitement cylindriques et centrés sur la moelle. Plus il est élevé en valeur absolue et plus le placage généré est hétérogène.



- Angle positif (a): la direction de coupe est orientée de l'extérieur vers l'intérieur du billon. Dans ce cas, la fissuration est peu influencée par le plan ligneux car l'angle d'inclinaison des rayons ligneux par rapport à la fissure ne favorise pas son expansion. La fréquence des fissures est alors relativement élevée et leur profondeur reste limitée.

- Angle nul (b): la direction de coupe est parallèle à celle du cerne. La fissuration est alors bien régulière et son cheminement est quasiment indépendant du plan ligneux. La fréquence de fissuration est un peu plus faible que pour des valeurs de θ positives (toutes chose égales par ailleurs).

- Angle négatif (c): la direction de coupe est orientée de l'intérieur vers l'extérieur du billon. C'est le cas le plus favorable à la fissuration. Sa genèse est facilitée de part la forte hétérogénéité du copeau tout comme sa propagation grâce à divers éléments de structure du bois. En rencontrant un rayon ligneux ou de petits vaisseaux, elle trouve une zone fragile qui la guide vers la surface libre de la matière. Les fissures sont donc d'autant plus nombreuses, profondes et droites que θ est grand. Parallèlement, leur fréquence d'apparition est plus faible.

Figure 17: Directions de coupe³

[TAKANO et FUJIMOTO_1999] confirment ces observations sur deux résineux (sugi ou *Cryptomeria japonica* D. Don et larch ou *Larix kaempferi* Carr.). Ils montrent aussi que de petits accroissements annuels limitent l'expansion des fissures.

➤ La présence de bois de tension

Le bois de tension est en général localisé dans le secteur du billon où les cernes sont les plus larges. Une fois la mise au rond effectuée⁴, cette zone se trouve dans la partie opposée à la moelle par rapport au centre géométrique de la rondelle. [MOVASSAGHI_1985] mesure une

³ En toute rigueur, la Figure 17 devrait présenter des rondelles dont les largeurs de cerne sont dissymétriques. Dans un souci de simplification de la représentation et de l'interprétation, ce point n'a pas été spécifié.

⁴ La mise au rond est une opération de déroulage préliminaire dont l'objectif est la mise en forme du billon. Au départ, écorcé et souvent mal conformé, son déroulage donne des placages discontinus.

augmentation nette du pourcentage de placage fissuré qui passe de 41.72% à 70.71% en présence de bois de tension dans le cas du châtaigner. De plus, les fissures y sont plus longues et plus profondes. De part sa position dans le billon, ses effets ainsi que ceux dus à la direction de coupe vont tantôt s'ajouter, tantôt se contrecarrer vis-à-vis de la fissuration.

2.1.2.4 Fréquence et profondeur

Le lecteur aura remarqué une constante sous-jacente dans la description de la progression de la fissure. Quand le régime de fissuration est établi, une diminution de leur fréquence se traduit par une augmentation de leur longueur et de leur profondeur. Pourtant, aucun auteur n'a établi clairement ce lien. Il est vrai que la structure locale du bois joue un rôle essentiel dans la propagation de la fissure et perturbe cette tendance. Cette hypothèse mérite d'être confirmée puisqu'elle permettrait une mesure plus aisée du taux de fissuration d'un placage.

2.2 Intervention de la barre de pression

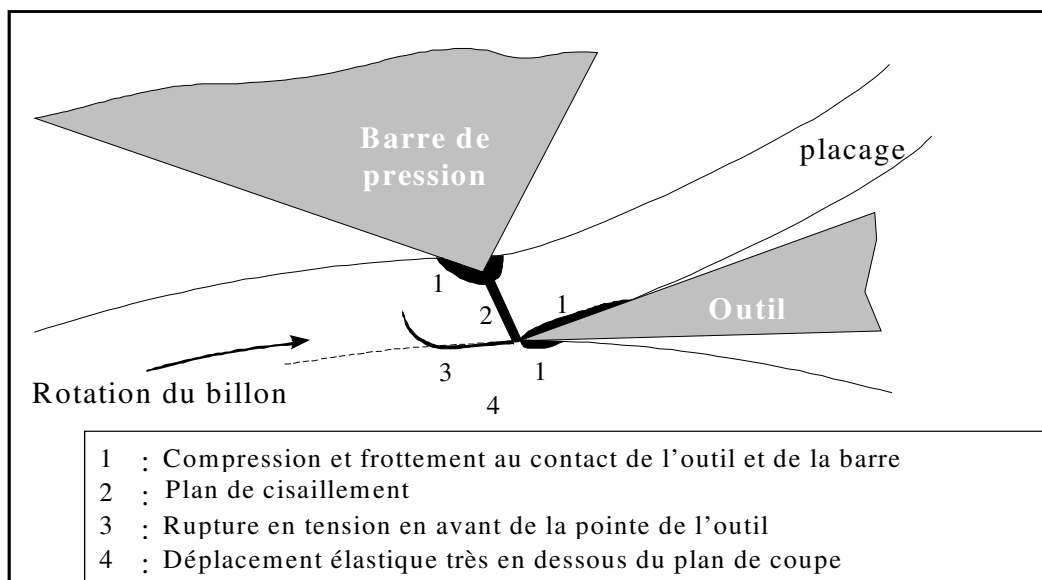


Figure 18 : Principaux phénomènes mécaniques intervenant lors du déroulage avec barre de pression d'après [THIBAUT et BEAUCHÊNE _2004]

On retrouve sur la Figure 18 les principaux phénomènes mécaniques intervenant lors du déroulage avec barre de pression : compression et frottement au contact de l'outil, cisaillement dans un plan très localisé, fissuration possible et déformation élastique du billon déplaçant ainsi le plan de coupe. L'utilisation de la barre génère un champ de contraintes en compression plus ou moins intense et étendu en fonction de sa géométrie, de sa pénétration et de la densité du bois comprimé en première approximation. En effet, la fissuration étant due à des contraintes de traction quasiment perpendiculaires au plan de coupe, il est logique d'imposer un champ de contraintes antagonistes. C'est le rôle premier de la barre même si elle permet aussi de stabiliser la coupe lorsqu'elle est correctement réglée.

Son action est gouvernée par « *les processus de flambement localisé du bois vert en compression perpendiculaire au fibres* » d'après [THIBAUT_1988]. Deux zones plutôt bien marquées sont distinguées. La première, située juste sous la barre, est délimitée par la sortie de l'eau provoquée par la forte diminution de volume des cellules comprimées. L'auteur précise que même si la mesure des déformations est délicate (estimée de l'ordre de 30 à 40%), elle dépasse largement le début de flambement de la structure du bois. La seconde zone, constituée du reste de la pièce de bois, subit des déformations élastiques (2%) inférieures à la limite avant flambement.

Dans la pratique, son utilisation s'accompagne de contraintes. C'est une pièce d'usure de plus à entretenir sans parler de la surconsommation d'énergie qu'elle engendre. Son réglage peut devenir délicat. Pour une épaisseur donnée, une cote verticale v trop grande comprimera exagérément une large zone en amont de l'outil sans toutefois appliquer correctement le champ de contraintes nécessaire pour lutter contre la fissuration. Dans le cas contraire, le bois sera « pincé » générant ainsi des efforts conséquents pour une qualité de placage médiocre (fissures sur la face extérieure en contact avec la barre, variations d'épaisseur). La cote horizontale h , considérée comme le paramètre le plus important du déroulage par plusieurs auteurs d'après [MOVASSAGHI_1985], permet de régler le taux de compression appliqué (10 à 20% de la passe d'usinage en général). Là encore, si cette dernière est trop importante, les fissures seront plus marquées. A l'inverse, un taux de compression trop élevé met en péril la régularité de l'épaisseur et précipite l'usure des outils. Pour des bois tendres, souvent plus sensibles aux arrachements, il est même possible d'observer des « bourrages » de fibres au niveau de la zone de coupe, synonymes d'états de surfaces très dégradés. Si le réglage de la cote horizontale a fait l'objet de beaucoup plus d'études que celui de la cote verticale, ils restent liés, et intervenir sur l'un, oblige à modifier nécessairement l'autre. [THIBAUT_1988] synthétise en notant : « *Pour une épaisseur de placage donnée, et une qualité de bois donnée, il y a un optimum de réglage des côtes horizontales et verticales.* »

[THIBAUT_1988], à partir d'observations expérimentales pertinentes de [HOADLEY_1962], a effectué une analyse très détaillée du plan de coupe en cours de déroulage qui permet de décrire le mécanisme à l'origine des variations d'épaisseur.

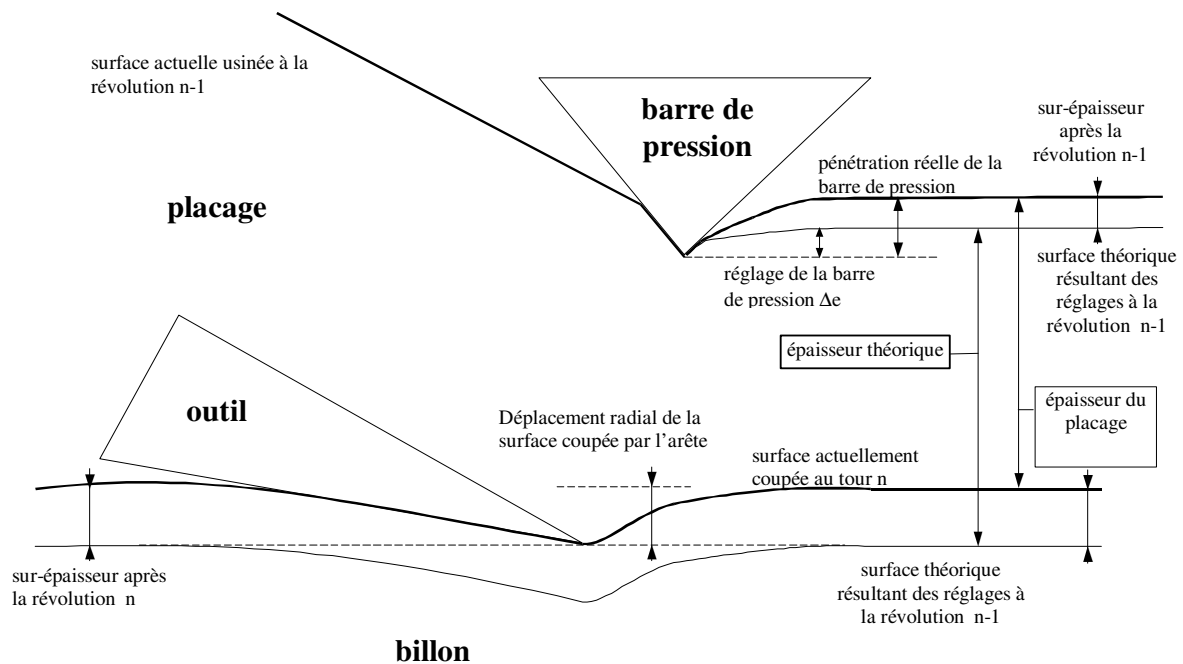


Figure 19 : Schéma des conséquences de l'utilisation de la barre de pression sur l'épaisseur du placage déroulé (tiré de [BEAUCHÊNE_1996] d'après [THIBAUT_1992])

En partant d'un billon aussi cylindrique que possible suite à sa mise au rond, un premier tour est nécessaire pour atteindre profondeur de passe et taux de pression théoriques souhaités. L'action de la barre comprime le billon entraînant un déplacement du plan de coupe vers l'extérieur du billon. L'épaisseur du placage est donc inférieure à la cote nominale recherchée. Les propriétés viscoélastiques du bois vont permettre à la surface du billon de retrouver sa position initiale avant le passage suivant de l'outil. Le chariot avançant de la valeur de l'épaisseur par tour, la pression exercée sera plus forte entraînant un nouveau déplacement du plan de coupe. Dans le meilleur des cas, l'épaisseur du placage produit augmente mais reste inférieure à la cote nominale. Ce processus se poursuit sur quelques tours jusqu'à atteindre l'équilibre. Il se caractérise en général par une sur-épaisseur constante mais aussi des efforts plus importants en dépouille et sur la barre de pression. Les conditions d'usinage réelles peuvent donc être très différentes de celles initialement prévues. Cela complique l'interprétation et la comparaison des essais de déroulage.

Une action correcte de la barre est beaucoup plus aléatoire si le bois déroulé est fortement hétérogène. La plupart des barres sont données à taux de compression constant mais le comportement viscoélastique du bois final et du bois initial sont très différents. [MOVASSAGHI_1985] a analysé le rôle effectif de la barre de pression sur la fissuration pour des bois très hétérogènes : le Douglas et le châtaignier. Il distingue 3 types de copeaux selon leurs positions dans le cerne annuel :

➤ *les placages très hétérogènes.* Ils contiennent au moins une limite de cerne et présentent du bois initial sur la partie supérieure et du bois final dans leur partie inférieure. Ils

sont dits très hétérogènes puisqu'ils contiennent une rupture brutale entre le bois d'été de l'année n et le bois de printemps de l'année n+1. Ce type de placage est presque toujours fissuré (96% des placages présentaient des fissures dans l'étude précédemment citée). Le bois initial tendre sur la face supérieure du placage absorbe toute l'énergie communiquée par la barre lorsqu'il n'est pas « usiné » (arrachements typiques des essences peu denses). Dans un même temps, le bois final, ne jouissant pas du champ de contraintes en compression nécessaire, fissure. Cette configuration annihile l'intervention de la barre de pression. Les fissures sont régulières et souvent stoppées par la limite de cernes. Ainsi, plus elle se trouvera proche de la face supérieure et plus les fissures seront espacées et profondes.

➤ *les placages semi-hétérogènes*. Par opposition aux précédents, ils présentent une zone de transition du bois d'été (face supérieure) au bois de printemps (face inférieure). Ils sont nettement moins fissurés (26.6%). La barre joue efficacement son rôle en comprimant le bois final qui répercute un champ de contrainte suffisant pour limiter la fissure dans le bois de printemps (moins dense et moins apte à fissurer). Par contre, le mécanisme de fissuration semble plus sensible au plan ligneux : « Généralement, les fissures débutent dans la partie de bois de printemps en cheminant entre les gros vaisseaux, avec un angle important par rapport au plan de coupe. Ensuite, elles suivent le cheminement de petits vaisseaux dans la zone de bois d'été. Ce qui provoque une irrégularité de la fissuration dans ce type de placage. »

➤ *les placages homogènes* (constitués soit de bois initial, soit de bois final). L'auteur aboutit à des observations quelque peu contradictoires : la fissuration est importante et régulière dans le bois d'été et relativement limitée et aléatoire dans le bois de printemps pour le Douglas tandis que le châtaignier reste peu fissuré. L'hétérogénéité globale des arbres considérés est très probablement la source des différences observées selon l'auteur. En effet, le compromis faible fissuration dans le bois final /faibles arrachements dans le bois initial est d'autant plus délicat à obtenir que l'essence considérée est hétérogène. Le rapport entre les densités minimales et maximales mesurées dépasse facilement 2 pour le Douglas alors qu'il n'excède pas 1.4 pour les châtaigniers sélectionnés. Un échantillonnage plus large aurait conduit l'auteur à de plus grandes disparités.

Un premier pas vers la maîtrise du taux de compression serait de pouvoir imposer un effort donné et non un déplacement. Plusieurs études ont été menées dans ce sens ([FEIHL et CARROL_1969], [KOBAYASHI et al_1995]) et certaines dérouleuses disposent aujourd'hui de barres rondes « flottantes » (montées sur des vérins assurant un effort constant) mais il subsiste de solides difficultés. Le billon peut être schématiquement représenté par un empilement de cônes. Un bois, même parfaitement conformé, ne peut donc pas présenter sur une même génératrice uniquement du bois d'été ou de printemps.

L'analyse des vibrations et des variations d'épaisseur générées pendant la coupe de bois homogènes en présence d'une barre de pression constitue un premier niveau d'analyse très riche. On peut d'ores et déjà remarquer que l'emploi d'essences fortement hétérogènes complique singulièrement l'interprétation des résultats.

2.3 L'effet Horner

[MOTHE_1988] décrit de manière approfondie ce phénomène (cf. Figure 20). La coupe de bois de faible densité est comparable à la coupe d'une mousse. Dans un premier temps, le bois est très fortement comprimé devant l'arête sans être coupé, puis, il rompt brutalement en libérant les contraintes accumulées. Cette phase de compression s'accompagne d'une double fissuration en arrière de l'arête de part et d'autre du plan de coupe. Les conséquences pour la qualité du placage sont assez limitées en général. Pourtant, dans des conditions défavorables comme à proximité d'une limite de cerne, on peut observer une double fissuration importante avec une détérioration marquée des deux faces du placage, accentuée encore au tour suivant lors du passage de la barre de pression. L'effet Horner, assimilable à un régime de refus de coupe, conduit toujours à la fabrication de surfaces pelucheuses impropres au collage et à la finition.

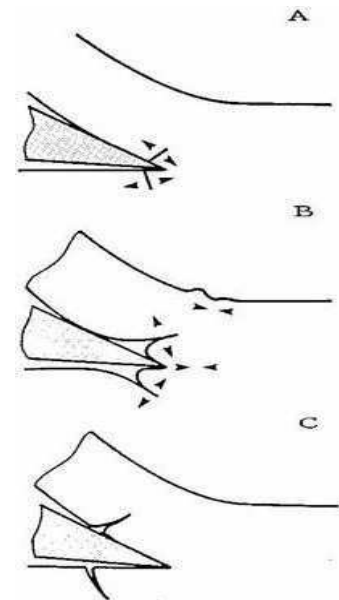


Figure 20 : Effet Horner d'après [MOTHE_1988]

[MOTHE_1988], en accord avec les observations de nombreux auteurs, remarque qu'une augmentation de la vitesse de coupe permet de limiter voir d'enrayer ce phénomène : « *Le surcroît de rigidité apporté par l'eau interne qui n'a pas le temps de s'évacuer et la diminution du coefficient de frottement contribuent à abaisser le seuil de densité en deçà duquel apparaît l'effet Horner* ». Par contre, l'usure de l'outil favorise la compression des cellules, et l'effet Horner, en augmentant le rayon de l'arête de coupe.

3 Défauts des placages déroulés

Les défauts des placages, ou plus précisément leurs signatures acoustiques et vibratoires, constituent la cible première de nos investigations. On peut en distinguer deux grandes familles : les défauts d'aspects et les défauts dimensionnels.

Les défauts d'aspects concernent l'apparence générale du placage : sa couleur, l'homogénéité de celle-ci, la présence de nœuds adhérents ou non, ... Ils sont directement liés à la nature du bois déroulé ou au traitement hygrothermique subi par la grume (cf. II.4.3.1.3). Ils proviennent d'une phase amont de la présente étude et seront considérés comme des données du problème.

Les défauts dimensionnels apparaissent lors de la production du placage. Le dérouleur peut donc agir en modifiant les paramètres de sa machine afin de limiter leur formation. Il n'existe pas de norme permettant de graduer explicitement la qualité d'un placage à partir de paramètres et de leurs limites.

Une approche classique du contrôle de qualité d'une pièce mécanique consiste à progresser par étapes successives des défauts les plus importants vers les plus infimes. La norme NF E 05-015 propose une hiérarchisation descendante des défauts de l'ordre 1 à l'ordre 6 :

- Ordre 1 : Les défauts de forme et de position.
- Ordre 2 : Les ondulations (période des ondulations entre 0.5 et 2.5 mm recommandées par CNOMO, Comité de Normalisation des Outillages et Machines-Outils).
- Ordre 3 : Les stries et sillons (périodiques ou pseudopériodiques dont la période recommandée par le CNMO est inférieure à 0.5 mm)
- Ordre 4 : Les arrachements d'outils (apériodiques)
- Ordre 5 et 6 : Les défauts de structure cristalline et du réseau cristallin

La plupart des auteurs se limitent aux quatre premiers ordres dont la somme des écarts constitue le profil total de la surface mesurée. Le parallèle direct avec la mesure de surface de bois est séduisant mais très délicat à effectuer. Le bois sec se prête déjà assez mal à cette nomenclature en particulier de part son hétérogénéité structurelle. Des spécificités biologiques, tels que de gros vaisseaux présents dans le chêne, peuvent s'avérer plus importantes que tous les défauts d'état de surface rencontrés. Un placage vert obtenu par déroulage se révèle encore moins bien adapté avant tout parce qu'il s'agit d'un copeau. Il cumule aussi spécificités du bois et difficulté à définir des limites entre les différents ordres. Certaines variations d'épaisseur peuvent en effet apparaître aussi bien comme des défauts de forme que d'ondulation d'après NF E 05-015.

Aucun standard n'étant défini, [FEIHL_1986] propose deux séries de valeurs (Tableau 2) définissant les limites acceptables des variations d'épaisseur, de la fissuration et de l'état de surface pour les résineux et les feuillus.

Les variations d'épaisseur semblent faibles pour les feuillus en petite épaisseur par rapport au mécanisme de formation d'une surface déroulée décrit par THIBAUT mais dans l'ensemble, les ordres de grandeur sont satisfaisants. Comme FEIHL, on préférera alors s'attacher à la nature et à l'origine des défauts plutôt qu'à leurs dimensions. En première approche on distinguera : le tuilage, les variations d'épaisseur, la fissuration cyclique, l'effet Horner et enfin l'état de surface du placage.

	Epaisseur du placage (mm)	Variations d'épaisseur (mm)	Profondeur moyenne des fissures ¹ (%)	Rugosité moyenne ² (µm)
Feuillus	0.6	± 0.02	30	50
	1.3	± 0.05	40	50
	2.5	± 0.10	45	130
	5.1	± 0.13	60	250
Résineux	1.3	± 0.08	40	100
	2.5	± 0.13	60	250
	5.1	± 0.15	60	300

¹ Moyenne calculée sur 10 mesures sur les deux côtés du placage

² Moyenne des pires valeurs de rugosité mesurées dans 10 cercles de 5 cm de diamètres alignés sur une diagonale de la feuille de placage.

Tableau 2 : Tolérances proposées pour les variations d'épaisseur, la profondeur moyenne des fissures et la rugosité des deux faces pour des placages déroulés de feuillus et de résineux d'après [FEIHL_1986]
 Note : La feuille de placage doit représenter plus d'un tour de billon dans le sens perpendiculaire aux fibres.

3.1 Courbure résiduelle du placage

Pour des grands rayons de déroulage, le placage présente une courbure parfois prononcée, de signe opposée à sa courbure initiale, qui s'inverse en fin d'opération (petits rayons). Au niveau de la zone de coupe et en l'absence de la barre de pression, les fortes contraintes en compression appliquées au passage du sommet du plan de cisaillement provoquent un raccourcissement de la face supérieure du placage. Bien qu'une grande partie de ces déformations soient récupérées au bout de quelques temps, il subsiste un léger décalage entre les deux faces qui se traduit par une courbure résiduelle du copeau en sens inverse. L'utilisation de la barre de pression ne change pas fondamentalement ces observations⁵.

Il ne semble pas possible de limiter ce tuilage en agissant sur les réglages de la machine excepté en diminuant l'épaisseur de coupe mais cela revient à modifier la nature du produit fini. Ce type de défaut sort alors du cadre de notre étude et ne sera pas analysé en détail.

3.2 Les variations d'épaisseur

Critères d'aspects mis à part, les variations d'épaisseur restent le premier facteur de rebuts dans la production industrielle de placages déroulés. Cependant, comme nous l'avons déjà précisé, aucune norme ne définit explicitement de limites acceptables certainement de par la grande variabilité des essences, des applications ou des exigences des clients. Afin de faciliter la compréhension des mécanismes mis en jeu, on peut discriminer les variations d'épaisseur dans le sens du fil du bois et dans le sens perpendiculaire.

⁵ Pour des produits spécifiques tels que le contreplaqué et le LVL, l'utilisation d'une barre de pression munie d'inciseurs limite le tuilage [DAI et al_2003], [DAI_2004]. Ces inciseurs permettent d'étirer et d'entailler le placage sur la face supérieure limitant de fait les contraintes de compression responsables du tuilage.

3.2.1 Dans le sens du fil du bois

La plupart du temps, ces variations sont attribuables à de mauvais réglages mais pas directement des paramètres de coupe. Elles touchent le placage sur une part conséquente de sa longueur. Il est possible d'agir assez efficacement pour les limiter. [FONDRONNIER et GUILLERM_1979], dressant la liste des défauts rencontrés en déroulage, distinguent :

➤ Les placages plus fins dans la partie médiane que sur les bords : le billon devenant moins rigide en fin de déroulage fléchit sous les efforts de coupe. L'utilisation d'un système anti-flambage permet de remédier à ce problème.

➤ Les placages plus épais dans la partie médiane (et généralement ondulés sur les bords) : Si la pression exercée par la barre anti-fléchissement est trop importante, le diamètre du centre de la bille diminue plus rapidement qu'aux extrémités. Il suffit alors de limiter cette pression.

➤ Les placages présentant un bourrelet : le placage déroulé dans la zone correspondante est plus fin lorsqu'un paquet de fibre reste coincé entre le couteau et la barre de pression par exemple. Il subsiste alors une sur-épaisseur sur la bille qui s'accroît à chaque tour nécessitant à terme un arrêt du déroulage. Les opérateurs se contentent alors de dégager les fibres coincées à l'aide d'air comprimé avant de reprendre le déroulage sans barre tout d'abord afin d'évacuer la sur-épaisseur.

➤ Les placages rainurés : si l'outil ou plus rarement la barre présentent des ébréchures, des stries plus ou moins profondes apparaissent sur le placage. Rectifier l'arête incriminée permet de remédier au problème.

3.2.2 Dans le sens tangentiel perpendiculaire au fil

Pendant le déroulage, les deux faces d'une même feuille sont formées lors de deux tours successifs ce qui induit une périodicité sur deux tours. Autrement dit, une perturbation du processus aura des conséquences en deux points du ruban déroulé, et probablement sur deux feuilles de placage différentes après massicotage, tout en ayant des répercussions indirectes sur les feuilles suivantes (conséquences du mécanisme décrit Figure 19). Les périodes de ces variations peuvent s'étaler de quelques millimètres à plusieurs mètres pour une même bille suivant les mécanismes mis en jeu, ce qui ne simplifie pas leur caractérisation. [FONDRONNIER et GUILLERM_1979] distinguent deux types de variations d'épaisseur dans un même tour. Nous généraliserons cette dénomination aux variations d'épaisseur sur plusieurs tours :

➤ Les variations « rapides » (période $T < 1$ cm). Elles sont caractérisées par un placage rugueux particulièrement néfaste pour les applications finales (ponçage coûteux et consommation de colle excessive). Si l'outil est bien affûté, elles interviennent lorsqu'un bois dense nécessitant un traitement hygrothermique préalable ou présentant un contre-fil important est déroulé froid. Les opérateurs utilisent le terme de « broutage » de l'outil.

D'après [FONDRONNIER et GUILLERM_1979], elles se distinguent par : « une alternance de lunules en creux et de crêtes en saillie qui les bordent [...] orientées selon leur longueur, sensiblement dans la direction du fil du bois. Les lunules sont peu profondes ; elles sont dues à de légers arrachements des fibres. » (cf. Figure 21).

La fréquence de ces variations est de l'ordre de grandeur de celles de la fissuration cyclique du placage. En général, elles sont moins marquées sur la face supérieure du placage grâce à l'écrêtage opéré au passage de la barre de pression. Chauffer la grume ou réhumidifier le bois limite leur formation.



Figure 21 : Placage rugueux microdéroulé de hêtre

➤ Les variations « lentes » (période $T \geq 30$ cm). Le couteau « talonne », ou refuse la coupe, sur une portion avant de plonger dans la matière. Le copeau produit est plus mince, puis plus épais que la valeur désirée. Ce phénomène converge généralement mais peut s'accroître au fil des tours jusqu'à l'obtention d'un placage discontinu d'autant plus facilement que le bois sera dense, la profondeur de passe et l'angle de dépouille faibles et le rayon de déroulage grand. Il convient alors d'augmenter la valeur de l'angle de dépouille.

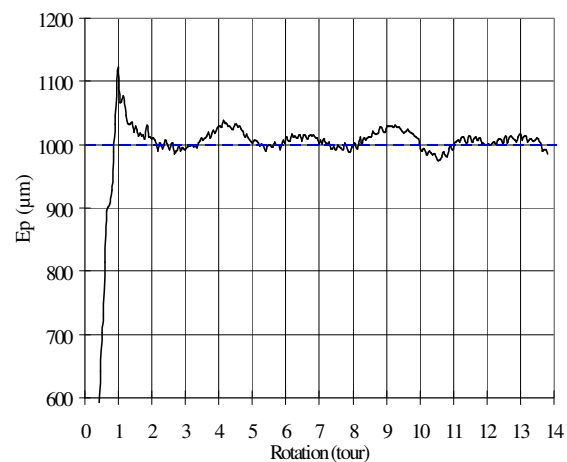


Figure 22 : Variation d'épaisseur d'après [DECES - PETIT_1996] (peuplier, $E_p=1\text{mm}$, $\delta=1^\circ$, $V_c=1\text{m/s}$)

La limite inférieure des variations d'épaisseur lentes proposée par [FONDRONNIER et GUILLERM_1979] provient certainement du fait qu'à l'époque, les machines ne permettaient pas le déroulage des noyaux en deçà de 10 cm de diamètre. Nous garderons donc à l'esprit que ce type de variations d'épaisseur est lié à la période de rotation du billon.

[DECES-PETIT_1996], en modélisant les surfaces de contact bois-outil sur ses deux faces, a montré que la flèche du couteau n'intervenant qu'à un faible niveau (1 à 2 % de l'épaisseur) dans la variation de l'épaisseur du placage (aisément de l'ordre de 20 % de l'épaisseur). Cela confirme la nécessité de mieux connaître la rhéologie du bois pour décrire le déroulage.

Quelle que soit l'origine des variations d'épaisseur, elles auront toujours des conséquences plus au moins visibles lors des tours suivants. Une sur-épaisseur au tour n entraînera une plongée de l'outil au tour $n+1$. Cette plongée laissera une sous-épaisseur sur le billon qui provoquera un refus de coupe au tour $n+2$ laissant à nouveau une sur-épaisseur. Bien entendu, la barre de pression, en déplaçant le plan de coupe de manière plus ou moins proportionnelle à la sur-épaisseur, rajoute une composante supplémentaire (perturbatrice ou régulatrice).

En résumé, l'instabilité de la coupe apparaîtra d'autant plus aisément que le bois sera globalement hétérogène en terme de densité (particulièrement au niveau des limites de cernes), d'orientation du fil ou de nodosité comme l'ont observé [MOVASSAGHI_1985] et [MOTHE_1988]. Ce genre de comportement, inhérent aux machines tournantes, est souvent suivi et contrôlé par des mesures vibratoires.

Pour le fabricant, les irrégularités de l'épaisseur constituent la première cause de « non qualité » de la production. Elles sont coûteuses (nécessité d'une post-opération de ponçage, consommation excessive de colle) et déclassent les produits (discontinuité du joint de colle, dédensification locales, états de surfaces médiocres,...).

Remarque : Un angle de dépouille trop important peut générer des ondulations régulières du placage dont la période oscille entre 5 et 10 mm. Ces ondulations, en général parallèles au fil du bois, ne s'accompagnent pas de variations d'épaisseur et constituent plutôt un défaut de planéité. Leur formation occasionne des vibrations importantes et un son caractéristique.

3.3 La fissuration

Son mécanisme de formation a déjà été détaillé dans II.2.1.2. On peut ajouter toutefois que dans la pratique, elle peut se révéler néfaste aussi bien pour la manutention des placages devenus très fragiles qu'en terme de quantité de colle utilisée pour réaliser des panneaux. Dans un même temps, une légère fissuration est parfois utile notamment en assouplissant le placage rendant sa manutention plus aisée (risque de rupture brutale du placage moindre). Si aucun critère de référence n'existe pour discriminer ces deux états, [FEIHL_1986] propose des valeurs de pourcentages limites de l'épaisseur fissurée (cf. Tableau 2).

La barre de pression permet de limiter la formation des fissures et leur croissance mais engendre des variations de l'épaisseur déroulée et peut même dégrader l'état de surface du placage.

3.4 L'état de surface

La plupart du temps, la surface du placage est générée par délamination intercellulaire. Elle oscille entre deux plans grossièrement distants d'une centaine de microns. Cette description bien sommaire ne tient pas compte des spécificités structurelles du matériau telles que les variations de fil, la présence de limites de cernes de rayons ligneux ou encore de vaisseaux, dont l'influence sur l'état de surface est avérée.

En choisissant de dissocier variations d'épaisseur et état de surface, on se limite au suivi des arrachements locaux identifiables sur le placage par des pics, des creux ou des paquets de cellules plus ou moins libres (peluche). Une analyse plus précise conduirait à caractériser l'état de surface des cellules elles-mêmes ce qui ne correspond ni aux possibilités ni aux objectifs fixés.

[MOVASSAGHI_1985] identifie plusieurs paramètres en relation directe avec la qualité de l'état de surface de placages de Douglas et de châtaignier :

➤ La densité moyenne mais surtout la densité minimum élevée d'un placage vont favoriser une faible rugosité (particulièrement pour le Douglas). Une densité du bois de printemps relativement importante limite les arrachements et donc la rugosité. Par contre, cela peut aussi favoriser la fissuration qui s'accompagne de rugosité élevée.

➤ L'hétérogénéité générale du placage au sens de MOVASSAGHI : s'il contient une limite de cerne (passage de bois d'été au bois de printemps très brutal) la rugosité augmente considérablement pour les deux essences. Par contre, dans un placage contenant le passage du bois initial au bois final, la limite étant beaucoup plus progressive, l'état de surface des deux faces est en général meilleur. Enfin, pour des placages parfaitement homogènes, la rugosité est plus importante dans le bois initial que dans le bois final pour les raisons évoquées précédemment.

➤ La taille des accroissement annuels : dans le Douglas, plus les largeurs des cernes sont grandes et meilleur est l'état de surface. Cette caractéristique limite la probabilité d'avoir une ou plusieurs limites de cernes au sein d'une petite longueur de placage.

➤ L'orientation du plan de coupe (cf. II.2.1.2.3) : « *La rugosité des deux faces du placage augmente rapidement avec la valeur absolue de θ de part et d'autre du zéro, de manière apparemment symétrique* » pour le Douglas. Ces trois derniers points concordent bien. Pour des bois hétérogènes tels que le Douglas, la présence de limite de cerne est un facteur très défavorable. Lorsque θ diminue en valeur algébrique, la rugosité, le risque de fissuration et les variations d'efforts augmentent comme nous le verrons par la suite. [TAKANO et FUJIMOTO_1999] présentent même des profils de placages de sugi très dégradés avec un faciès en « dents de scies » lorsque θ devient fortement négatif (semblables aux variations d'épaisseur des placages qualifiés de rugueux).

➤ La vitesse de coupe : « *la rugosité des deux faces mesurée par n'importe quel paramètre est toujours meilleure pour des placages déroulés à grande vitesse* ». Cette affirmation doit être replacée dans son contexte c'est-à-dire : bois hétérogène et vitesse relativement faible ($V_{max}=0.5m/s$). D'une manière plus générale, une vitesse de coupe élevée favorise l'obtention de placages de qualité pour des essences peu denses en limitant l'effet Horner. Dans l'industrie de l'emballage léger, forte consommatrice de peuplier, les vitesses de coupe atteignent 5m/s ce qui permet de limiter la peluche. Par contre, les dérouleurs spécialisés dans la fabrication de placages de hêtre (principalement destinés au mobilier scolaire) ont tendance à ne pas dépasser 1.25m/s, en particulier lorsque la coupe devient difficile.

Les critères de rugosité spécifiques (R_{max} , R_{min} , écart type, nombre de pics $>10\mu m$ le tout par cm de placage) utilisés par MOVASSAGHI sont mieux adaptés aux spécificités du bois en particulier à l'état vert que les traditionnels R_a , R_z et R_t .

La plupart des dégradations de l'état de surface sont donc liées à la densité et à son hétérogénéité. Ces résultats sont exploitables pour des essences homogènes mais les phénomènes seront moins marqués. On pourrait aussi ajouter une certaine sensibilité à une préparation hygrothermique du billon avant déroulage. D'une manière générale, puisqu'elle favorise la déformation et la décohésion des cellules, son emploi est proscrit pour les essences peu denses (peuplier par exemple).

Remarque : Si la valeur de l'angle de dépouille conditionne en grande partie les phénomènes de variation d'épaisseur, elle peut aussi avoir des conséquences directes sur l'état de surface du placage. Le « piquage » se traduit par des variations d'épaisseur rapides accompagnées d'arrachements très néfastes à la qualité de l'état de surface [MOTHE_1988].

4 Approche dynamométrique en vue d'une commande adaptative

4.1 Décomposition de l'effort de coupe

Les premiers travaux consacrés à l'étude des efforts de coupe en déroulage ne tenaient pas compte des phénomènes intervenant sur la face de dépouille, considérant la face d'attaque comme le siège principal des efforts. Cette hypothèse, découlant des modèles de coupe des métaux (modèle de Merchant pour n'en citer qu'un) a permis d'expliquer un certain nombre de phénomènes. [KINOSHITA_1983] révèle une bonne correspondance entre les efforts de coupe et la densité locale du bois ainsi que la fissuration du placage. Par contre, elle ne permettait pas d'expliquer les variations d'épaisseur du placage ou le refus de coupe en très faible épaisseur par exemple.

La décomposition de l'effort de coupe en deux composantes F_a et F_d correspondant respectivement aux faces d'attaque et de dépouille de l'outil proposée par THIBAUT dans [THIBAUT_1988] a permis d'effectuer un grand pas vers la maîtrise du déroulage. Cette décomposition nécessite deux hypothèses :

- L'effort exercé au sommet de l'arête de l'outil est négligeable. Un affûtage soigné en laboratoire peut permettre de valider cette hypothèse.
- Le frottement bois humide – métal sur les deux faces de l'outil obéit à une loi de Coulomb. Il est alors possible d'estimer l'angle de frottement par la relation :

$$\phi = \arctan\left(\frac{T}{N}\right) \quad (\text{N et T composantes normales et tangentielles sur la surface})$$

Équation 2 : Angle de frottement bois/métal Φ

Les deux faces de l'outil étant préparées de la même manière et le bois s'écoulant de part et d'autre du couteau ayant la même structure, on peut considérer une seule et même valeur de Φ pour les deux faces.

En fait, d'après [BEAUCHÊNE_1996] et [THIBAUT_1988], le coefficient de frottement ne dépend pas de l'état de surface de l'outil, ni de celui du bois mais se révèle sensible à la nature du bois (résine, extractibles ou autres éléments lubrifiants en particulier d'après [MACKENZIE et KARPOVICH_1968]) ainsi qu'à la vitesse d'usinage : « *Tout se passe comme si le coefficient de frottement dépendait essentiellement du « lubrifiant » imprégnant le bois (eau, résine,...) et de la vitesse d'usinage, les autres paramètres étant secondaires.* ». On peut alors faire l'hypothèse d'un coefficient de frottement constant pour une essence et une vitesse données. Il devient possible de déterminer les deux composantes F_a et F_d :

$$F_a = \frac{\cos(\Phi - \delta)}{\sin(\beta + 2\Phi)} F_{Xc} + \frac{\sin(\Phi - \delta)}{\sin(\beta + 2\Phi)} F_{Yc}$$

$$F_d = \frac{\cos(\delta + \beta + \Phi)}{\sin(\beta + 2\Phi)} F_{Xc} - \frac{\sin(\delta + \beta + \Phi)}{\sin(\beta + 2\Phi)} F_{Yc}$$

Équation 3 : Décomposition des efforts de coupe suivant les faces d'attaque et de dépouille du couteau

δ : angle de dépouille du couteau

β : angle de bec du couteau

Une approche similaire des efforts exercés par la barre de pression permettrait de distinguer F_{Be} et F_{Bs} . Toutefois, THIBAUT a montré que ces composantes, comme F_{Xb} et F_{Yb} restaient proportionnelles puisque la direction de la résultante F_b est sensiblement la même. Nous nous abstenons d'utiliser cette décomposition d'intérêt plus limité.

Un point faible de cette approche provient de l'indétermination sur la mesure de Φ qui peut atteindre 2 à 4° même en soignant la mesure d'après [THIBAUT_1988]. Elle se traduit par une erreur d'estimation sur les efforts, qui reste inférieure à 10% pour des efforts élevés ou

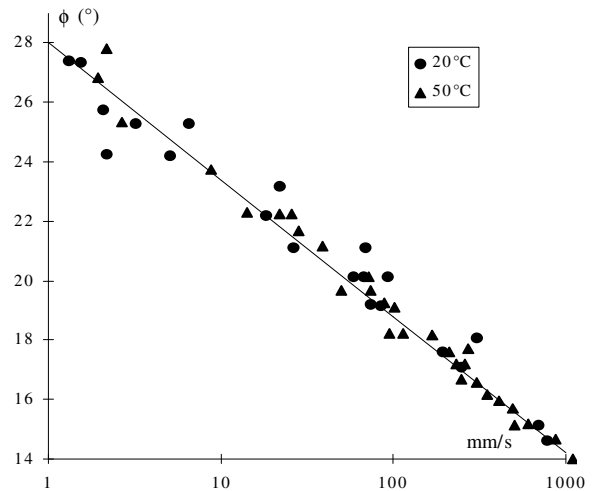


Figure 23 : Variation de l'angle de frottement en fonction de la vitesse de coupe (châtaignier) d'après [BEAUCHÊNE_1996]

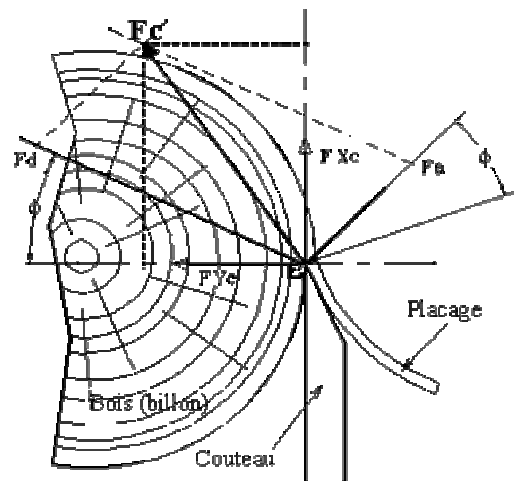


Figure 24 : Décomposition de l'effort total sur les deux faces de l'outil en F_a et F_d d'après [THIBAUT_1988]

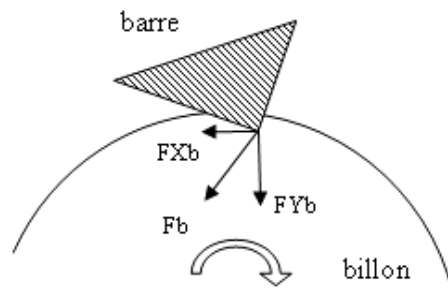


Figure 25 : Efforts sur la barre de pression

proches en module sur les deux faces, mais peut devenir sévère dans les cas contraires (jusqu'à 60% pour des efforts F_a ou F_d faibles). Toutefois, même dans une configuration défavorable, l'interprétation des phénomènes principaux reste pertinente puisque l'incertitude concerne toujours la composante la plus faible. C'est précisément cette capacité à fournir des résultats interprétables physiquement qui confère à la méthode son grand intérêt.

4.2 Modèle simplifié des efforts de coupe

Le modèle mécanique simplifié du déroulage le plus aboutit reste à ce jour essentiellement décrit dans [THIBAUT_1988]. L'auteur propose une formulation simple et adaptée des efforts sur les deux faces.

4.2.1 F_d

THIBAUT modélise l'effort F_d comme la somme de deux contributions. La première correspond à un effort très localisé en pointe d'outil (longueur de contact estimée entre 0.1 et 0.3 mm). Les cellules très fortement écrasées roulent sous l'outil. Cet effort, traduisant le flambement des cellules, dépend de la densité du bois mais diminue peu lorsque l'angle de dépouille positif augmente. La seconde est « *approximativement régie par les lois de contact élastique plan-cylindre (plan indéformable)* ». Cet effort est quasiment proportionnel au volume de bois écrasé et dépend essentiellement de l'élasticité du billon.

4.2.2 F_a

Le modèle original présenté dans [THIBAUT_1988], tient compte du mécanisme de formation du copeau tel qu'il a été précédemment décrit. Il fait donc intervenir : le module d'élasticité E_R (déformation élastique du billon sous l'action de l'outil et de la barre), le seuil plastique en compression transversale σ_f , τ la contrainte de cisaillement de roulement RT et K_{IC} la résistance à la rupture RT en mode I. Pourtant, il ne permet pas d'obtenir l'effort nécessaire à la création d'une surface lorsque l'épaisseur tend vers zéro.

[THIBAUT et BEAUCHÊNE_2001] proposent une approche énergétique qui permet de combler ce manque. L'idée consiste à évaluer, pour une unité de longueur du placage, l'énergie de coupe avec l'addition des énergies de frottement au niveau des faces, de fissurations (micro et ou macro suivant le cas), et de déformation dans le plan principal de cisaillement. Cependant, cette seconde formulation surestime la valeur de l'énergie de création de surface d'après l'auteur dans [THIBAUT_2004]. Cette intuition est étayée par des résultats expérimentaux obtenus pour des bois denses en très faible épaisseur pour lesquelles les efforts de coupe sont plus faibles que l'énergie minimale de création de surface !

La combinaison des deux approches (communication personnelle), intégrant à la fois une force minimale correspondant à l'énergie de création d'une surface et une force représentant

l'intégrale des contraintes selon le plan de cisaillement, nous livre le modèle le plus adapté à ce jour :

$$Fa = A + B \left(p + \left(KC \left(1 - e^{-\frac{p}{C}} \right) \right) \right)$$

K : paramètre sans dimension traduisant l'augmentation de la contrainte au voisinage de l'arête de coupe

Équation 4 : Modèle simplifié de l'effort de coupe sur la face d'attaque où :

p: épaisseur nominale du copeau

C : paramètre en mètre traduisant la rapidité de décroissance de contrainte au voisinage de l'arête de coupe

A : Energie de fracture créant une nouvelle surface

B : Energie spécifique de déformation

Malgré des hypothèses réductrices et des simplifications quelque peu brutales (en particulier la simplification par la vitesse dans le bilan des puissances), cette approche présente une réelle validité puisqu'elle permet d'expliquer « physiquement » les contributions des divers paramètres du déroulage (vitesse de coupe, densité, température,...) sur le mécanisme de formation du copeau comme nous allons le voir par la suite. Nous disposons donc d'une base solide pour nous guider dans l'interprétation des mesures vibratoires et acoustiques.

4.3 Interprétation des efforts

Tous les auteurs ayant décomposé les efforts de coupe suivant les deux faces de l'outil s'accordent sur la nécessité d'équilibrer et de stabiliser ces composantes pour fabriquer un placage de qualité. [THIBAUT_1988] conclut une analyse dynamométrique détaillée du process sans barre de pression en écrivant : « *Le risque de voir apparaître des sous-épaisseurs ou des sur-épaisseurs importantes après la coupe dépend avant tout du déséquilibre entre les deux efforts Fa et Fd. Une tendance au refus de coupe (Fd > Fa) est bien plus dangereuse qu'une tendance à l'engagement de l'outil car elle conduit à des augmentations sensibles de la sur-épaisseur avant de parvenir à l'équilibre. Les changements de « régime » (passage d'une tendance à « engager » à une tendance à « refuser ») sont toujours à éviter soigneusement* ».

Ces conseils sont appuyés par les observations Figure 26 de [MOTHE_1988] lors du déroulage d'un disque de Douglas : « *Dès que l'effort de dépouille devient supérieur à l'effort d'attaque, un copeau très mince est coupé. Le suivant est d'épaisseur plus forte que la moyenne puis un nouvel équilibre s'instaure jusqu'à la limite de cerne suivante.* ». Maintenir un effort Fd à une valeur suffisamment proche de Fa permet non seulement de limiter les risques de retournement de l'arête fragile de l'outil mais aussi de produire un placage continu de qualité (faible fissuration, peu de variation d'épaisseur).

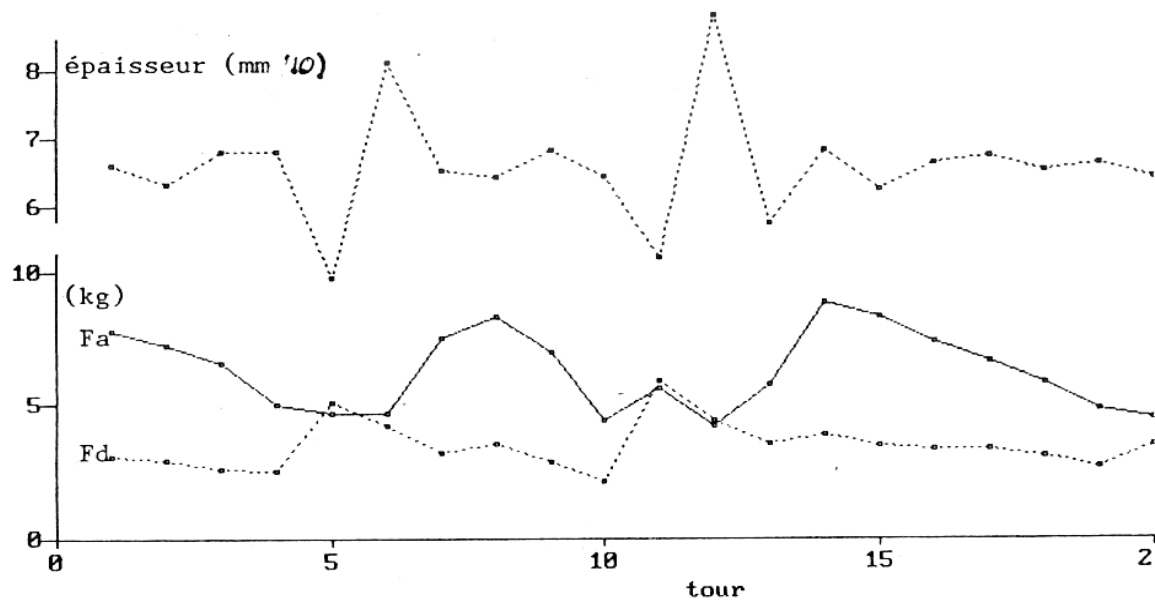


Figure 26 : Efforts de coupe et épaisseur des premiers placages suivant la mise au rond
(disque de Douglas, $Ep=0.6\text{mm}$, $\delta=2^\circ$, $Vc=5\text{ mm/s}$)

L'utilisation de la barre de pression, bien qu'indispensable pour limiter la fissuration, peut compliquer singulièrement cette tâche. L'analyse de l'influence des différents paramètres du déroulage sur cet équilibre a permis de mieux comprendre leurs rôles respectifs et d'agir en conséquence.

4.3.1 Le bois

Il est bien évident que les caractéristiques d'un billon conditionnent en premier lieu la qualité finale du placage déroulé. Pour une essence donnée, il sera d'autant plus aisé d'obtenir un bon placage que le billon sera bien conformé, homogène et correctement étuvé.

4.3.1.1 La forme du billon

Une bonne rectitude du billon traduit en général une croissance de l'arbre peu contrariée par le milieu extérieur. La moelle de l'arbre est alors relativement bien centrée améliorant d'autant le rendement matière⁶. La présence de bois de tension est réduite. L'orientation du plan de coupe, particulièrement critique pour le risque de fissuration, les variations d'épaisseur, ou l'état de surface, est plus régulière. On se rapproche davantage du cas **b** de la Figure 17 où $\theta=0$. Il serait intéressant d'analyser l'influence de la direction du plan de coupe

⁶ La mise au rond du billon est une étape critique pour le rendement matière de l'opération. Les dérouleuses actuelles sont équipées de centreurs qui cubent les billons, souvent en utilisant une rampe de laser, de manière à optimiser leur positionnement entre les broches. Cette technique privilégie le rendement matière en utilisant l'axe du cylindre circonscrit au billon plutôt que celui de la moelle de l'arbre.

puisqu'il laisse penser que ce dernier joue un rôle majeur dans la genèse et l'entretien des phénomènes vibratoires.

4.3.1.2 Densité et homogénéité

Même les bois « homogènes » présentent des variations sensibles de leurs propriétés et en particulier leur densité. Le rapport entre les densités minimum et maximum peut atteindre aisément 1.5 pour les bois qualifiés d'homogènes et fréquemment 4 pour les résineux d'après [THIBAUT_1988]. La superposition des courbes d'efforts et des mesures de densité du placage à une échelle semblable à la Figure 27 permet de bien visualiser la grande similitude⁷ des transitions de densité et d'efforts de coupe sur la face d'attaque.

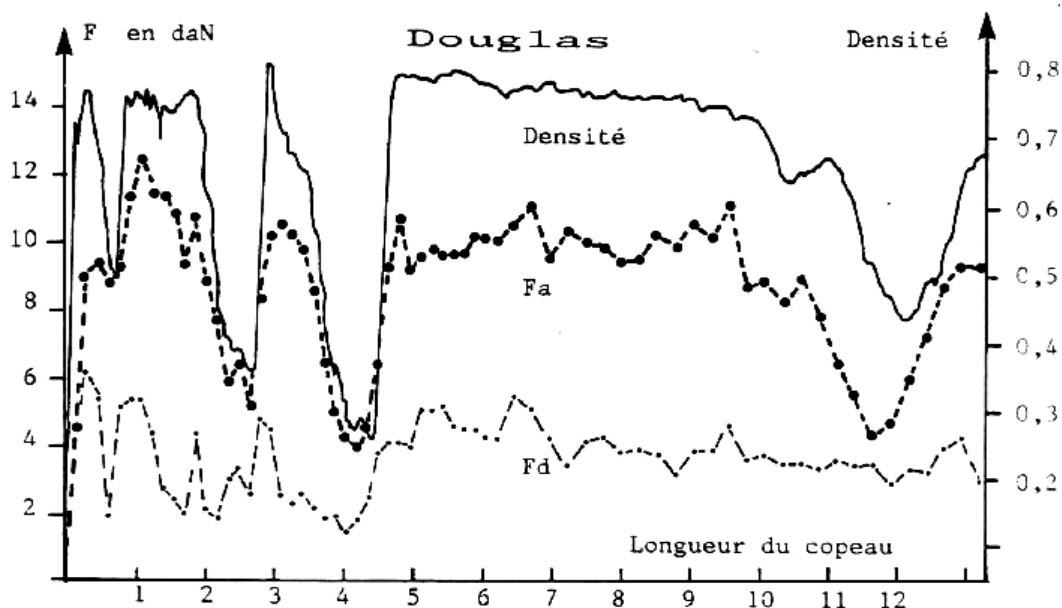


Figure 27 : Evolution des efforts et de la densité dans un bois très hétérogène d'après [THIBAUT_1988]

Le mécanisme de formation du copeau génère des contraintes (en compression et cisaillement notamment) qui sont à l'origine des efforts de coupe. Les différentes raideurs mécaniques étant fortement influencées par la densité, il est logique de retrouver cette tendance sur l'effort d'attaque. [MOVASSAGHI_1985] remarque néanmoins qu'à densité égale, les efforts sont nettement plus importants pour le châtaigner que pour le Douglas. Un profil densitométrique ne peut rendre compte à lui seul de la complexité de structure de certaines essences qui influence considérablement leurs caractéristiques mécaniques.

⁷L'auteur précise que les légers décalages visibles au passage des changements brutaux de densité proviennent certainement de la mesure. Le profil densitométrique est celui d'un placage sec dont les retraits locaux sont inégaux par rapport au placage vert déroulé. Il est aussi mesuré au milieu du profil tandis que les contraintes de cisaillement affectent tout le placage.

Fd traduit l'intensité de la compression sous l'outil résultant de la déformation élastique du billon et de l'écrasement des fibres qui viennent rouler sous l'outil. Il est logiquement plus sensible au bois qui se trouve à proximité de la face de dépouille c'est-à-dire au copeau du tour suivant. [MOTHE_1988] relève ainsi un coefficient de corrélation supérieur à 0.9 entre Fd et la densité du copeau suivant pour des placages de Douglas (41 ddl au minimum, $Ep=0.6$ mm, $\delta=-1^\circ$ et $Vc=5$ ou 50 mm/s). Pour les bois hétérogènes, la présence de zones tendres et de zones plus denses va favoriser le déséquilibre entre Fa et Fd. Ils sont déphasés par nature (Fa lié au copeau formé dans le tour n et Fd dans celui du tour n+1) et donc sensibles aux passages des limites de cernes (forte densité sur Fa et faible sur Fd ou inversement suivant l'angle θ par rapport au plan de coupe).

Pour des bois denses, l'équilibre des efforts entre les deux faces peut être très fragile surtout en coupe mince. Les essais menés par [MARCHAL_1989] sur des chênes méditerranéens (densité proche de 1) montrent une grande sensibilité du processus aux instabilités de coupe en faible épaisseur et pour une petite valeur de l'angle de dépouille. Ces conditions, favorisant de faibles efforts malgré des bois de densités élevées, peuvent entraîner une coupe intermittente et non convergente en particulier pour des vitesses de coupes élevées. L'outil refuse la coupe pendant un, voir deux tours, avant de plonger dans le billon en déroulant un copeau épais pour refuser à nouveau la coupe. D'après l'auteur, la structure du plan ligneux, avec notamment la présence de gros rayons ligneux assimilables à des raidisseurs locaux, contribue considérablement à cette instabilité. Une augmentation de la valeur de l'angle de dépouille ou un étuvage du billon permet de rétablir une coupe continue.

L'action de la barre de pression est avant tout conditionnée par sa nature. Une barre angulaire dont la géométrie et les réglages sont optimaux agit localement en amont de l'arête de coupe et génère un champ de contraintes favorables. L'effort Fa peut ainsi légèrement diminuer (cf. Figure 28). Une barre cylindrique comprime le copeau même après sa formation et provoque souvent une forte augmentation de Fa pour qu'elle puisse être efficace contre la fissuration. [THIBAUT_1988] montre que l'effort normal FYb exercé par la barre de pression, pour un rayon de courbure de son nez donné, est proportionnel à sa pénétration dans le bois (Δ e Figure 19). Ses résultats expérimentaux, complétés par ceux de [MOVASSAGHI_1985], [MOTHE_1988] et [MARCHAL_1989], tous réalisés avec une barre angulaire, dénotent une grande sensibilité de FYb aux sur-épaisseurs ainsi qu'à la densité des couches de bois comprimées en première approximation. Pour des bois relativement homogènes comme le peuplier ou le hêtre, FYb est bien corrélé avec la densité moyenne. Par contre, pour des essences notoirement hétérogènes telles que le Douglas ou le châtaigner (zone initiale poreuse), c'est la position de la limite de cerne dans le copeau qui régit l'évolution de FYb en déterminant l'épaisseur des couches comprimées. Plus le bois d'été est sollicité et plus l'effort sur la barre est intense.

Un taux de compression trop important peut alors avoir des conséquences désastreuses sur l'épaisseur du placage déroulé en particulier si le bois est hétérogène. Le mécanisme de formation du copeau en présence de la barre de pression décrit en II.2.2. tend alors beaucoup plus lentement vers l'équilibre puisque le plan de coupe ne cesse d'osciller au passage des cernes.

L'hétérogénéité du bois, pour de nombreuses raisons interdépendantes, joue un rôle clef sur l'apparition et l'entretien de transitoires. Elle se concrétise par une apparition simultanée de la plupart des phénomènes. En première approche, il semble plus raisonnable de les dissocier pour mieux les identifier d'un point de vue acoustique et vibratoire.

4.3.1.3 Le traitement hygrothermique du billon

La mise en œuvre du bois vert nécessite souvent une chauffe préalable modifiant sa rhéologie afin de lui conférer une grande déformabilité (cf. I.4.3). Dans le cas du déroulage mais surtout du tranchage, cette opération, appelée étuvage, permet d'agir sur la coloration du placage et en particulier sur son homogénéité.

La procédure utilisée est variable d'une entreprise à une autre puisque délicate à bien maîtriser. En effet, l'augmentation de la température d'étuvage, paramètre essentiel, va générer des effets antagonistes. Elle améliore la qualité du placage en terme de fissuration et de variation d'épaisseur en facilitant l'écoulement du copeau. [MARCHAL_1989], analysant les efforts de coupe pour 3 chênes méditerranéens étuvés à 45, 60 et 80 °C observe une diminution régulière des efforts de coupe en présence de la barre de pression : « *La nature de la diminution de FYb reflète la chute importante du module d'élasticité du bois E_R en compression quand la température augmente* ». Les puissances mises en jeu sont moindres. L'usure des outils est aussi doublement limitée puisque les nœuds, ou les zones de contrefil sources de retournement de l'arête, sont plastifiés. Parallèlement, une surchauffe nuit à une bonne productivité. Très énergivore, elle s'accompagne aussi d'arrachements sur le placage du type « effet Horner » pour des bois tendres ou d'une destruction par les broches d'entraînement du cœur du billon devenu trop ductile, sans parler de l'extension des fentes de recouvrance en bout du billon.

Les opérateurs sur dérouleuse sont en général capables de savoir si un étuvage a été effectué dans de mauvaises conditions. Dans le cas d'un « sous-étuvage », le son et les vibrations provenant de la machine leur indiquent que les efforts de coupe augmentent : la machine vibre et le moteur d'entraînement est davantage sollicité. Dans le cas contraire, c'est visuellement qu'ils acquièrent l'information puisque le placage présente des arrachements caractéristiques (placages pelucheux). Dans notre étude, on privilégiera un déroulage à température ambiante, plus à même de créer des situations identifiables par les opérateurs.

4.3.2 Les paramètres de coupe

[THIBAUT_1988] a montré, à partir d'un riche échantillonnage d'essences et de conditions de coupe, que le seul paramètre géométrique ayant une influence significative sur F_a en l'absence de barre de pression est la passe d'usinage ou plus précisément l'épaisseur du copeau réellement enlevé. En particulier, l'effort exercé par la face d'attaque sur le bois est donc indépendant du rayon de déroulage et de l'angle de dépouille (cf. Figure 30). Par contre, F_d ne dépend pas de la passe d'usinage même s'il augmente très fortement en régime de sur-épaisseur du billon.

4.3.2.1 Epaisseur nominale du copeau

Au delà des très faibles épaisseurs (3 dixièmes de mm), F_a augmente linéairement avec la passe d'usinage ce qui correspond bien aussi à la théorie des métaux (cf. Figure 28). L'ordonnée à l'origine est alors propre à chaque essence.

Elle correspond pour l'effort d'avance dans la coupe des métaux à l'énergie nécessaire pour créer une nouvelle surface d'après [ATKINS_2005], soit A dans le modèle proposé par THIBAUT (cf. Équation 4).

Comme nous l'avons déjà évoqué, une barre angulaire bien ajustée se traduit parfois par une baisse de F_a (cf. Figure 28). THIBAUT en propose une description, certes qualitative, mais qui explique bien la genèse d'un champ de contraintes favorable en amont de l'arête.

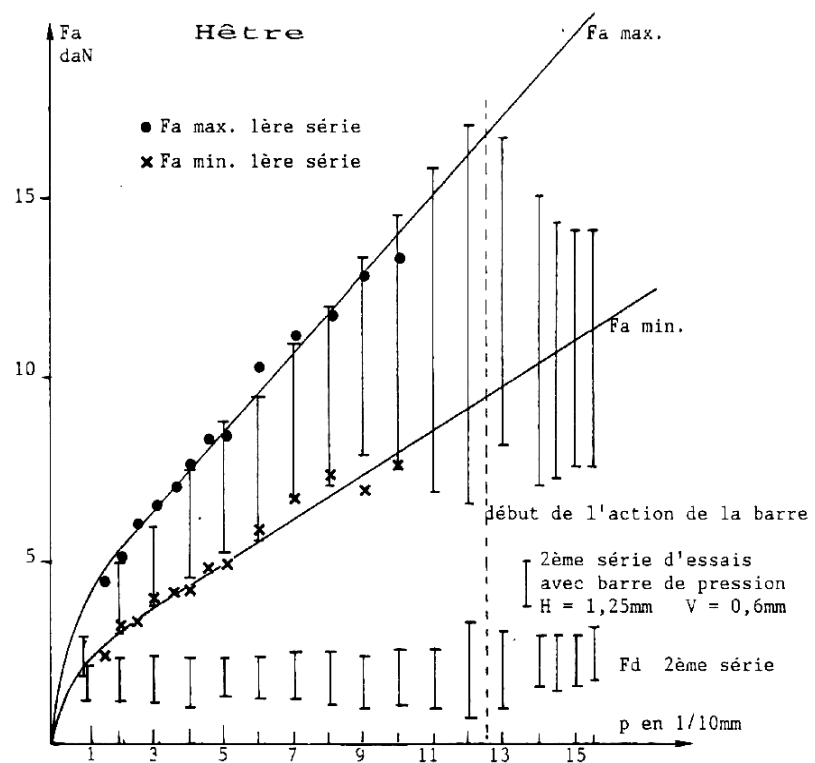


Figure 28 : Influence de la profondeur de passe sur les efforts de coupe pour le hêtre d'après [THIBAUT_1988]

[MOVASSAGHI_1985] souligne que la résistance au cisaillement dans le plan RT du matériau (fortement liée à sa densité et sa structure locale) est un paramètre déterminant pour la valeur de F_a . En effet, dès qu'on s'éloigne des très petites épaisseurs, le mécanisme principal de la formation du placage est le cisaillement dans un plan quasiment orthogonal à la direction de coupe (cf. II.2.1.1). Cet état de contrainte est la source majeure des variations de

Fa en fonction de la passe dans ce domaine (entre le copeau minimum déroulable et le copeau maximum sans fissuration).

Le modèle décrit Équation 4 tend rapidement vers une droite de pente B, qui correspond à l'énergie spécifique de déformation. Cette formulation est puissante puisqu'elle permet aussi de saisir les phénomènes limites du processus de formation du placage que sont l'effet Horner et la fissuration.

D'après [THIBAUT_2004], il existe une épaisseur minimum en deçà de laquelle il n'est pas possible de générer un copeau continu. Le bois se déforme et rompt brutalement, mécanisme décrit précédemment (« effet Horner »). De même, il existe une passe maximum au-delà de laquelle il n'est plus possible d'obtenir un placage exempt de fissures. L'effort de coupe s'effondre à l'ouverture de la fissure avant d'augmenter de nouveau jusqu'à la formation de la fissure suivante.

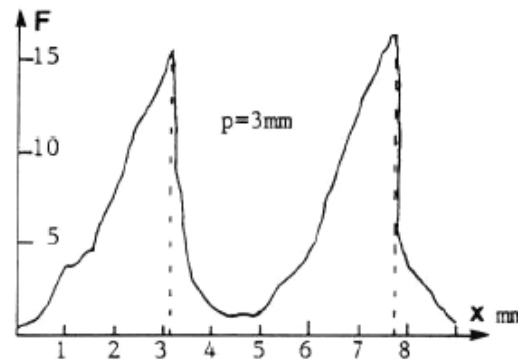


Figure 29 : Effort de coupe frontal d'un placage fissuré d'après [KINOSHITA_1984]

L'énergie dissipée dans la bande de cisaillement augmente avec l'épaisseur du placage. Dès que cette énergie devient supérieure à celle nécessaire à l'apparition d'une fissure, le mécanisme de fissuration débute. Ce ratio diminue fortement avec la densité du bois et augmente avec la température conformément aux observations expérimentales (cf.II.2.1.2.1).

[THIBAUT_2004], à partir de la résultante des forces normales (formulation proche de l'Équation 4) sur le plan de cisaillement pour un angle d'attaque usuel de 70°, propose l'expression de la contrainte moyenne normale sur le plan de cisaillement suivante:

$$\sigma_g = \sin(\phi + 10^\circ) \frac{Fa}{p}$$

Équation 5 : Contrainte moyenne normale sur le plan de cisaillement

Lorsque l'épaisseur p du copeau tend vers zéro, σ_g tend vers l'infini. Cette contrainte devient alors nécessairement supérieure à la limite élastique en flambement transversal des cellules. Le bois, sous les contraintes de compression, se déforme sans être coupé puis rompt brutalement : c'est l'effet Horner. Le suivi du ratio entre la limite élastique en compression et la contrainte moyenne normale au plan de cisaillement (cf. Équation 5) permet d'appréhender son risque d'apparition. L'auteur baptise ce ratio « coefficient de sécurité » pour des copeaux de 0.4 mm d'épaisseur. Il s'effondre pour des faibles densités et des températures élevées, conformément aux observations expérimentales.

L'épaisseur du placage, lorsqu'elle varie ou permet la fissuration, provoque donc des instabilités importantes de l'effort sur la face de coupe. Une telle variation des sollicitations mécaniques sur la machine risque bien de générer des vibrations caractéristiques.

4.3.2.2 Angle de dépouille

Une fois encore, de nombreuses observations pour diverses essences et conditions de coupe, ont permis à [THIBAUT_1988] de conclure que les variations d'angle de dépouille δ n'ont de conséquences remarquables que sur l'effort F_d . La Figure 30 représente les variations de l'effort F_d en fonction de δ et du rayon de déroulage. Pour des angles de dépouille positifs, F_d augmente lentement lorsque δ diminue. Par contre, pour des valeurs négatives de l'angle de dépouille, cette tendance est nettement plus marquée. L'équilibre entre les efforts sur les deux faces est alors rompu puisque F_a est quasiment insensible aux variations de δ . L'apparition d'un régime de refus de coupe accompagné de variations d'épaisseur du placage devient inévitable. C'est cette dernière composante qui explose lorsque l'angle de dépouille devient fortement négatif. L'auteur conseille logiquement d'éviter le talonnage en fin de déroulage souvent pratiqué par les opérateurs.

Il est plus indiqué d'utiliser une barre anti-flambement pour limiter les vibrations que le couteau lui-même car on s'expose à des variations d'épaisseur du placage. Il suffira donc d'utiliser une valeur de dépouille exagérément faible pour produire un régime de refus de coupe et analyser sa signature vibratoire.

Pour les bois hétérogènes, la présence de zones tendres et de zones plus denses va favoriser le déséquilibre entre F_a et F_d d'autant plus facilement que l'angle de dépouille sera faible. F_d oscille, en première approximation, en fonction de la densité des couches de bois passant sous l'outil qui n'est pas nécessairement en phase avec la densité de celles passant sur la face

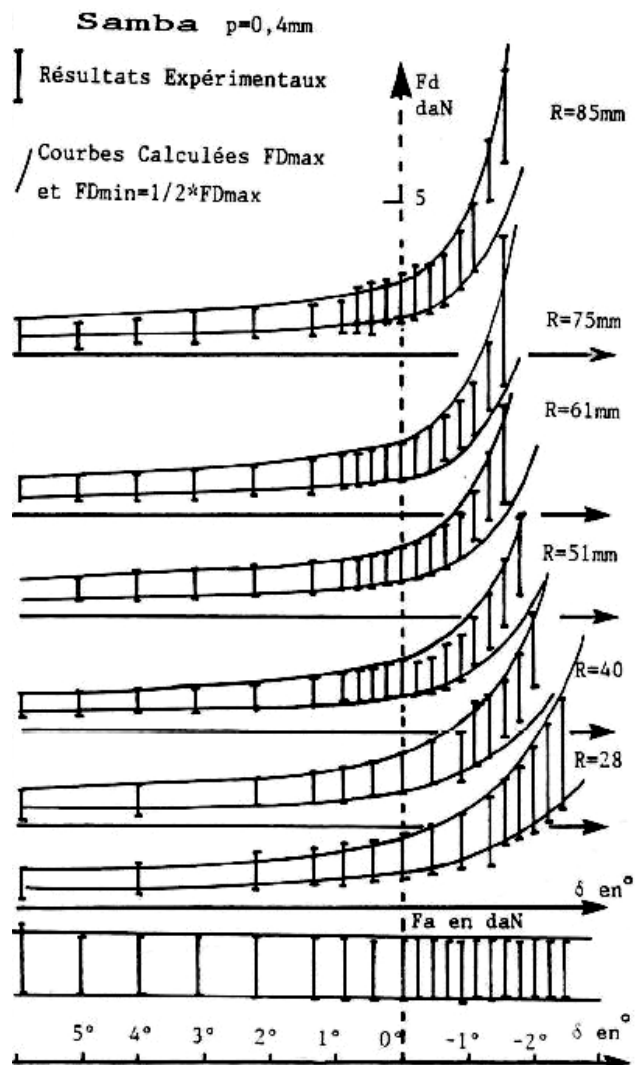


Figure 30 : Evolution F_d avec l'angle de dépouille et le rayon de déroulage d'après [THIBAUT_1988]

d'attaque. Une valeur trop faible de l'angle de dépouille entraîne inévitablement une instabilité du régime de coupe complexe, fruit des effets croisés de cette hétérogénéité sur les deux faces des outils. En première approche, il semble plus judicieux d'utiliser des essences homogènes pour isoler les causes du refus de coupe et faciliter l'identification de leur signature vibratoire.

4.3.2.3 Rayon de déroulage

Le rayon de déroulage n'a pas d'influence sur l'effort d'attaque. Les essais de déroulage de peuplier présentés dans [MOTHE et MARCHAL _2001] le confirment. En revanche, pour des valeurs faibles ou négatives de l'angle de dépouille, F_d augmente fortement avec le rayon de déroulage (cf. Figure 30). La raison en est purement géométrique, la surface de contact entre la face de dépouille et le billon étant nettement plus étendue dans ce cas (contact plan-cylindre).

D'après [MOTHE et MARCHAL_2001], l'effort F_{Yb} de pénétration de la barre dans le billon décroît plus ou moins linéairement avec le rayon de déroulage, là encore pour des raisons géométriques d'autant plus intensément que la cote verticale est grande. [THIBAUT_1988] l'avait remarqué et proposait alors d'augmenter le taux de compression de la barre quand le rayon de déroulage diminue afin de conserver un effort constant plutôt que de diminuer la dépouille. Pour les grands rayons et en phase d'équilibre des efforts, l'action de la barre de pression conduit à un régime de sur-épaisseur. Au cours de l'usinage, le rayon diminuant, la pression exercée par la barre faiblit. La coupe se dirige peu à peu vers un régime de sous-épaisseur (le plan de coupe est plus près de l'axe de rotation du billon que prévu) accompagné parfois d'une augmentation de la fissuration. Cet effort de compression, bien que déterminant pour les variations d'épaisseur du placage n'est que très rarement piloté encore aujourd'hui.

On peut donc considérer qu'il n'a pas d'influence directe sur la coupe mais agit sur les réglages de l'angle de dépouille et du taux de compression qui sont interdépendants. Piloter ces paramètres pour les adapter aux caractéristiques des couches de bois déroulés apparaît nécessaire. Dans le cadre de cette étude, le plus simple est de limiter la variation du rayon de déroulage et d'agir plutôt sur ces paramètres de manière directe afin de minimiser les interactions dans un système déjà complexe.

4.3.2.4 Vitesse de coupe

Si elle semble essentielle pour de nombreux opérateurs sur dérouleuses, les travaux qui lui ont été consacrés restent principalement descriptifs et contradictoires. Sur la Figure 31, l'effort exercé sur la face d'attaque ne semble pas significativement influencé par des variations de la vitesse de coupe dans le domaine considéré (i.e. de 0.005 à 5 m/s ce qui est plus vaste que le champ des vitesses courantes dans l'industrie) d'après [MARCHAL_1989] et [DECES-PETIT _1996]. En revanche, l'effort en dépouille, augmente considérablement entre 0.5 et 2

m/s ce qui semble définir deux domaines distincts : l'un où les efforts en dépouille sont faibles, qui correspond à de bonnes conditions de déroulage, et l'autre, où les efforts très importants reflètent un régime de refus de coupe (F_d très supérieur à F_a). Le même protocole expérimental a été appliqué avec un angle de dépouille de 1° et ce phénomène n'a pas pu être observé.

L'attitude des dérouleurs corrobore ces observations puisqu'ils ont tendance à diminuer la vitesse de coupe lorsque la formation du placage devient délicate (excepté dans le cas de bois tendres, où l'augmentation de la vitesse limite l'effet Horner).

Ces résultats peuvent paraître surprenants. En effet, d'après [THIBAUT_2004], lorsque la vitesse de coupe passe de 1 à 1000 mm/s, l'angle de frottement est divisé grosso modo par deux. L'effort de coupe résultant doit donc diminuer en supposant les composantes normales de F_a et F_d constantes ce qui contredit les résultats expérimentaux de [MARCHAL_1989]. Il faut une fois encore chercher l'explication du côté du comportement mécanique du bois vert. Les différentes raideurs élastiques augmentant avec la vitesse de déformation (cf. I.4.4), et en particulier la résistance en compression radiale, l'effort F_d augmente lui aussi.

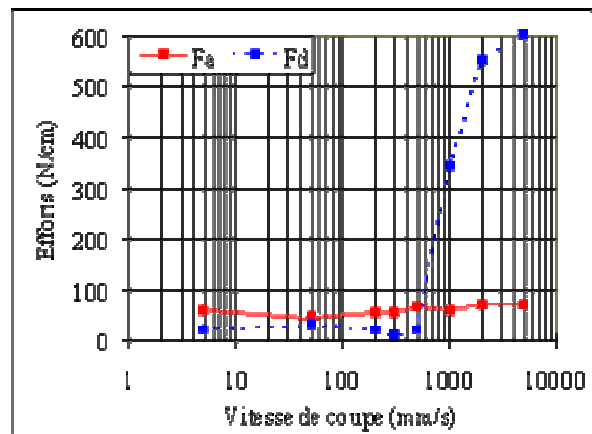


Figure 31 : Influence de la vitesse de coupe sur F_a et F_d dans le noyer d'après [DECES-PETIT_1996] ($E_p=1\text{mm}$ et $\delta=0^\circ$)

L'eau libre contenue dans les lumens des cellules joue certainement un rôle important dans ce phénomène puisque son évacuation est plus partielle à grande vitesse, d'où une rigidification en quelque sorte des parois cellulaires. Le comportement mécanique du bois vert et le frottement bois - métal jouent donc des rôles antagonistes. C'est certainement la source des nombreuses contradictions expérimentales observées concernant l'influence de la vitesse de coupe. Dans les procédés d'usinage, une augmentation de la vitesse de coupe est en général accompagnée d'une forte hausse du niveau vibratoire. Dans le cas présent, elle peut aussi conduire à un changement du régime de coupe. Il serait intéressant d'en comprendre l'effet sur les signatures acoustiques et vibratoires.

4.3.3 Les effets de l'usure de l'outil

Pour des réglages bien ajustés, l'outil s'use très lentement : les dérouleurs parlent « d'auto affûtage ». Si bien qu'en général, le couteau est changé suite à un retournement local de l'arête, après un choc sur un point dur.

En admettant qu'aucun phénomène ne vienne perturber le mécanisme d'usure, on observerait un recul de l'arête de coupe et une augmentation du rayon de bec du couteau. L'effort en pointe d'outil ne devient plus négligeable et favorise grandement l'effet Horner. La valeur locale de l'angle de dépouille diminue au niveau de la zone de contact entre le billon et l'outil. Les opérateurs augmentent légèrement la valeur de l'angle pour contrecarrer cette tendance.

Le suivi des efforts de coupe proposé par [DJOUADI et al _1999] montre bien une augmentation des composantes F_{Xc} et F_{Yc} avec la longueur usinée. Lorsque la composante F_{Yc} (appelée Y_c par les auteurs) devient négative, le régime de refus de coupe est amorcé. C'est là un des avantages du repère de base XY : il fournit une mesure directe du refus de coupe.

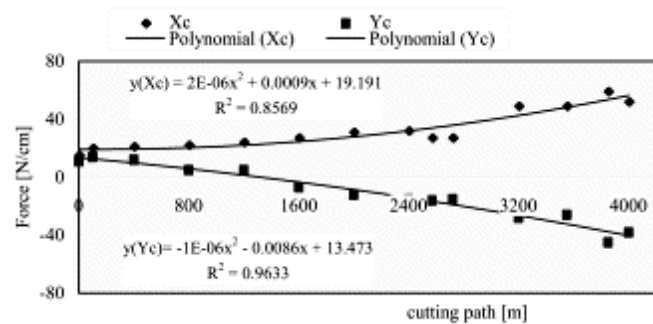


Figure 32 : Evolution des efforts de coupe en fonction de la longueur usinée (hêtre, $Ep=0.3\text{mm}$, $\delta=1^\circ$, $V_c=1\text{m/s}$) d'après [DJOUADI et al _1999]

Nous disposons donc d'un modèle valable de la coupe par déroulage. Son aide dans l'interprétation des signaux vibratoires est précieuse. Il serait heureux de pouvoir relier vibrations et efforts pour profiter de toutes les informations fournies par ce modèle. Mais la tâche n'est pas aisée puisqu'il semble délicat de distinguer les vibrations générées sur les deux faces de l'outil au contraire de celles dans les directions X et Y.

4.4 Synthèse en vue d'une commande adaptative

Cette première partie, longue et pourtant loin d'être exhaustive, nous a permis de lister les principaux transitoires susceptibles d'apparaître lors d'une opération déroulage, leurs origines et leurs signatures dynamométriques. [MARCHAL et al _1996] distinguent trois phases successives dans une opération de déroulage :

- L'amorce de coupe ou périodique A. Le copeau doit théoriquement passer d'une épaisseur nulle à la côte nominale.
- Le régime établi, ou période B. De par sa nature, le processus de déroulage induit une périodicité sur deux tours. En régime stationnaire et dans des conditions favorables, il tend vers un équilibre. L'épaisseur du placage produite est alors constante. Une perturbation (nœuds, hétérogénéité locale, orientation du plan de coupe) entraîne un déplacement du plan de coupe de l'outil qui se traduit soit par un régime de plongée d'outil (passage de l'outil sous le plan de coupe théorique) soit par un régime de refus de coupe (passage de l'outil au-dessus de ce plan). Ces deux phénomènes sont liés et s'auto entretiennent.

➤ Le déroulage à faible rayon, ou période C, caractérisé par un flambement du billon. Les vibrations générées sont alors catastrophiques pour la qualité du placage.

Le pilotage en temps réel des nombreux paramètres du procédé constitue le meilleur moyen, et parfois le seul, de franchir rapidement les transitoires afin de produire des placages de qualité même avec des essences difficiles à valoriser. [MARCHAL et MESSI N'DONGO _1998] définissent trois stratégies possibles de pilotage d'une dérouleuse (cf. Figure 33) :

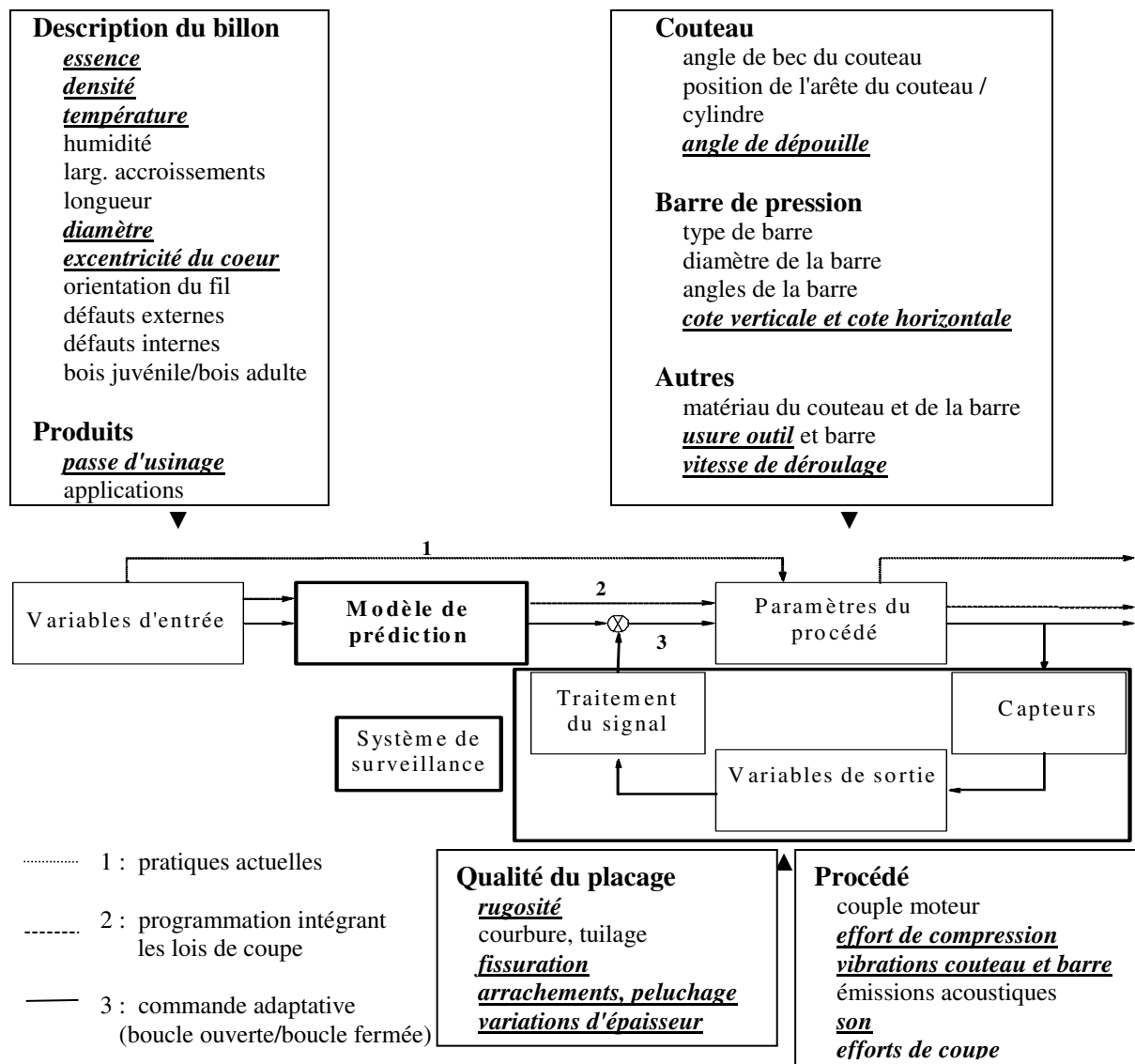


Figure 33 : Paramètres intervenant dans le déroulage et architecture possible de la commande de la machine d'après [MARCHAL et MESSI N'DONGO_1998]

1. Utiliser une liste correspondant aux valeurs de chacun des paramètres essentiels du déroulage pour un type de production particulier (une essence, une épaisseur). C'est la méthode la plus utilisée encore aujourd'hui. Les réglages sont quasi-immuables et l'opérateur

ne modifie gère que la vitesse de coupe et l'angle de dépouille en cours d'usinage (souvent numérisée sur les dérouleuses modernes).

2. Utiliser des programmes de variation des paramètres affinés ce qui suppose l'établissement de modèles de lois de coupe (par essence, pour une passe d'usinage et pour une température d'étuvage).

3. Utiliser une commande adaptative. L'idée consiste à reprendre les modèles définis dans 2 en y introduisant des paramètres rendant compte de l'état de la coupe en temps réel (efforts, vibrations, sons,...). Un système en boucle fermée pourrait alors comparer leurs valeurs en cours aux consignes et agir en retour sur les bons paramètres afin de corriger la dérive.

Avec cette étude, nous nous inscrivons dans la deuxième et la troisième stratégie. L'emploi de la logique floue et les réseaux de neurones seraient certainement également payants. Néanmoins, nous avons privilégié l'utilisation de règles de décision en première approche tenant compte du temps imparti et de la grande diversité des outils mathématiques disponibles. De plus, la mise au point d'un asservissement n'étant pas de notre ressort, nous nous orienterons plutôt vers un système d'aide à la décision de l'opérateur, plus à même de convenir au marché européen. Nous devons sélectionner des capteurs adaptés et les outils de traitement du signal capables de rendre compte de l'état de la coupe en temps réel. L'objectif final vise à se passer des mesures d'efforts souvent contraignantes et coûteuses à mettre en place en laboratoire mais utopiques dans l'industrie comme nous l'avons déjà évoqué. La partie suivante propose une revue des méthodes et outils couramment utilisés dans la surveillance ou le contrôle des machines tournantes.

PARTIE III : Etat de l'art des analyses vibratoires et acoustiques sur machines tournantes

5 Organisation et pré requis

5.1 Contexte

Le contrôle en ligne d'une unité de fabrication nécessite des informations accessibles en temps réel. L'interruption du processus pour s'assurer de la qualité de la fabrication au sens de l'ingénieur ne peut être que ponctuelle. C'est encore plus vrai dans le cas du déroulage où, nous l'avons vu, le début ou la reprise de l'usinage s'accompagne de transitoires néfastes à la qualité du placage. Cet état de fait élimine d'emblée une certaine catégorie de capteurs ou d'opérations de contrôle comme la mesure du recul de l'arête de l'outil afin de quantifier son usure. Les travaux visant à développer un système expert dans l'usinage du bois sont relativement peu nombreux si bien qu'il est difficile de trouver plus d'une douzaine d'études concernant la fabrication de placage, dont moins de la moitié consacrée au déroulage en dehors des travaux préliminaires de l'auteur. Le domaine de l'usinage du métal sera pour nous un grand vivier d'informations. Les études vibratoires y sont nombreuses, variées et souvent approfondies notamment en tournage, procédé très proche à bien des égards du déroulage. Cette richesse nécessite un cadrage strict pour permettre de réaliser un travail suffisamment abouti. Une étude bibliographique rigoureusement exhaustive nous apporterait de nombreux résultats plus ou moins identiques et parfois mêmes contradictoires. Nous nous limiterons à quelques exemples les plus proches possible du déroulage afin de ne pas surcharger cette synthèse déjà longue.

La capacité des opérateurs à identifier une perturbation dans le déroulement du processus nous guide vers des capteurs compatibles avec le domaine fréquentiel de l'audible soit entre 20 Hz et 20 kHz. Ce domaine est communément considéré comme celui des vibrations, ce qui réduit considérablement le champ des capteurs utilisables. Au-delà et jusqu'à une centaine de kilohertz, limite du début du domaine des Emissions Acoustiques (E.A), on parlera d'ultrasons.

Notre objectif premier vise à identifier des outils mathématiques simples et capables de tirer des mesures vibratoires et acoustiques les informations caractérisant le procédé de déroulage en cours. Les travaux regroupés dans [MOREL_1992] ou [SIDAHMED_1997] constituent une aide précieuse puisqu'ils offrent un grand panel de méthodes d'analyses adaptées au cas des machines tournantes.

En progressant par niveaux croissants de complexité, l'analyse du signal temporel issu des capteurs constitue toujours une première étape souhaitable. Elle offre une batterie de descripteurs statistiques que nous détaillerons par la suite. Le passage dans le domaine fréquentiel apporte un autre regard sur les signaux enregistrés en donnant notamment un accès plus immédiat aux phénomènes périodiques ou pseudopériodiques. L'étape suivante consistera naturellement à observer l'évolution des fréquences remarquables dans le temps : c'est l'analyse « temps-fréquence » et ses dérivées.

Nous privilégierons une approche critique de l'utilisation de ces différentes techniques plutôt que de longs développements théoriques concernant leurs principes de fonctionnement que l'on trouve en abondance dans la littérature.

Afin que les analyses menées aient un sens, certaines propriétés du signal sont nécessaires. Nous devons d'abord les rappeler.

Remarque: Les Emissions Acoustiques se situent indubitablement en dehors des limites fréquentielles fixées mais méritent néanmoins une parenthèse tant l'engouement qu'elles ont suscité dans le domaine du bois a été grand. La norme NF EN 1330_9 définit l'émission acoustique comme : « *un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau soumis à une sollicitation* ». Une E.A. est donc révélatrice de la libération de contraintes. Les travaux de LEMASTER et de ses collaborateurs ([LEMASTER et al_1982], [LEMASTER et KATO_1991]) ont mis en évidence un atout majeur des E.A. dans le domaine du bois : elles sont révélatrices en premier lieu du mécanisme de formation du copeau et non des frottements comme dans l'usinage des métaux. [LEMASTER et al_1982], identifient les zones de frottement bois-outil, le plan principal de cisaillement et les fissures comme les sources principales des E.A. pour une opération de coupe proche du déroulage. Elles constituent donc un bon indicateur de l'état de la coupe. Leur emploi s'est bien développé dans le domaine des contrôles non destructifs mais reste confidentiel dans l'usinage. [LEMASTER et al_2000], comparant différentes technologies utilisables pour le contrôle en ligne du défonçage de bois, soulignent les limites de l'utilisation des E.A dans un contexte industriel. En particulier, le positionnement des capteurs doit être proche de la cible et précis. Les mesures sont fortement influencées par la distance à la source. De même, plus les éléments intermédiaires tels que des roulements, par exemple, sont nombreux et plus l'information est dissoute dans le « bruit de fond du signal ». Les développements récents des outils de traitement et d'interprétation du signal tels que les réseaux de neurones constituent des pistes pertinentes afin de mieux exploiter ces données, en particulier dans l'usinage du bois.

5.2 Propriétés des signaux vibratoires des machines tournantes

Un signal peut être défini comme une fonction (du temps mais éventuellement d'autres variables) qui constitue le support d'une information. Cette information intervient en général

dans la description de l'état d'un système physique. Un signal continu (ou analogique), au sens mathématique du terme, est défini en tout point d'un intervalle de temps donné. Un signal échantillonné (ou discret) est défini en un nombre de points dénombrables. Un signal discret peut être obtenu par échantillonnage d'un signal continu. Cette opération est lourde de conséquences comme nous le verrons par la suite.

De par leur nature même, on distingue deux types de signaux. Les signaux déterministes qui peuvent être parfaitement décrits par des modèles mathématiques appropriés et les signaux aléatoires qui ont un comportement imprévisible et qui nécessitent une étude statistique. Tout signal physique comporte de manière intrinsèque une composante aléatoire. On pourra alors employer le terme de phénomène stochastique c'est-à-dire dont le déterminisme n'est pas absolu, et pouvant être étudié par la statistique. Le cas des machines tournantes ne fait pas exception. D'après [TEBEC_1987], leurs signaux : *« possèdent une partie déterministe, sensiblement périodique à cause de la régularité de la vitesse de rotation de la machine, et une partie aléatoire qui provient à la fois de phénomènes mécaniques (frottements, cavitation dans les fluides,...) et du bruit inhérent à toute mesure physique »*.

Pour pouvoir utiliser les résultats de nos analyses, les signaux doivent présenter certaines propriétés au cours du temps et en particulier : stationnarité et ergodisme.

➤ Un signal est stationnaire lorsque l'ensemble de ses propriétés statistiques est invariable dans le temps d'après [MAX_1985]. Dans la pratique, on se contente de la stationnarité au sens large qui signifie simplement que les résultats de nos essais seraient les mêmes si on les répétait au bout de quelques minutes. Autrement dit, il s'agit d'une stationnarité à court terme : le comportement de la machine ne doit pas être modifié brutalement entre deux mesures relativement rapprochées dans le temps. L'usure de la machine va, bien entendu, perturber sa signature vibratoire mais nous pouvons raisonnablement la négliger dans le cadre de cette étude.

➤ On parle d'un processus ergodique lorsque : *« les résultats obtenus à partir de moyennes temporelles ont la même signification que les résultats obtenus à partir de moyennes d'ensemble »* d'après [MAX_1985]. Cela signifie que la moyenne des indicateurs d'une grande quantité de machines fonctionnant dans les mêmes conditions à un instant donné serait la même que celle obtenue sur une grande durée, pour une seule machine. Dans la pratique, on supposera que ce signal peut prendre quasiment toutes les valeurs possibles pendant la durée de mesure pour peu qu'elle soit suffisamment longue.

6 Approches temporelles

Une première analyse du signal temporel est toujours souhaitable. Elle peut permettre de mettre en lumière des résultats intéressants tout en guidant l'auteur dans le choix des traitements les plus judicieux à utiliser. [JANTUNEN_2002] dresse une synthèse

bibliographique des techniques utilisées dans le suivi des conditions de coupe en perçage à partir de 34 études parmi lesquelles 30 proposent une analyse statistique des données temporelles.

6.1 Exploitation des données brutes : Choix des indicateurs

6.1.1 Descripteurs discrets

6.1.1.1 Les sons

Le niveau de pression sonore en dB reste aujourd'hui encore l'indicateur le plus employé lorsqu'on utilise un seul microphone. Il est défini par l'Équation 6 où P_o est une pression de référence arrondie par convention à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, qui correspond à la variation minimale de pression détectée par l'oreille humaine dans des conditions précises (1kHz en son pur, champ libre, écoute binaurale et onde plane).

$$SPL = 20 \log\left(\frac{P}{P_o}\right)$$

Équation 6 : SPL en dB

C'est certainement l'interprétation délicate des signaux dans le domaine du temps qui est à l'origine du très petit nombre de travaux consacrés à l'analyse de la coupe de bois. A notre connaissance, seul NAGATOMI et ses collaborateurs ont abordé cet aspect.

[NAGATOMI et al_1993], proposant une analyse des sons générés par la coupe orthogonale en faible épaisseur de cyprès japonais (*Chamaecyparis obtusa* Endl.), constatent une baisse du niveau de pression sonore dans le domaine de l'audible avec l'augmentation de l'usure ce qui ne correspond pas totalement aux observations vibratoires de la coupe des métaux comme nous le verrons par la suite. Ils notent aussi une assez bonne correspondance entre la fréquence fondamentale du signal sonore et l'apparition de fissures sur le copeau. Enfin, après avoir testé différentes rigidités du système de fixation de l'outil, ils concluent sur la grande influence de ce dernier sur les fréquences excitées ce qui n'est somme toute pas surprenant.

[NAGATOMI et al_1999] présentent les résultats d'une série de tests de déroulage de sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) pour deux épaisseurs (1.4 et 3.16 mm). Le niveau de pression sonore, l'état de surface du placage au travers du paramètre W_a (ondulation arithmétique moyenne) ainsi que la distance et la profondeur des fissures ont été mesurés. Ils observent d'abord une augmentation du nombre de pics de forte amplitude sur le signal sonore avec la rugosité. L'intervalle entre ces pics est constant et semble correspondre à celui mesuré entre les fissures à l'aide d'une caméra CCD. Ils obtiennent aussi une forte corrélation entre la probabilité que le SPL dépasse un certain seuil (1.07 Pa) et l'état de surface du placage produit. C'est la seule étude à ce jour, excepté les travaux préliminaires de l'auteur, qui introduit la possibilité de détecter l'ouverture d'une fissure de déroulage à partir d'un

enregistrement sonore de la coupe. Il est regrettable qu'ils n'aient pas davantage approfondi cette voie fort prometteuse probablement du fait de la difficulté d'identification des pics. En effet, le microphone étant particulièrement sensible à toute perturbation extérieure à la coupe, le niveau du bruit de fond peut être conséquent. Parallèlement, les auteurs utilisent le microphone sur une très large bande fréquentielle (de 0 à 100 kHz). On peut se demander si ce choix est judicieux pour l'observation des fissures dont les fréquences d'apparition ne dépassent pas quelques centaines de hertz étant donné la vitesse de coupe. L'adéquation entre la chaîne de mesure et les phénomènes recherchés, tels que l'ouverture de fissures, pourrait sans doute être amélioré en utilisant un capteur mieux adapté à cette bande fréquentielle. Enfin, la régression linéaire de bonne qualité reliant état de surface et probabilité d'obtenir un pic sur le signal sonore passe par la définition d'un seuil plus ou moins arbitraire et surtout très dépendant des conditions des essais (vitesse, essence, machine,...). C'est le talon d'Achille des approches temporelles les plus couramment employées. La plupart des indicateurs ne permettent d'obtenir des règles de décision qu'au moyen de limites explicites dont la polyvalence, et de fait les possibilités d'utilisation en entreprise, restent limitées.

6.1.1.2 Les vibrations

Les indicateurs temporels les plus simples, employés pour alimenter un système de détection de défauts à partir de mesures vibratoires, ont souvent été proposés dans des travaux consacrés au suivi des roulements :

- la valeur crête de l'amplitude,
- la valeur Root Mean Square ou valeur efficace,

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad \text{et} \quad V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2}$$

Équation 7 : RMS d'un signal continu et d'un signal discret

On reconnaît dans cette formulation (Équation 7) l'expression de l'écart type (Équation 8) d'une variable dont la moyenne serait nulle ce qui est pratiquement toujours le cas lorsqu'on utilise des accéléromètres sur un temps suffisamment long.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2} \quad \text{où } \bar{x} \text{ est la moyenne}$$

Équation 8 : Écart type d'un signal discret

Le RMS contient toute l'énergie du signal c'est-à-dire toute l'information pertinente mais aussi le bruit de fond. Il dépend des paramètres du procédé mais les résultats expérimentaux sont parfois contradictoires sur ce point puisqu'il intègre les effets de nombreux phénomènes distincts.

[JANTUNEN et JOKINEN_1996] cités dans [JANTUNEN_2002] comparent les valeurs du RMS à celles de 7 descripteurs (moyenne arithmétique, moyenne, écart type, Skewness, Kurtosis, maximum et minimum) pour le contrôle en ligne d'une opération de perçage du métal. S'il n'est pas toujours le « meilleur », il est souvent classé dans les 4 premiers. Il est généralement utilisé après filtrage dans une bande de fréquence déterminée.

➤ le « count rate » (nombre de points au dessus d'un seuil pour une durée donnée) ou le « cumulative count rate » (somme des précédents points).

Ces traitements ont apporté des résultats prometteurs dans le traitement des E.A. Pour une configuration proche du déroulage, [LEMASTER et al_1982] obtiennent une meilleure sensibilité à l'instabilité de la coupe du *count rate* que du V_{RMS} des E.A., ce dernier étant pourtant corrélé à l'effort radial ($r=-0.84$). Plusieurs auteurs ont utilisé des approches similaires dans le domaine vibratoire sans toutefois utiliser le même vocabulaire. Ainsi, [GUSTAFSSON et TALLIAN_1962] proposent une méthode de détection de défauts dans des roulements à partir du nombre de pics du signal temporel dépassant un seuil prédéfini (approche dont nous avons déjà évoqué les limites).

Ces outils ne permettent pas d'obtenir une information précise sur la nature ou la localisation du défaut comme le souligne [TANDON et CHOUDHURY_1999] qui présentent une étude comparative des systèmes de détection de défauts appliqués aux roulements. Pourtant, certaines combinaisons comme le facteur de crête (ratio entre la valeur de crête et le RMS) peuvent fournir une indication sur l'état de dégradation du roulement étudié. D'après [BOULENGER et PACHAUD_1995], une valeur faible du facteur de crête, associée à un niveau bas de la valeur efficace et de la valeur crête, correspond à un roulement en bon état. Lorsque la dégradation s'amorce, les chocs répétés vont amplifier la valeur de crête et donc le facteur de crête. Ce n'est que lorsque le roulement est vraiment dégradé que le RMS du signal augmente sensiblement, réduisant le facteur de crête.

Il existe encore de nombreux dérivés de ces critères ($V_{crête}$ à crête, $V_{crête}$ mini, facteur de forme,...) mais ils présentent tous en quelque sorte des avantages et des faiblesses comparables, qui ont conduit à une utilisation relativement limitée.

6.1.2 Techniques de moyennage statistiques

Pour progresser dans l'analyse du signal temporel, de nombreux auteurs ont utilisé la notion de densité de probabilité du signal. Si l'on considère l'ensemble des valeurs obtenues à l'aide d'un capteur comme les réalisations d'une variable aléatoire continue, on peut définir sa densité de probabilité $p(x)$:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{P[x < x(t) < x + \Delta x]}{\Delta x} \right)$$

Équation 9 : Densité de probabilité d'une variable aléatoire continue

On peut alors reformuler les expressions du RMS et de l'écart type σ pour une variable aléatoire continue de la façon suivante :

$$V_{RMS} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx \text{ et } \sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx}$$

Équation 10 : RMS et de l'écart type d'une variable aléatoire continue

La densité de probabilité permet aussi d'introduire la notion de moments statistiques centrés. La connaissance des moments d'une variable aléatoire caractérise complètement sa distribution de probabilité. Le moment statistique centré d'ordre q d'une variable aléatoire est défini par :

$$M_q = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^q p(x) dx \quad \text{ou} \quad M_q = \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^q p_k$$

Équation 11 : Moment statistique d'ordre q d'une variable aléatoire x continue ou discrète

On reconnaît alors respectivement aux ordres 1 et 2 l'expression de sa moyenne (espérance mathématique de la variable) et celle de sa variance (carré de l'écart type). Le troisième et le quatrième moment permettent de caractériser le degré d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution. On définit alors deux quantités sans dimension plus aisées à utiliser : les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement plus connus sous les noms de « Skewness » et « Kurtosis » :

$$Skewness = \frac{M_3}{\sigma^3} \quad \text{et} \quad Kurtosis = \frac{M_4}{\sigma^4}$$

Équation 12 : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement

L'asymétrie de la distribution sera positive si le Skewness est lui aussi positif et inversement. Lorsqu'elle est symétrique, il est nul.

Pour une distribution Gaussienne de référence, le Kurtosis vaut 3. Lorsque les valeurs de la variable sont fortement concentrées autour de la moyenne, l'écart type est faible et le Kurtosis excède 3. Dans le cas contraire, la courbe est nettement plus étalée et le Kurtosis est inférieur à 3.

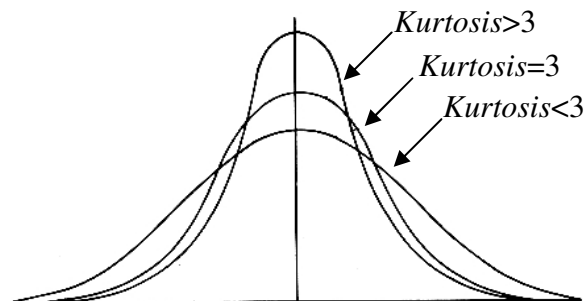


Figure 34 : Représentation schématique de la distribution d'une variable aléatoire dans trois cas caractéristiques

Les travaux de [DYER et STEWART_1978] constituent la première application de ce paramètre à la détection de défauts dans les roulements. En effet, un roulement en bon état

génère un signal vibratoire proche d'une distribution Gaussienne. Lorsqu'il vieillit, les traces d'usures, telles qu'un écaillage d'un chemin de roulement, vont générer des chocs plus ou moins périodiques. La densité de probabilité se concentre autour de la valeur particulière associée et le Kurtosis dépasse 3. Par contre, lorsque l'endommagement devient trop sévère, le signal retrouve une composante aléatoire plus marquée et le Kurtosis décroît en tendant à nouveau vers 3. Il est aussi sensible à certains paramètres comme la vitesse de rotation, les bandes de fréquences étudiées ou le niveau du bruit de fond. Cela explique en partie son succès relativement limité auprès des industriels. Néanmoins, il a été utilisé par les chercheurs comme base de référence afin d'évaluer les possibilités de nouveaux indicateurs ([HENG et NOR_1998] ou [HONARVAR et MARTIN_1997] parmi de nombreux autres). Il a aussi servi d'application à de nouveaux développements en particulier concernant l'extraction du bruit de fond. [DRON et al_2004] proposent une soustraction spectrale de la partie aléatoire du signal. Le retour au domaine temporel aboutit à un signal partiellement « débruité », ce qui accroît la sensibilité du Kurtosis et du facteur de crête.

Les moments statistiques ont aussi été employés mais de manière plus marginale dans l'usinage des métaux. En tournage, [SCHEFFER et HEYNS_2001] utilisent avec succès l'ensemble des paramètres cités (mais pas seulement) afin d'alimenter un réseau de neurones chargé de suivre l'usure d'un outil diamant en tournage. A notre connaissance, dans l'usinage du bois, aucun travail n'a fait usage de moments statistiques d'ordre supérieur à 2.

Les résultats obtenus à l'aide des différents descripteurs peuvent être améliorés en prétraitant le signal. Il peut s'agir d'un filtrage plus ou moins complexe ou d'un « ré-échantillonnage ». La plupart des auteurs procèdent de cette manière : préparer les données afin d'améliorer le rendu des indicateurs.

6.2 Prétraitements des données

6.2.1 Filtrage⁸

« *Filtrer un signal, c'est agir sur sa représentation fréquentielle pour la modifier : le filtre [...] corrige la réponse en fréquence d'un appareil* » d'après [DECLERCQ et QUINQUIS_1996]. Un filtre idéal transmet intégralement les fréquences d'une bande donnée et supprime complètement les autres. Il se caractérise par sa fonction de transfert (comparaison du signal de sortie sur le signal d'entrée cf. III.7.2.3.3) ou sa réponse impulsionnelle (réponse à une impulsion de Dirac) qui met en évidence ses caractéristiques principales :

⁸ Le cadre de cette étude ne permet qu'un survol de la notion de filtrage. Le lecteur curieux pourra se référer à [MAX_85] qui introduit des notions de base et propose une liste d'ouvrages de référence ou à [BELLANGER_2004], dernière édition actualisée et pédagogique qui développe clairement les notions susnommées.

fréquence de coupure et taux d'affaiblissement (pente). On retrouve quatre types de filtres monobande :

➤ Passe bas : Il ne laisse passer sans atténuation que les composantes fréquentielles du signal inférieures à la fréquence de coupure. Une immense majorité des auteurs ayant traité des mesures d'efforts l'utilise dès l'acquisition afin de s'assurer une réponse linéaire du capteur (fréquence de coupure du filtre nettement plus faible que la fréquence de résonance du capteur).

➤ Passe haut : Seules les composantes hautes fréquences du signal vont transiter sans atténuation. Typiquement, lorsqu'on mesure un état de surface, on pourra être amené à utiliser ce type de filtre afin de caractériser la rugosité et non l'ondulation de cette surface.

➤ Passe bande : Comme son nom l'indique, la bande de fréquence définie est conservée ce qui permet d'isoler une composante particulière du signal.

➤ Coupe bande : Il est le complémentaire du précédent. Souvent, il permet d'évacuer une composante parasite ou encombrante en vue du traitement futur.

Notons cependant que tout filtre introduit un déphasage entre les signaux d'entrée et de sortie qui n'est pas constant en fonction de la fréquence. Plusieurs auteurs ont isolé les composantes fréquentielles « utiles » du signal en le filtrant. [NAGATOMI et al_1994] analysent les relevés de pression sonore d'un microphone pour différentes bandes fréquentielles suite à une opération de perçage. Ils obtiennent une forte corrélation négative entre le SPL de la bande 10-20 kHz et l'usure de l'outil. Dans le cas de l'usinage des métaux, la tendance semble rester valable. [CHIOU et al_1999] présentent les résultats de mesures dynamométriques et vibratoires conduites en tournage. Le RMS, calculé dans une bande contenant la fréquence associée au premier mode du porte-outil, diminue avec l'amplification de l'usure ce qui caractérise, selon les auteurs, une stabilisation de la coupe puisque la surface de contact s'étend sur la face de dépouille. Nous verrons que ces résultats sont contredits, partiellement au moins, par les travaux de [LIM_1995].

[EL-WARDANY et al_1996] proposent de détecter la rupture de forets de petits diamètres (3 et 6 mm) en perçage à partir des signaux vibratoires de deux accéléromètres (direction d'avance et direction transverse). Plus précisément, le produit de leurs Kurtosis respectifs est calculé après filtrage (passe bande incluant les fréquences de résonances principales de l'ensemble pièce/montage et de la broche). Le Kurtosis étant sensible à la présence d'un grand nombre de pics marqués sur le signal temporel, il améliore la robustesse de son critère en introduisant une autre paramètre : RAMV (Ratio of the Absolute Mean Value). C'est le ratio de la valeur absolue de la moyenne des vibrations du tour considéré sur celle du premier tour. Il est employé comme un premier critère qui autorise ou non le calcul du Kurtosis. D'après les auteurs, les valeurs du Kurtosis obtenues sont insensibles aux changements des conditions de coupe, à la présence de copeaux dans le trou et à la dureté de la pièce. La démarche proposée,

qui consiste à utiliser un enregistrement des bonnes conditions de coupe comme référence, est très intéressante et mérite d'être adaptée à notre application.

6.2.2 Démodulation

La modulation est un outil incontournable du transport d'information (ondes radio, TV,...). Elle permet de déplacer le spectre d'un signal dans une zone fréquentielle compatible avec sa transmission. Pour le cas simple d'une modulation d'amplitude ou AM (cf. Figure 35), on obtient le signal modulé en multipliant le signal basse fréquence ou onde modulante par un signal haute fréquence appelé onde porteuse. m , indice de modulation parfois exprimé en pourcentage, conditionne les variations maximales de l'amplitude de l'onde modulée.

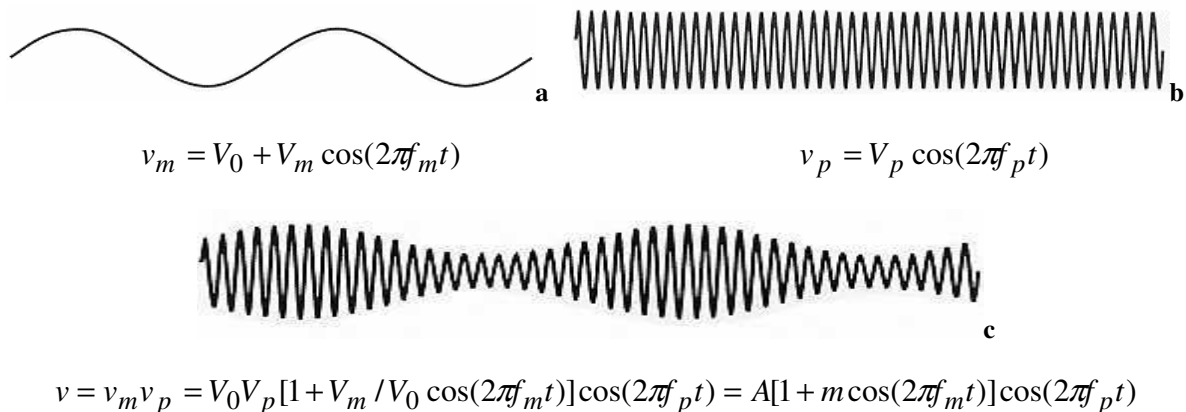


Figure 35 : Représentation schématique et expressions simplifiées (déphasage nul) d'une modulation d'amplitude (a onde modulante, b onde porteuse, c onde modulée)

En anticipant quelque peu sur l'analyse fréquentielle, on obtiendrait, à partir des expressions définies précédemment le spectre ci-contre. Les mécaniciens cherchent plutôt à isoler les différentes composantes pour en identifier l'origine. Un réducteur fournira de manière plus ou moins marquée un signal d'engrènement modulé par les fréquences de rotation de l'arbre par exemple. Pour un signal simplement périodique, on observerait de nombreuses raies sur le spectre.

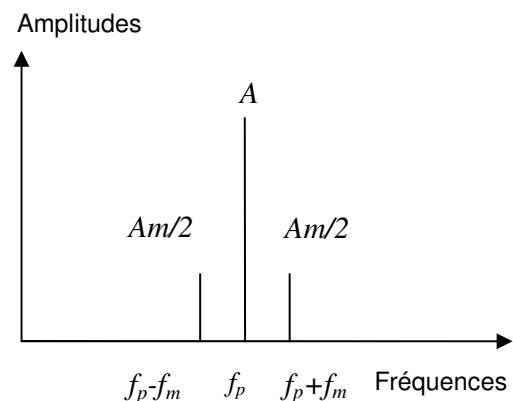


Figure 36 : Spectre d'une modulation sinusoïdale

Dans le cas particulier de l'usinage, les signaux sont toujours plus ou moins modulés en amplitude, en fréquence et en phase du fait de l'interaction combinée des multiples excitations de la machine. C'est probablement pour cela que nous n'avons pas trouvé d'application d'algorithme de démodulation à des signaux issus de machines-outils. Néanmoins, en permettant de séparer les signatures de plusieurs phénomènes plus ou moins périodiques superposés, cet outil peut s'avérer utile.

6.2.3 Ré-échantillonnage cyclostationnaire

D'après [ANTONI et al_2004], par définition, un processus cyclostationnaire est stochastique et contient des périodicités masquées. D'un point de vue formel, la densité de probabilité d'un signal cyclostationnaire au sens strict de cycle T est périodique de période T . Dans le cas réel des machines tournantes, on se confronte à l'interaction de plusieurs mécanismes générant des signaux cyclostationnaires (réducteur, roulements,...), on parle alors de poly-stationnarité.

Lors d'une opération de déroulage à vitesse linéaire constante, le moteur de broche est contraint d'accélérer proportionnellement à la réduction du rayon. La durée de rotation est alors asservie à la loi de vitesse du moteur. L'observation du contenu fréquentiel d'un signal sur une fenêtre de temps constante (indispensable à nombre d'outils de traitement du signal) est alors peu pertinente puisque certaines fréquences évoluent avec l'accélération du moteur. Dans ce cas, on parlera de cyclostationnarité angulaire et non temporelle. Les stratégies les plus communément admises consistent alors à acquérir directement le signal suivant la loi de vitesse angulaire considérée (tachymètre) ou à ré-échantillonner le signal temporel suivant cette même loi [ANTONI et al_2002]. Ces nouvelles données peuvent alors être traitées à l'aide d'une analyse d'ordre qui utilise comme base de fréquence des multiples de la vitesse de rotation (ordres) plutôt que les fréquences absolues (Hz) [FYFE et MUNK_1997].

Cette approche a montré de grandes possibilités illustrées notamment dans [ANTONI et al_2004]. À notre connaissance, elle n'a pourtant pas encore été appliquée au cas du déroulage.

6.2.4 Séparation des sources du bruit de fond

Comme son nom l'indique, cette technique ambitieuse vise à identifier et à séparer les différentes sources à l'origine du bruit de fond d'un signal. Son application à la détection de défauts ou au diagnostic des machines tournantes est encore marginale puisque très récente. On retiendra cependant les travaux proposés par SERVIERE, GELLE et COLAS [GELLE et al_1999] ou ceux, particulièrement convaincants d'ANTONI.

[ANTONI_2004] souligne les nombreuses et solides difficultés rencontrées lorsqu'on cherche à appliquer cette technique à des systèmes mécaniques complexes. Il propose alors de séparer les signaux et non les sources de bruit de fond ce qui présente le double avantage de s'affranchir de l'ambiguïté inhérente à la définition de ces sources et de leurs points d'applications. L'idée consiste à décomposer par étapes un signal vibratoire en composantes indépendantes suivant le principe décrit sur la Figure 37.

Pour extraire la composante périodique du signal, l'algorithme proposé compare (au sens des moindres carrés) la Transformée de Fourier Rapide sur une fenêtre de N points du signal à celle obtenue pour un décalage temporel Δ . La composante périodique ainsi isolée, un second algorithme basé sur l'utilisation du Kurtosis spectral permet de discerner les composantes stationnaires des composantes non stationnaires.

L'utilisation du Kurtosis spectral est détaillée dans [ANTONI_2006]. Il quantifie le degré de « non-stationnarité » d'un signal à l'image de son homologue dans le domaine temporel. Cette nouvelle approche n'a pu être employée dans le cadre de cette étude puisqu'elle est encore très récente mais son potentiel mérite une attention particulière.

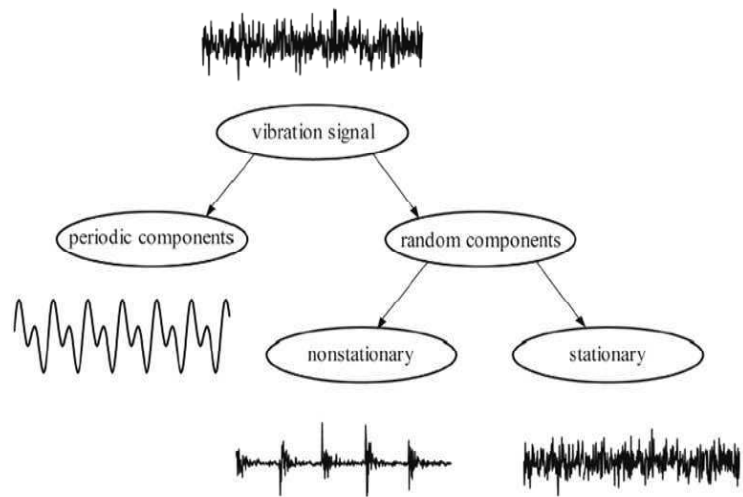


Figure 37: Décomposition d'un signal vibratoire [ANTONI_2004]

Comme le lecteur a pu s'en rendre compte, nous glissons peu à peu vers des outils destinés au domaine spectral. Leurs propriétés et leur diversité sont à l'origine de l'engouement qu'ils ont suscité en particulier dans l'usinage.

7 Approches fréquentielles

Le passage dans le domaine des fréquences d'un signal est réalisé à l'aide d'une transformation mathématique dont le but est de mettre en évidence certaines propriétés de ce signal. Une nouvelle fois, nous limiterons au maximum les développements mathématiques associés aux méthodes d'analyse du signal recensées. Les lecteurs désireux d'approfondir certaines définitions pourront trouver plus de détails parmi les ouvrages cités.

Avant cela, une technique classique largement employée dans le domaine acoustique mérite d'être abordée : l'analyse en 1/n-ième de bandes d'octave.

7.1 Analyse en bandes d'octave

Le signal passe dans une batterie de filtres montés en parallèle afin de déterminer le niveau de chaque bande. La fréquence haute d'une octave étant le double de la fréquence basse, la représentation de ces bandes est équidistante en échelle logarithmique. Lorsqu'une analyse en tiers d'octave est pratiquée, les octaves sont divisées en trois. Cette dernière est particulièrement utilisée puisque les filtres d'octaves supérieurs à 500 Hz correspondent assez bien aux groupes de fréquences définies par la psychoacoustique (perception humaine des sons).

[ISKRA et TANAKA_2005] présentent une application de cette analyse à l'intensité sonore enregistrée en défonçage pour différentes vitesses d'avance, engagements radiaux et angles du fil du bois (hêtre japonais ou *Fagus creneta* Blume). Un des avantages de la mesure de l'intensité acoustique provient de sa robustesse face aux perturbations extérieures, ce qui facilite les mesures in situ. La sonde intensimétrique est constituée de deux microphones, souvent appairés en phase, montés tête-bêche. Elle apporte une information concernant la

direction du flux au travers d'une surface (grandeur vectorielle). Les auteurs obtiennent une très bonne corrélation (0.981 pour 13 échantillons) entre l'état de surface obtenu pour différents angles du fil (mesuré par la valeur du Ra) et le niveau d'intensité de la 36^{ème} bande (fréquence centrale 4 kHz). De même, l'augmentation de la vitesse d'avance se traduit par un accroissement de l'intensité acoustique et du Ra (ce qui est logique étant donné le calcul effectué). Enfin, l'intensité acoustique mesurée est plus que doublée lorsque l'engagement radial passe de 1 à 2 mm.

Ces résultats sont encourageants mais le choix de cette bande de fréquence n'est pas expliqué par les auteurs et reste probablement propre aux conditions expérimentales adoptées (machine, vitesse de rotation, type d'outil, essence,...).

Cette analyse ne présente pas la finesse d'une analyse FFT sur l'ensemble du spectre. On peut néanmoins la considérer comme une mesure (du SPL ou d'une pression suivant les choix) déjà filtrée sur une série de bandes de fréquence définie. De ce point de vue, elle constitue un moyen rapide de calcul pour évaluer l'intérêt d'un filtrage.

7.2 Utilisation de la Transformation de Fourier

7.2.1 Prélude

7.2.1.1 Concepts de bases

On montre que tout signal périodique peut s'écrire comme une somme de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont les multiples d'une fréquence de référence appelée fondamentale : c'est la décomposition en série de Fourier. Ce résultat est généralisé aux fonctions non périodiques en introduisant l'intégrale de Fourier et en considérant qu'une fonction non périodique n'est autre qu'une fonction périodique de période infinie. Soit $x(t)$ une fonction du temps. On lui associe $X(f)$ une fonction dépendant du paramètre fréquence f selon les relations suivantes :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad \text{et la réciproque} \quad x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df$$

Équation 13 : Transformées de Fourier

$X(f)$ est une fonction complexe appelée spectre de Fourier de la fonction non périodique $x(t)$. On définit alors les spectres des amplitudes et des phases par :

$$|X(f)| = \sqrt{\operatorname{Re}(X(f))^2 + \operatorname{Im}(X(f))^2} \quad \text{et} \quad \Phi(f) = -\arctan\left(\frac{\operatorname{Im}(X(f))}{\operatorname{Re}(X(f))}\right)$$

Équation 14 : Spectres des amplitudes et des phases

Gardons à l'esprit que : « $x(t)$ et $X(f)$ représentent la même grandeur physique mais dans des représentations différentes » [MAX_1985].

Le théorème de PARCEVAL exprime que l'énergie contenue dans le signal temporel est égale à celle dans sa représentation fréquentielle. On peut alors introduire les spectres d'énergie ou densité spectrale énergétique et les spectres de puissance ou densité spectrale de puissance. Les premiers sont utilisés dans le cas de signaux à énergie finie comme les transitoires. Les seconds, très couramment employés et communément appelés autospectres, concernent les signaux à puissance finie ce qui est le cas de tout signal réel. Le fait de les observer sur une période finie les rend également à énergie finie.

7.2.1.2 Transformée de Fourier Discrète et Transformée de Fourier Rapide

Dans la plupart des cas, on ne traite pas un signal analogique mais un signal échantillonné c'est-à-dire connu à certains instants. Moyennant certaines hypothèses et le sacrifice de quelques propriétés intéressantes comme l'additivité par exemple des transformées de Fourier, on peut définir la transformée de Fourier Discrète d'un signal échantillonné. Considérons alors une séquence $x[n]$ de signal échantillonné définie par N « mots » dans le domaine temporel et espacés de T_e (période d'échantillonnage). A cette séquence dans le domaine temporel on peut associer une séquence de N « mots » dans le domaine fréquentiel définie par :

$$X[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad \text{Où } n \in [0, N-1]$$

Équation 15 : Transformée de Fourier Discrète

La transformée inverse se déduit des précédentes expressions. Cette transformée de Fourier discrète présente l'avantage d'être calculable très rapidement en utilisant certains algorithmes dont celui de COOLEY et TUKEY est le plus connu, d'où le nom de Transformée de Fourier Rapide (FFT). La plupart des analyseurs fournissent non pas la transformée de Fourier du signal mais sa densité spectrale de puissance (DSP) plus commode à utiliser (normée). En outre, elle permet de qualifier les échanges entre deux signaux dans le domaine des fréquences et d'accéder à la fonction de transfert d'un système.

Cette formulation introduit la dualité entre résolution fréquentielle et fenêtre d'observation temporelle. Nous reviendrons plus en détail sur les précautions à prendre dans la conduite du calcul sur notre cas concret. On peut déjà remarquer que pour un bloc de N points de calcul donné, la période d'échantillonnage fixe la fréquence maximale utilisable (théorème de Shannon : $f_c < f_s/2$, généralement 2.56 dans les analyseurs pour tenir compte des capacités

réelles des filtres), la longueur de l'observation temporelle (NT_e) et donc la résolution en fréquence ($\frac{1}{NT_e}$).

7.2.2 Analyse du contenu d'un spectre

Une fois les spectres d'un signal vibratoire ou acoustique obtenus, le plus dur reste à faire : l'interprétation. Les phénomènes à l'origine du grand nombre de raies spectrales observées sont complexes et parfois confondus. La démarche la plus naturelle pour suivre le comportement vibratoire d'une machine consiste à isoler dans un premier temps les signatures des phénomènes mécaniques liés à la machine. Il devient alors possible de les éliminer pour rechercher la signification physique des pics subsistants ou encore d'étudier leurs évolutions (typique du suivi de l'usure).

7.2.2.1 Applications Acoustiques : choix des bandes fréquentielles d'analyses et calculs de DSP

[NAGATOMI et al_1995] restituent une campagne de coupe orthogonale très intéressante menée sur des échantillons de Cyprès japonais préparés suivant différents angles d'inclinaison du fil du bois (0-175°). Le porte-outil est équipé d'un accéléromètre⁹. Les sons sont enregistrés à l'aide d'un microphone (20 Hz-100 kHz identique à celui de l'étude précédemment évoquée) et les copeaux produits (0.05 à 0.3 mm d'épaisseur) sont classés suivant six catégories. Le SPL est calculé pour chaque épaisseur (répétée 20 fois) en fonction de l'angle d'inclinaison du fil de l'échantillon sur 5 bandes fréquentielles : 0-20 kHz, 20-40 kHz, 40-60 kHz, 60-80 kHz et 80-100 kHz. Parallèlement, les spectres de densité de puissance sonore sont également présentés.

Les auteurs dénotent une correspondance étroite entre les SPL des signaux ultrasonores (>20 kHz mais particulièrement pour la bande 80-100 kHz) et les phénomènes mécaniques à l'origine de la formation du copeau (fendage, cisaillement, compression). Les observations du niveau des E.A. dans [MURASE et HARADA_1995], où la configuration expérimentale est proche, confirment pleinement et sans surprise ces conclusions, étant donné la proximité des domaines fréquentiels des deux études. Concernant le domaine de l'audible, les auteurs remarquent une plus grande sensibilité du SPL à la nature du régime de coupe. Plus la coupe sera continue et plus le SPL sera faible.

⁹ Les références du capteur ne sont plus disponibles sur le site du fabricant mais on peut supposer qu'il avait été judicieusement choisi. Seul le domaine de l'audible est traité par l'auteur.

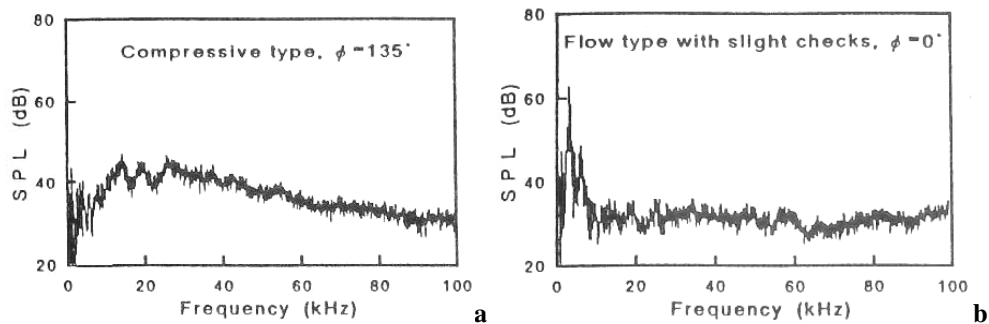


Figure 38 : Spectres de puissance des signaux sonores pour deux copeaux caractéristiques (**a** continue, **b** fissuré)

Les spectres de densité de puissance sonore (cf. Figure 38) présentent tous plusieurs pics marqués dans les basses fréquences pour des régimes de coupe discontinus, ce qui témoigne de l'excitation mécanique du système (confirmée par la correspondance du SPL et du niveau d'accélération en dB dont il ne précise pas la référence). Dans notre contexte, l'objectif principal reste la formation d'un placage le plus continu possible. En général, le mécanisme dominant reste le cisaillement et c'est probablement pour cette raison que les auteurs ne peuvent exploiter pleinement le domaine des hautes fréquences dans [NAGTOMI et al_1999], présenté en III.6.1.1.1. Ces résultats confirment bien l'intérêt d'utiliser le domaine de l'audible pour analyser l'état de la coupe puisque l'échelle des défauts à observer, compte tenu des vitesses de coupe, se situe plutôt dans le domaine des basses fréquences.

En ce qui concerne l'usinage des métaux et en particulier le tournage, la plus grande partie des travaux utilisant un microphone comme source d'information ont été consacrés au suivi de l'usure de l'outil ou à la détection de « vibrations » (phénomène de broutement).

D'une manière générale, les analyses spectrales révèlent des bandes de fréquences d'amplitudes croissantes (plus ou moins étendues) à mesure que l'usure progresse comme [WELLER et al _1969], [SADAT et SHIVAKUMAR_1987], [KOPAC et SALI_2001], [LU et KANNATEY-ASIBU_2004]. [DELIO et al_1992] concluent même que le microphone est, à bien des égards, le capteur le plus pertinent pour suivre et agir sur les vibrations en tournage.

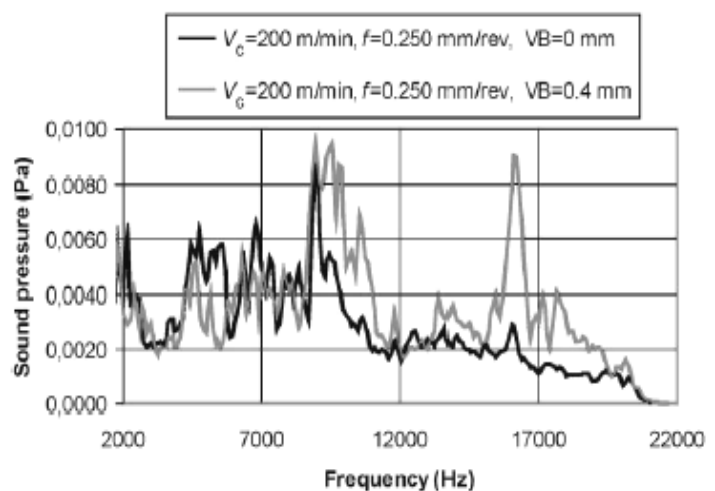


Figure 39 : Influence de l'usure sur le spectre sonore d'après [KOPAC_2001] (VB : usure en dépouille)

Elles se caractérisent par l'émergence de nouvelles raies sur le spectre aux fréquences associées. Ils élargissent la réflexion au contexte industriel en proposant des techniques pour limiter la sensibilité du capteur à l'environnement (utilisation de matériaux absorbants ou mesure de l'intensité acoustique notoirement directionnelle). Par contre, l'influence de

certaines paramètres de coupe comme la vitesse, mais surtout l'avance, décalent ces bandes de fréquence rendant plus délicate leur détection automatique [KOPAC et SALI_2001]. La liaison outil – pièce est encore mal définie d'un point de vue mécanique pour plusieurs raisons et notamment puisqu'on ne dispose pas de loi de comportement du matériau dans ces conditions. Il ne semble pas indispensable d'entreprendre la caractérisation complète d'une machine qui est longue et délicate si on ne peut décrire complètement les interactions dans la zone de sollicitation.

7.2.2.2 Applications Vibratoires

[XI et DAI_1997] proposent une des rares études consacrées au déroulage. La première partie répertorie les variables pertinentes du procédé en vue de développer un système de contrôle en ligne (similaire à la synthèse de MARCHAL en II.4.4). La seconde partie synthétise les résultats de quelques essais sur une machine de type industriel. Trois accéléromètres ont été positionnés entre les pattes de fixation de la lame perpendiculairement à celle-ci : un au milieu, le second près des broches et le dernier entre les deux. Les auteurs font l'hypothèse « *d'un couteau symétrique* ». La fréquence du pic principal de chaque capteur obtenu après une FFT (dont il ne précise pas les paramètres) est comparée pour différentes configurations (essences, angle d'attaque, diamètre du billon et nodosité). Si les fréquences des pics principaux de chaque capteur sont peu sensibles aux variations des paramètres de coupe, en revanche, elles ne sont pas les mêmes d'un capteur à l'autre. Quant à leurs amplitudes, elles sont nettement plus marquées pour l'accéléromètre situé au milieu du couteau que pour les deux autres ce qui n'est pas surprenant étant donné la géométrie du procédé. Les auteurs en concluent que chaque partie de couteau comprise entre deux pattes de fixation doit être analysée de manière isolée puisque les interactions locales du système de fixation ont une grande influence sur le comportement vibratoire de l'outil. Ils n'ont malheureusement pas validé totalement cette conclusion avec un autre moyen de mesure adapté comme une analyse modale expérimentale ou au moins un « sonnage » (cf IV.2.3.2). Néanmoins, le raisonnement est logique et ces résultats préliminaires nous incitent à la prudence quant à l'utilisation d'un seul capteur pour un couteau de taille standard. Il serait probablement judicieux de s'affranchir de ce problème en étudiant, en première approche, un seul élément de couteau.

[LIM_1995] constitue une des premières études visant à suivre l'usure en tournage des métaux. Un accéléromètre est fixé sur le porte-outil, dans la direction de la vitesse d'avance pour une opération de chariotage (l'outil se déplace parallèlement à l'axe de la broche). L'évolution de l'amplitude du pic le plus significatif de la FFT du signal est représentée sur la Figure 40.

Ce pic correspond au principal mode propre du porte-outil. Le passage de la seconde “bosse” caractérise le moment où l’usure en dépouille s’accélère et devient critique. L’auteur suggère alors la définition d’un seuil limite afin d’avertir l’opérateur que la plaquette doit être changée rapidement.

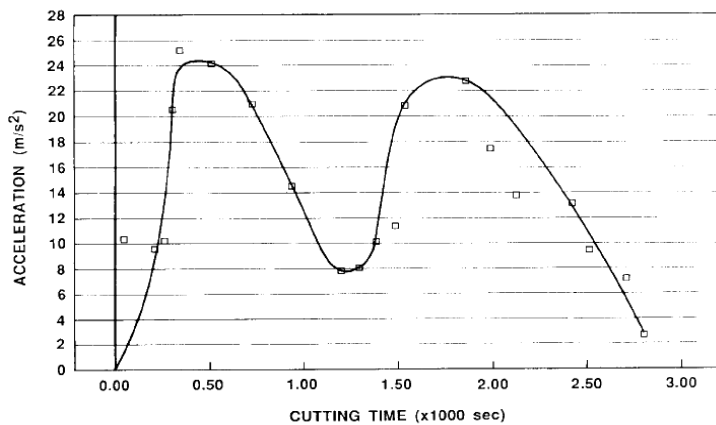


Figure 40 : Accélération en fonction du temps d’usinage en tournage des métaux d’après [LIM_1995]

Par contre, il ne propose pas de règle concrète. Et pour cause, l’amplitude vibratoire peut être très sensible aux conditions de coupe. Une règle de décision reposant sur l’allure de cette courbe aurait certainement été plus polyvalente.

Ces résultats sont contredits par ceux présentés par [CHIOU et al_1999] (cf. III.6.2.1). Il serait judicieux de clarifier la situation dans le cas du déroulage.

[EL-WARDANY et al_1996], précédemment cités, vont plus loin en tentant d’associer des signatures temporelles et fréquentielles aux principaux types d’usures répertoriées des forets. L’analyse des spectres (DSP) conduit les auteurs à se focaliser sur les bandes fréquentielles contenant les principales fréquences de résonance de la broche et de l’ensemble montage/pièce. La nature, mais aussi le degré d’avancement de l’usure, influencent l’amplitude et la fréquence des pics relevés si bien qu’il est délicat d’utiliser ces résultats aussi simplement que précédemment. Cette démarche classique, déjà évoquée pour l’analyse des signaux sonores, est utilisée par la plupart des auteurs. [DIMLA et LISTER_2000] l’appliquent à des signaux vibratoires mais aussi dynamométriques en tournage. [LEMASTER et al (b)_2000] s’en servent en défonçage de bois après un filtrage de la zone fréquentielle la plus réactive.

Afin d’améliorer la lisibilité des spectres, les auteurs sont amenés à les moyenner sur des périodes plus ou moins longues (un ou plusieurs trous en perçage, une révolution ou une passe complète en tournage,...) mais le principe reste le même. Enfin, concernant la détection de défauts ou l’apparition de vibrations dans la coupe, comme dans l’étude des sons, elle s’effectue en général par le suivi de l’émergence de pics sur le spectre aux fréquences associées (très utilisé pour l’étude des roulements [TANDON et CHOUDHURY_1999]).

L’analyse de l’évolution des spectres en fonction de l’usure, du nombre de passes n’est en fait qu’une manière discrète d’aborder une analyse temps-fréquence. Nous reviendrons sur ce concept, ses atouts et ses limites par la suite.

7.2.3 Outils et propriétés supplémentaires

Le passage dans le domaine fréquentiel apporte aussi plusieurs outils mathématiques qui, suivant les conditions, peuvent guider l'interprétation des phénomènes observés.

7.2.3.1 Analyse en bandes fines

Comme nous l'avons brièvement évoqué, fenêtre d'observation temporelle et résolution fréquentielle sont liées. Dans certaines applications, en particulier en maintenance pour le suivi de l'état des roulements [TEBEC_1987], la proximité des signatures vibratoires des phénomènes observés requiert une grande précision en fréquence, ce qui impose un long temps d'observation avec une analyse classique. La transformée de Fourier en bande étroite connue sous le nom de « zoom » tente de résoudre ce problème en concentrant les moyens de calcul sur une petite fenêtre. Le signal est multiplié par une exponentielle complexe de fréquence f_0 , ce qui revient à translater le spectre du signal autour de cette fréquence. Le signal est alors filtré autour de cette bande, ré-échantillonné (pas=largueur de la bande/résolution en fréquence) et enfin compilé dans l'algorithme de FFT. Il ne reste plus alors qu'à interpréter ce spectre comme dans le paragraphe précédent.

Nous n'avons pas trouvé d'exemple d'utilisation de cet outil au cas de l'usinage mais il n'en reste pas moins utile pour des sollicitations fréquentielles délicates à discriminer.

7.2.3.2 Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe ou démodulation d'amplitude est une technique d'analyse du signal qui permet d'étudier la forme d'un signal modulé i.e. sa composante modulante. De façon pratique, le spectre récolté constitue le résultat de la FFT de l'enveloppe du signal. Cette technique est très utilisée en maintenance pour la détection de défauts de type chocs, souvent au niveau d'un roulement [TANDON et CHOUDHURY_1999]. Une fois de plus, cet outil semble ne pas avoir été employé en usinage.

7.2.3.3 Notion de corrélation

Concrètement, la fonction de corrélation permet de traduire la ressemblance de deux fonctions dans un domaine. On parle d'autocorrélation lorsqu'on compare une fonction à elle-même décalée de τ dans le temps pour notre application.

$$C_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau)dt$$

Équation 16 : Fonction d'autocorrélation de x

Le théorème de Weiner-Kinchine permet de montrer que la densité spectrale d'un signal $x(t)$ est égale à la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation $C_{xx}(\tau)$ usuellement notée

$S_{xx}(f)$ (f parcourant le domaine des fréquences). On dispose donc de deux méthodes pour estimer cette densité spectrale : le corrélogramme (transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation) et le périodogramme (transformée de Fourier directe du signal).

En suivant le même raisonnement, on définit les interspectres de deux fonctions du temps à partir de la transformée de Fourier de leurs fonctions d'intercorrélations notées $S_{xy}(f)$ et $S_{yx}(f)$. Ces quelques notions sont fondamentales en analyse spectrale puisqu'elles permettent d'introduire celles de fonction de transfert et de cohérence.

La fonction de transfert d'un système linéaire invariant, schématisé Figure 41, est assimilable à un opérateur permettant de décrire la variable de sortie $y(t)$ si l'on connaît celle d'entrée $x(t)$.

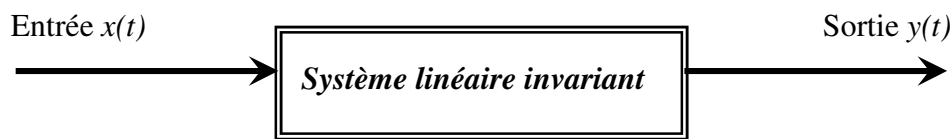


Figure 41 : Entrée, Sortie d'un Système linéaire invariant

Elle est parfois définie comme le rapport des transformées de Fourier de la sortie et de l'entrée.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = \frac{S_{yx}(f)}{S_{xx}(f)}$$

Équation 17 : Fonction de transfert

$H(f)$ est aussi le résultat de la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle $h(t)$. De ce fait, un système linéaire invariant peut être caractérisé indépendamment avec sa fonction de transfert ou sa réponse impulsionnelle. Ce résultat a des applications pratiques majeures notamment la possibilité d'utiliser un marteau instrumenté (choc assimilé à une impulsion) pour caractériser la réponse en fréquence d'un système mécanique supposé linéaire invariant. La fonction de cohérence de deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ permet de quantifier dans quelle partie de la bande spectrale les phénomènes que représentent ces fonctions échangent de l'information. Elle est définie par :

$$\Gamma_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}$$

Équation 18 : Cohérence de deux signaux aléatoires $x(t)$ et $y(t)$

Elle est comprise entre 0 et 1. Dans la pratique, la justesse de la détermination d'une fonction de transfert n'est assurée que lorsque la cohérence des signaux d'entrée et de sortie est proche de la valeur 1. Certains travaux, notamment [DONG et al_1992] et [LI et al_1997], ont utilisé ce résultat de manière quelque peu différente. [LI et al_1997] proposent un suivi de l'usure de l'outil et des vibrations en tournage de superalliages à partir de la mesure de la cohérence des

spectres des signaux vibratoires de deux accéléromètres fixés perpendiculairement sur le porte-outil (suivant les directions d'avance et de coupe).

Ils obtiennent une cohérence proche de 1 pour la fréquence d'ondulation de la pièce fabriquée. Elle augmente aussi singulièrement avec l'usure pour les premières fréquences de résonances de l'ensemble. La valeur obtenue étant normée, la mise au point de critères de décision objectifs est grandement simplifiée. Quelles que soient les conditions expérimentales, on s'attend à mesurer la même chose sur les deux capteurs. La polyvalence de cette approche est sans doute son plus grand atout.

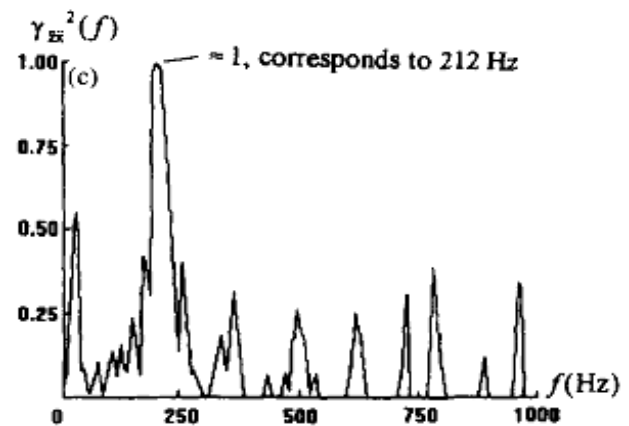


Figure 42 : Cohérence des spectres des signaux vibratoires en tournage d'après [LI et al_1997]

7.2.3.4 Analyse cepstrale

Le Cepstre d'un signal est défini comme le spectre du logarithme de son spectre. La variable courante du spectre d'un signal temporel est la fréquence tandis que celle du cepstre est un temps, la quéfrencce. En limitant le nombre de raies par rapport au spectre, il permet de synthétiser l'analyse en particulier lorsqu'il s'agit de détecter des périodicités dans le spectre (harmoniques et bandes latérales). [EL-WARDANY et al_1996] dont nous avons déjà fait mention, présentent une application du calcul cepstral au suivi de l'outil en perçage. Le ratio des cepstres des signaux vibratoires dans les directions d'avance et transverse est calculé lorsque les valeurs de RAMV définie précédemment excèdent 5. Il présente un pic pour une quéfrencce correspondant à une rotation de l'outil lorsque celui-ci est usé ou endommagé.

Les différents outils d'analyse fréquentielle répertoriés ne permettent pas de décrire convenablement des phénomènes transitoires. Seule l'introduction d'une troisième dimension intégrant l'évolution temporelle des phénomènes observés pallie à ce manque.

8 Approches temps-fréquence

L'approche la plus naturelle consiste à observer l'évolution des spectres dans le temps : c'est l'analyse en « chute d'eau » (waterfall) ou spectrogrammes. Les spectres sont calculés sur une fenêtre temporelle fixée dont la largeur définit le pas de calcul. Le signal de base est ainsi décomposé en une famille de signaux relativement brefs ; on parle de Transformée de Fourier à Court Terme. Ils sont ensuite « empilés » les uns derrière les autres selon un troisième axe, celui des temps. On perçoit une limite importante de la dualité temps-fréquence. En effet, il

n'est pas possible d'optimiser à la fois résolution fréquentielle et résolution temporelle puisque l'une est l'inverse de l'autre.

Dans la pratique, il existe plusieurs représentations de l'axe des temps (niveau de l'usure comme [DIMLA et LISTER_2000] en tournage, nombre de trous en perçage pour [ELWARDANY et al_1996], nombre de passes en défonçage dans [LEMASTER et al (b)_2000]) ou de celui des amplitudes (« vrai » 3D ou dégradé de couleurs dans un plan dans [DILMA et LISTER_2000]) mais le principe est identique (cf. Figure 43).

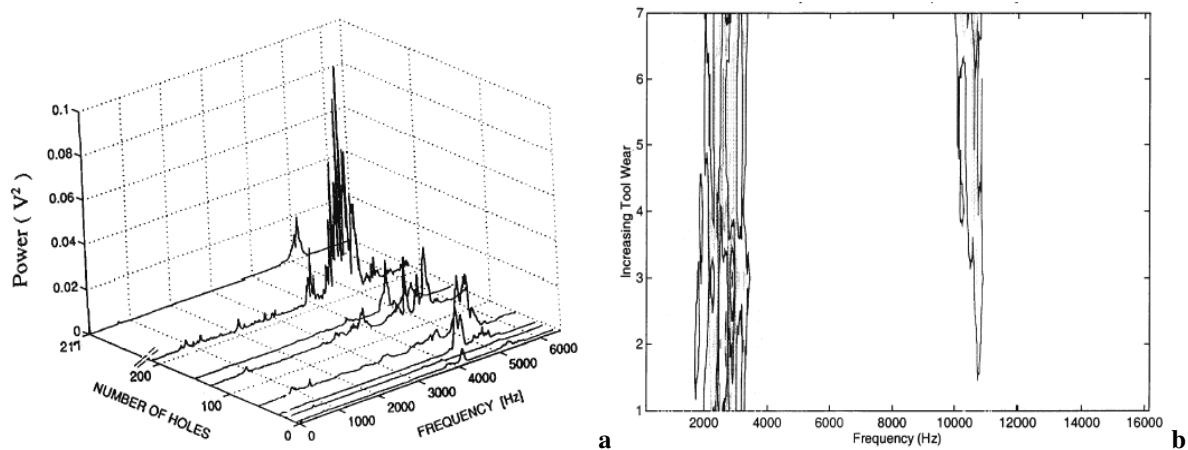


Figure 43 : a, waterfall des vibrations tangentielles en perçage d'après [EL-WAERDANY et al_1996], b, contour de la composante tangentielle de l'effort de coupe en tournage d'après [DILMA et LISTER_2000]

Pour ces auteurs, l'apparition ou l'augmentation du niveau d'une bande fréquentielle est caractéristique de l'usure de l'outil. Ces représentations facilitent la sélection d'une zone fréquentielle riche d'informations.

[LEMASTER et al (b)_2000] débutent par une analyse en chute d'eau afin de cibler les bandes fréquentielles les plus sensibles à l'usure en défonçage. L'évolution de l'aire sous la courbe de DSP en fonction du nombre de passes ressemble alors étrangement à la courbe obtenue en tournage par LIM dans [LIM_1995]. L'acuité des deux « bosses » est même améliorée (cf. Figure 44 et Figure 40) en considérant le rapport de l'aire sous la courbe de DSP de deux zones fréquentielles sensibles à l'usure : 4-7 kHz et 1-4 kHz.

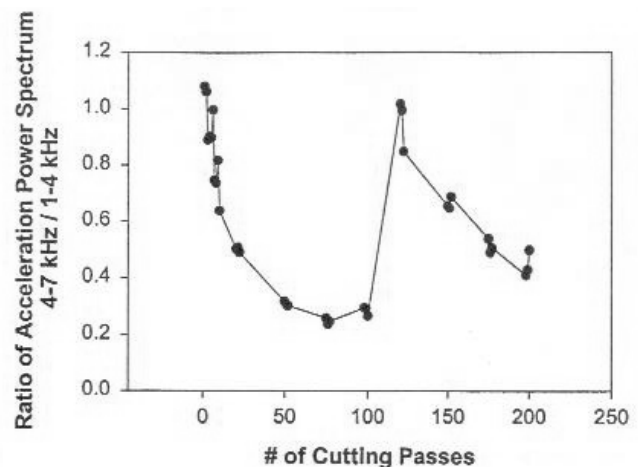


Figure 44 : Ratio de l'aire sous les courbes de DSP de deux bandes de fréquence en fonction du nombre de passes en défonçage d'après [LEMASTER et al (b)_2000]

Les chances sont donc grandes de pouvoir visualiser l'évolution des transitoires du déroulage avec cette technique.

Nous ne pouvions terminer ce chapitre sans évoquer de « récents » développements en particulier l'utilisation de la distribution de WIGNER-VILLE (appartenant à la classe de COHEN) et l'analyse en ondelettes. Elles ont suscité un engouement réel ces 15 dernières années de part leurs atouts respectifs dans le suivi des phénomènes transitoires.

Le grand avantage de la distribution de WIGNER-VILLE réside dans sa capacité à localiser parfaitement dans le plan temps-fréquence les modulations linéaires en fréquence. Malheureusement, elle introduit aussi des interférences qui peuvent rendre difficile l'interprétation des représentations obtenues.

La transformation en ondelettes repose sur la décomposition du signal non pas sur une famille de fonctions sinusoïdales mais sur une autre base appelée ondelettes. Elle permet de moduler les résolutions en temps et en fréquence de l'analyse afin de l'adapter aux phénomènes recherchés puisque ces fonctions sont à loisir compressibles ou extensibles.

Nous avons pris le parti, en toute connaissance de cause, de nous limiter à l'étude de spectrogramme. Ce choix est certainement discutable tant les avantages de ces nouvelles techniques sont réels et semblent seoir au cas du déroulage. Le temps imparti étant limité, nous laissons le soin aux études futures d'aborder ces questions. Néanmoins, pour des phénomènes transitoires relativement lents, le waterfall offre une résolution suffisante comme le prouve l'étude comparative de ces trois méthodes dans le suivi du freinage d'un TGV à l'aide de mesures sonores et vibratoires proposée dans [CHARLEY et al_2001].

9 Synthèse

Cette synthèse bibliographique un peu longue n'est pourtant pas complètement exhaustive, en particulier concernant les derniers développements de l'analyse temps-fréquence. Elle nous a néanmoins permis d'identifier un certain nombre de transitoires inhérents au déroulage. Ils sont presque toujours accompagnés de variations de l'épaisseur du placage. Pour les reproduire en laboratoire, les paramètres essentiels sont :

- l'épaisseur du placage pour son rôle sur la fissuration et les efforts de coupe,
- la valeur de l'angle de dépouille, dont une variation même mineure peut conduire à modifier le régime de coupe,
- la vitesse de coupe qui peut accentuer ou atténuer l'apparition de régimes de refus de coupe en fonction du domaine choisi et de la densité du bois,
- le taux de pression de la barre de pression qui déplace le plan de coupe mais limite la fissuration,
- l'usure de l'outil qui étend la surface de contact entre l'outil et le bois, augmente les efforts et favorise le refus de coupe.

Le choix des valeurs de ces paramètres permet de générer les situations caractéristiques « aux oreilles » des opérateurs. L'expérience de dérouleurs chevrons nous sera indispensable sur ce point qui conditionnera en grande partie les modalités expérimentales.

A cela se rajoutent les spécificités du bois et en premier lieu sa densité. Etant donné la complexité intrinsèque liée à la compréhension et à la description des phénomènes, l'usage d'essences hétérogènes qui brassent toutes les difficultés simultanément semble prématuré pour cette première analyse. Nous avons tout intérêt à séparer au maximum les contributions des divers facteurs afin de faciliter la détection de leurs signatures vibratoires. Compte tenu des diverses remarques établies au cours de ce chapitre, l'étude de la coupe d'un disque apparaît comme la voie la plus sage. Nous verrons plus en détail les avantages et les contraintes inhérentes à ce choix.

Pour suivre ces transitoires d'un point de vue acoustique et vibratoire, nous devons aussi disposer de références. Les mesures des efforts et de la qualité du placage produit se sont imposées comme des éléments indispensables au fil de l'analyse.

Le suivi des efforts sur les deux faces de l'outil est riche d'enseignements sur les phénomènes en cours pendant la coupe. Toutefois, nous aurons sans doute intérêt à ne pas délaisser le repère XY initial puisqu'il se rapproche plus du cadre naturel des directions de propagation des vibrations du couteau, sans oublier qu'il fournit un accès immédiat au régime de coupe.

La caractérisation de la fissuration et des variations d'épaisseur fournit des indicateurs clefs mais n'en est pas moins délicate à mettre en œuvre en grande partie parce que le placage est saturé d'eau. Ces phénomènes sont bien connus des dérouleurs mais les méthodes objectives de mesure, en particulier sur de grandes longueurs, ne sont toujours pas disponibles. Cela explique aussi pourquoi les relations entre profondeur et fréquence des fissures et les influences respectives de la vitesse de coupe et de la valeur de l'angle de dépouille sur ces paramètres ne sont que partiellement établies encore aujourd'hui.

En revanche, l'intérêt de la mesure de l'état de surface est plus limité puisqu'elle est essentiellement liée à la structure locale du bois. Seule la détermination de la présence d'arrachements locaux témoignant d'un effet Horner ou d'une forte instabilité de l'outil semble pertinente.

Disposant de ces données d'entrée essentielles, il sera temps d'analyser les signaux acoustiques et vibratoires. Pour ce faire, un certain nombre d'outils mathématiques ont été abordés et critiqués dans la partie III. Ils présentent tous un potentiel intéressant dans leurs domaines d'applications respectifs. Bien peu d'entre eux ont été appliqués au cas du déroulage. Le champ d'investigation est donc vaste. Il ne s'agira pas d'appliquer toutes les techniques décrites de manière systématique mais bien de les sélectionner afin d'extraire l'information pertinente des signaux acoustiques et vibratoires enregistrés. Ainsi, le domaine temporel permet le traitement de toute l'information contenue dans le signal, bruit de fond

compris. Suivant les indicateurs choisis, un niveau global de l'énergie dissipée ou un suivi des phénomènes non stationnaires sera possible dans une bande fréquentielle plus ou moins étendue. Cette première étape, indispensable à nos yeux afin de comprendre les grandes tendances du comportement vibratoire d'une dérouleuse en fonction des conditions de coupe, n'a pas encore été abordée de manière globale. En particulier, les relations qui lient efforts et vibrations lors d'un déroulage, pourtant potentiellement très riches en informations, ne sont pas clairement établies. Rappelons par exemple que le suivi de l'usure, paramètre le plus étudié, a conduit à des résultats divergents entre le défonceage et le déroulage et contradictoires dans le tournage des métaux.

Le domaine temporel offre aussi des possibilités d'analyses très fines des phénomènes qui restent inaccessibles à la plupart des outils de traitement spectraux. Une observation locale des signaux peut fournir de riches informations sur les phénomènes non stationnaires comme les observations de NAGATOMI sur la fissuration le suggèrent.

Les spectres en fréquence donnent un accès immédiat aux signatures de phénomènes plus ou moins périodiques comme le broutement de l'outil en tournage. Il s'agit typiquement d'un outil de calcul compatible avec le temps réel. L'emploi d'un enregistrement de référence typique des « bonnes conditions de coupe » peut également s'avérer très efficace pour accroître ses performances. De plus, certains outils fournissent un résultat quasiment immédiat comme la fonction de cohérence par exemple.

L'évolution des spectres dans le temps étend le champ de l'analyse aux phénomènes transitoires et au suivi de l'usure mais avec les restrictions inhérentes aux résolutions de l'observation. Pour faciliter ce travail assez exploratoire, une caractérisation mécanique, même partielle de la machine utilisée, est utile.

Mais, avant toute chose, ils nous faut choisir définitivement les bancs de mesures (dérouleuse, système d'acquisition, capteurs compatibles avec le domaine de l'audible, moyens de contrôle de qualité du placage) et les niveaux des facteurs expérimentaux les mieux à même de répondre aux exigences recensées.

PARTIE IV : Dispositifs et Protocoles Expérimentaux

La capacité des opérateurs à percevoir une anomalie du processus de fabrication du placage a été le point de départ de cette étude. Seuls des dérouleurs expérimentés sont à même de décrire les phénomènes précis qu'ils recherchent en écoutant fonctionner leur machine. Nous avons donc enquêté auprès d'eux afin de cibler nos investigations.

1 Enquête auprès des opérateurs

Cinq entreprises ont été sollicitées pour leurs caractéristiques respectives. Elles ont toutes répondu en partenaire, permettant des échanges constructifs avec dix opérateurs sur dérouleuse au total. Cet échantillonnage, certes restreint, est néanmoins assez représentatif de la production française. *LACROIX* et *LES PLACAGES DU CHÂTILLONNAIS* sont spécialisées dans la fabrication de placage de peuplier. La première fournit la matière première des emballages type « boîte à camembert », la seconde produit des feuilles de plus grandes dimensions destinées à la fabrication de contreplaqués. *BRUGÈRE* et *BDA* (Les Bois Déroulés de l'Auxois) déroulent essentiellement du hêtre employé dans la confection de mobilier scolaire. Enfin, *LA BOISSEROLE* est une petite société de fabrication de placage polyvalente pour le panneau décoratif aussi bien en terme de moyens (tranchage et déroulage) que de type de produits. Elle traite une grande variété d'essences tropicales dont la plus fréquente est l'okoumé.

Suivant les types de production et l'expérience du dérouleur, les sensibilités sont différentes. Avec le recul, nous pouvons cependant dégager des constantes fortes. D'une manière générale, un son anormalement sourd, qualifié de « gras » par les 10 opérateurs, et plus ou moins périodique témoigne d'un problème. Ils auscultent alors le placage pour identifier le défaut généré tout en écoutant attentivement ce son inhabituel ainsi que celui émanant du moteur de broche. Cette tâche est si naturelle pour la plupart d'entre eux que son explicitation a parfois été laborieuse. Le tableau suivant constitue la synthèse la plus objective possible des défauts qu'ils sont capables de détecter à l'oreille, visuellement ou par le toucher¹⁰. Ils se servent de tout leur environnement pour caractériser l'état du processus comme par exemple de la forme du filet d'eau expulsé du billon qui se trouve au dessus de la barre de pression. Les cinq défauts identifiés auditivement par les opérateurs vont constituer le point de départ de notre

¹⁰ Ces deux approches nécessitent l'interruption du processus ainsi que l'étude des deux faces du placage pour bon nombre de défauts. Leur performance est donc toute relative dans une démarche de contrôle en ligne.

campagne expérimentale. Pour les éliminer, les opérateurs vont modifier certains paramètres du process. Pour les reproduire en laboratoire, il nous suffira d'appliquer la démarche inverse.

	auditif		visuel		tactile	
	possible	difficile ou non praticable	possible	difficile ou non praticable	possible	difficile ou non praticable
placage ouvert (fissurés)	X		X		X	
placage rugueux	X		X		X	
placage pelucheux		X	X		X	
fil arraché (typique des essences guyanaises)		X	X		X	
irrégularités d'épaisseur dans le sens du fil du billon	X		X		X	
irrégularités d'épaisseur dans le sens de déroulement du billon	X		X		X	
placage ondulé	X		X		X	
placages rainurés (outils ébréchés ou fibres coincées entre les outils)		X	X		X	

Tableau 3 : Types de défauts détectables par les opérateurs en fonction des moyens employés

Le tableau suivant résume les actions entreprises par la majorité des opérateurs face aux défauts identifiés préalablement.

(+ augmentation ; - diminution du paramètre considéré)

		BRUGÈRE	BDA	LA BOISSEROLE	LACROIX	LES PLACAGES DU CHÂTILLON
placage fissuré	<i>pression (barre)</i>	+	+	+	+	+
	<i>pression (barre)</i>	-	-	-		
placage rugueux	<i>étuvage</i>	+	+	+		
	<i>acuité d'arête²</i>	+	+	+		
	<i>dépouille</i>			-		
irrégularités d'épaisseur dans le sens du fil du billon¹	<i>pression de la barre anti-flambement</i>	selon opérateur		+		+
irrégularités d'épaisseur dans le sens de déroulement du ruban	<i>dépouille</i>	+	+	+	+	+
	<i>pression (barre)</i>	-	-	-	-	-
	<i>vitesse</i>	-	-	-	-	-
placage ondulé	<i>dépouille</i>	-	-	-	-	-
	<i>vitesse</i>	-	-	-	-	-
	<i>acuité d'arête²</i>	-	-	-	-	-

Tableau 4 : Réponse des dérouleurs aux défauts audibles du placage

¹ Pour la plupart, ils vérifient le bon alignement du couteau et de la barre en premier lieu.

² + pierrage ou affûtage ; - rodage

S'il existe bien une cohérence dans la manière de régler les problèmes, les différences surviennent plutôt dans la mesure des réglages à modifier. Certains opérateurs privilégient les changements progressifs à chaque billon en début de cycle tandis que d'autres soigneront les premiers réglages (prise en compte de la dilatation du couteau au contact de billons étuvés par exemple) pour ne presque plus les modifier et ce au sein de la même société et pour le même type de production.

Concernant l'usure, les opérateurs diminuent en général la côte v (jamais plus de quelques dixièmes de mm), afin de compenser le recul de l'arête et ils augmentent légèrement la valeur de l'angle de dépouille (rarement plus de 1°). Pour le déroulage du peuplier, ils sont amenés à reformer le « fil » de la lame régulièrement à l'aide d'une pierre afin de limiter l'apparition de surfaces pelucheuses. C'est aussi une des raisons pour lesquelles ils déroulent à grande vitesse (5 m/s pour plus de moitié des billons). Les explications de THIBAUT et MOTHE (effet Horner II.2.3) justifient cette démarche.

Cette première analyse complète les observations de la littérature, pour nous guider dans le choix des paramètres expérimentaux pertinents.

2 Mise en place d'un banc d'essai¹¹

2.1 La microdérouleuse

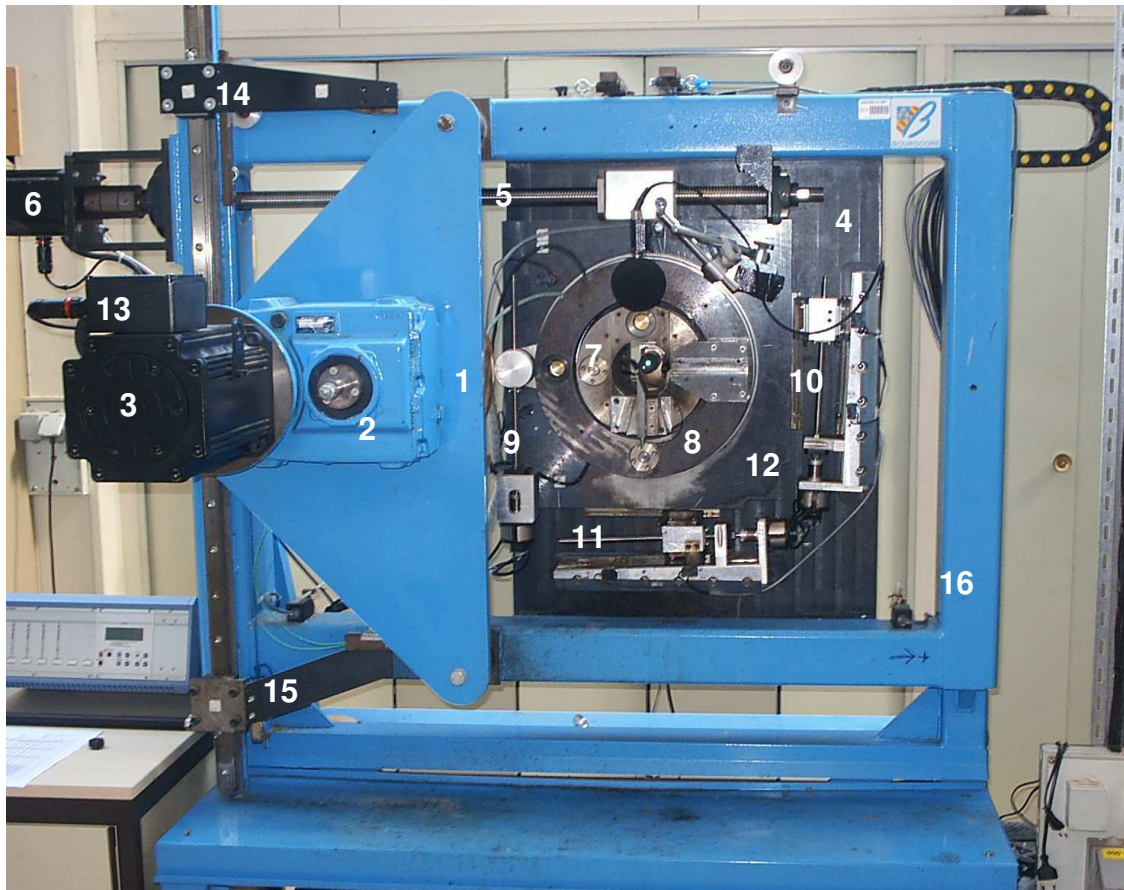
La partie mécanique de la microdérouleuse expérimentale (cf. Figure 45) a été conçue par BUTAUD dans le but de reproduire le plus fidèlement possible le procédé industriel de déroulage à échelle réduite [BUTAUD_1994]. Il s'est inspiré d'une première microdérouleuse mise au point au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de l'Université de Montpellier II par THIBAUT ([THIBAUT_1988]).

2.1.1 Rapide descriptif

La partie commande a tout d'abord été pilotée par un programme de contrôle et d'acquisition développé sous LabView par DECES-PETIT dans [DECES-PETIT_1996]. L'avarie majeure subie par la carte d'axe, pièce centrale du dispositif de pilotage, a entraîné un changement radical puisque l'acquisition et le contrôle ont été dissociés. Un automate programmable est à ce jour chargé de commander le fonctionnement de tous les axes de la machine tandis que la partie acquisition est plus ou moins hors service. Une première version du programme de pilotage contraignante et parfois instable a été proposée par [EL JAZOULI_2003]. Parmi les nombreuses difficultés introduites par cette nouvelle configuration, la plus dommageable dans notre démarche est, sans conteste, l'impossibilité d'accéder aux données issues du codeur du

¹¹ Les caractéristiques de tous les capteurs mentionnés sont disponibles sur les sites Internet des fabricants. Seuls les éléments essentiels à la définition des précisions de la mesure seront mentionnés.

moteur de broche. Sans la connaissance d'une loi de vitesse ou de la position réelle du chariot en chaque instant, la reconstitution d'un usinage peut être beaucoup plus délicate comme nous le verrons par la suite. Un remaniement de fond, opéré en 2006 par les techniciens du laboratoire d'électronique de l'ENSAM de CLUNY, a permis de régler une grande partie des problèmes qui ont compliqué ou floué certaines de nos mesures. Néanmoins, à ce jour, on ne dispose toujours pas de la loi de vitesse de la machine.



- | | |
|--|---|
| 1 : Disque de bois (derrière la plaque) | 9 : Ensemble de réglage de l'angle e (entrée) |
| 2 : Réducteur | 10 : Ensemble de réglage de la cote h (horizontale) |
| 3 : Moteur de broche | 11 : Ensemble de réglage de la cote v (verticale) |
| 4 : Chariot mobile | 12 : Plaque support |
| 5 : Vis sans fin (entraînement du chariot) | 13 : Variateur de fréquence |
| 6 : Moteur d'entraînement du chariot | 14 : Bras support de capteur de sur-épaisseur |
| 7 : Couronne dynamométrique support d'outil | 15 : Bras support du patin de frottement |
| 8 : Couronne dynamométrique support de barre | 16 : Bâti |

Figure 45 : Partie mécanique de la microdériveuse

Les disques (1), de 5 à 30 mm de largeur, sont montés sur un cône d'emmanchement placé dans le réducteur (2) (rapport de réduction fixé à 5.49) associé au moteur Brushless d'entraînement (3) développant un couple permanent de 44 m.N, un couple impulsif de 84 m.N et une vitesse maximale en service de 2000 Tr/min. L'avance du chariot (4), monté sur deux glissières par quatre patins à billes, est assurée par une vis (5) mue en rotation par un moteur Brushless (6) fournissant un couple permanent de 3.3 m.N. Ce moteur est piloté

suivant une commande maître-esclave par le moteur de broche, lui-même asservi à la position du chariot. Ce dernier supporte le dynamomètre associé à l'outil (7), les quatre moteurs pas à pas destinés respectivement aux réglages des angles de dépouille du couteau δ (derrière la machine) et d'entrée de la barre (9), des cotes h (10) et v (11) par rotation des couronnes ou translation des cales biaises. La plaque (12) est fixée au chariot par l'intermédiaire de quatre butées à billes autorisant la translation de l'ensemble pour les réglages des cotes de la barre. Elle supporte aussi le second dynamomètre (8) associé à la barre de pression.

Les deux ensembles dynamométriques sont construits suivant le même schéma. Chaque anneau comprend trois parties : deux couronnes serrant sous une force de 9 000 daN un ensemble constitué de deux capteurs de force piézo-électriques à trois composantes (9067 KISTLER), diamétralement opposées. La couronne supérieure supporte le porte-outil, la couronne inférieure est solidaire de la plaque de positionnement fixée au chariot. Le dynamomètre du couteau est placé à l'intérieur de celui destiné à la barre.

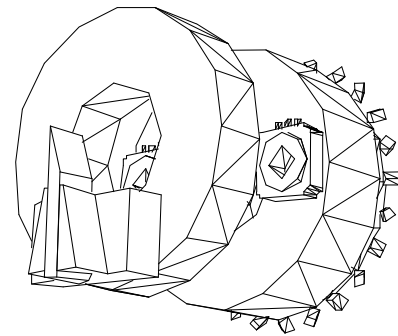


Figure 46 : Schéma de principe du dynamomètre du couteau

Cette technologie permet de ne pas excéder 2 % d'erreur linéaire ou d'hystérésis pour chaque direction de mesure même lorsque celles-ci interagissent.

La rigidité de l'ensemble est aussi conséquente. Un simple calcul à partir des rigidités données par le constructeur pour ce type de capteur fournit une déformation de 14.3 μm dans les axes X et Y du procédé pour une effort de référence de 100 N. Les signaux de sortie du couteau seront appelés FXc et FYc ; ceux de la barre FXb et FYb (cf. Figure 24 et Figure 25).

Les précisions relatives des positionnements angulaires et des translations sont estimées respectivement à 0.01° et 0.01 mm dans [DECES-PETIT_1996]. L'auteur précise qu'une initialisation est nécessaire lors de la mise sous tension de la machine puisque les codeurs employés ne permettent pas de tenir avec précision une position absolue.

2.1.2 Pourquoi cette machine ?

Elle présente plusieurs caractéristiques fort utiles à notre démarche expérimentale :

- Déroulage de disques :

L'utilisation d'un billon de faible épaisseur permet d'analyser les phénomènes liés à la coupe de manière élémentaire. On peut en effet isoler une unique perturbation contrairement au cas d'une dérouleuse de type industriel où elles interviennent toutes de manière simultanée (transitions de cernes, nœuds, bois de réaction...). Un autre avantage fondamental réside dans la possibilité d'utiliser des disques prélevés dans une même grume et donc de limiter l'impact de la variabilité naturelle interspécifique (entre les arbres). Ce point essentiel devrait

permettre de limiter la dispersion de nos résultats. Notons cependant qu'il peut exister plus de variabilité en terme de densité, de couleur ou de caractéristiques mécaniques entre deux disques issus d'un même arbre qu'entre deux disques provenant de deux arbres différents. Pour cette raison, il est préférable de choisir des disques contigus.

Un des phénomènes les plus préjudiciables du déroulage est aussi la vibration du billon survenant en fin de déroulage. Le diamètre du billon diminuant, les efforts entraînent une flexion de ce dernier qui se traduit par des variations d'épaisseur du placage. En première approche, le déroulage d'un disque permettra de s'affranchir de cette complexification supplémentaire. Enfin, rappelons que dans [XI et DAI_1997], les auteurs ont mesuré un comportement local du couteau entre chaque élément de fixation.

L'emploi d'une telle géométrie nous simplifie grandement la tâche. La seule hypothèse contraignante provient du mécanisme de formation du copeau en lui-même. Nous supposons comme [THIBAUT_1998] que nos dimensions d'observation (20 mm) restent grandes par rapport à la longueur des fibres de bois (1 à 3 mm) et que les effets de bords sont faibles en raison de la forte anisotropie du matériau.

➤ Rigidité :

Dès sa conception, les choix technologiques ont été orientés vers la rigidité d'ensemble pour permettre de tirer parti des différents actionneurs retenus. Ainsi, les organes de transmission des mouvements, ceux de liaison des éléments mobiles au support fixe, les « bâtis » sont tous largement surdimensionnés. Le choix de positionner la face de dépouille de l'outil verticalement, effectué au départ pour un souci d'encombrement, accroît encore sensiblement cette tendance puisque l'effort de coupe FX_c est directement repris par l'outil.

La rigidité de l'ensemble ne peut qu'améliorer la lisibilité des spectres obtenus comme nous l'avons déjà constaté dans [DENAUD et al_2003]. Le but de ce travail était d'étudier les sons et les vibrations uniquement générés par la coupe en déroulage simulée par un pendule de CHARDIN (cf. Figure 47), moyennant une nouvelle conception du porte-outil et du porte-échantillon. Ce dispositif permettait de produire des placages courts et proches de ceux obtenus en déroulage (préparation spécifique des éprouvettes). Malheureusement, le manque de rigidité de l'ensemble perturbait tant les signaux qu'il était très délicat d'observer autre chose que les fréquences de résonances de l'ensemble, contrairement au travail exploratoire mené sur la microdérouleuse et décrit dans [DENAUD et al_2002].

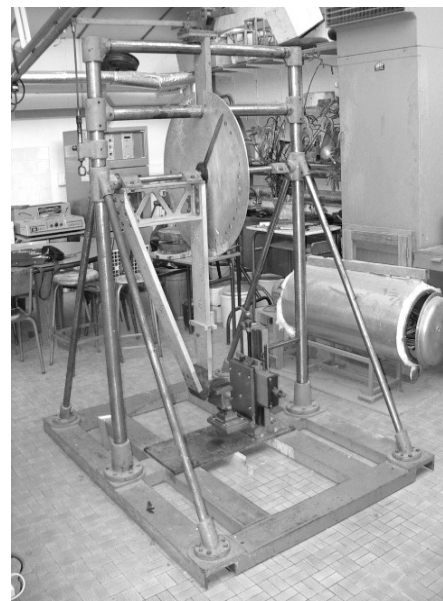


Figure 47 : Pendule de Chardin

➤ Fonctionnalité :

Elle permet d'accéder en fonctionnement, grâce à des axes numérisés (moteurs pas à pas), à tous les paramètres géométriques classiques du déroulage précédemment cités. Deux modes de fonctionnement sont aussi possibles : à vitesse de rotation constante ou à vitesse linéaire constante. Dans le second mode, les limites visées au départ, i.e. V_c variant de 0.01 à 10 m/s, ne peuvent pas être atteintes sur toute la plage de fonctionnement. La Figure 48 représente les vitesses de rotation du billon nécessaires à la production d'un placage de 3 mm d'épaisseur pour différentes vitesses de coupe linéaires à chaque tour, pour les rayons limites théoriques de la machine (250 - 20 mm).

Compte tenu des caractéristiques du moteur de broche et de celles du réducteur, la vitesse théorique limite est de 364 Tr/min. On peut considérer qu'en deçà de 2 m/s, les risques de saturation du moteur sont minimes puisque la limite inférieure du rayon accessible est 65 mm avec le cône utilisé pour nos essais. Par contre, au-delà de cette vitesse, il faut bien prendre garde de ne pas dépasser le rayon minimum sous peine de changer de régime de coupe.

Parallèlement, pour de grands rayons la précision devient médiocre à faible vitesse linéaire de déroulage. A cela, se rajoute la capacité réelle du moteur à respecter une consigne (0.1% environ de la vitesse maxi) et à réagir en charge (1% de la vitesse maxi en pleine charge) d'après les ordres de grandeur typiques du constructeur.

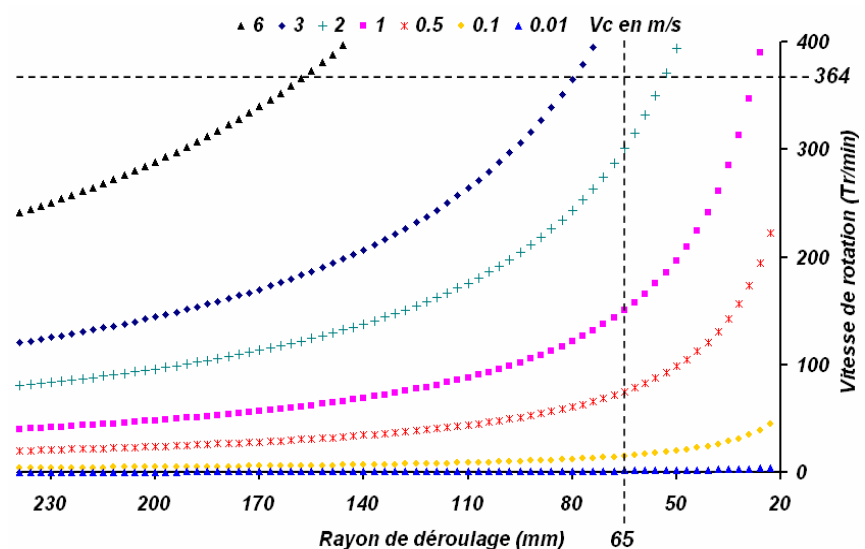


Figure 48 : Evolution de la vitesse de rotation du billon en fonction du rayon de déroulage à vitesse linéaire constante (V_c en m/s, $Ep=3$ mm)

Son pilotage analogique assure bien une variation continue de la vitesse de rotation mais avec une incertitude de 2 Tr/min sur la consigne (2000×0.1). En anticipant quelque peu sur les résultats des essais de déroulage, on s'apercevrait que la charge maximale n'excède 20 N.m. que lors de refus de coupe majeurs. Cela correspond à la moitié des capacités du moteur. On peut alors considérer l'erreur systématique commise sur le suivi de la consigne inférieure à 10 Tr/min en supposant un comportement linéaire des capacités du moteur vis-à-vis de la charge.

Enfin, en posant l'hypothèse raisonnable d'une variation des efforts pendant la coupe la plupart du temps inférieure à la moitié de l'effort nominal, l'incertitude due à la variation de la charge pendant un usinage continu peut être estimée à 5 Tr/min.

Globalement, en tenant compte du rapport de réduction, la valeur de la vitesse de rotation du billon est connue avec une incertitude de 1.28 Tr/min et une erreur systématique maximale de 1.82 Tr/min pour notre configuration expérimentale. Son influence sur la vitesse de coupe linéaire sera bien entendue décuplée par la valeur du rayon de déroulage ($V=R\omega$). Concrètement, pour un rayon de 190 mm et une vitesse de coupe de 1m/s, l'incertitude frôle 0.062 m/s. Nous serons amenés à en examiner les conséquences.

➤ Banc de mesure

En plus de deux dynamomètres, la microdériveuse dispose d'un patin de frottement monté par l'intermédiaire d'une cellule piézoélectrique (KISTLER 9251A) sur le bras (**15**). Situé un quart de tour après la zone de coupe par rapport au sens de rotation, il permet d'accéder à une mesure, aussi précise que possible, de la valeur moyenne du coefficient de frottement bois/métal sur une surface fraîche tel qu'il a été défini en II.4.1. Les signaux de sortie de la cellule piézoélectrique associée seront notés Xpatin et Ypatin. Un dernier dispositif permet de mesurer la sur-épaisseur trois quarts de tour après la coupe. Un capteur LVDT (inductif) supporté par un bras (**14**) permet de relever le profil avec une précision de $\pm 0.5\mu\text{m}$. Le signal correspondant est noté EP. Nous reviendrons plus en détail par la suite sur la validité effective des mesures issues de ces capteurs. Enfin, une caméra équipée d'un zoom (X10) et reliée à un moniteur est positionnée au centre des deux couronnes. Elle permet de visualiser la coupe en temps réel.

2.2 Mise en place du dispositif de mesure

2.2.1 Les Contraintes

L'objectif de mise en place d'un système de suivi et de contrôle du processus associé à la capacité des opérateurs à agir suivant les sons perçus a d'emblée ciblé notre choix sur l'utilisation d'accéléromètres et de microphones compatibles avec des mesures dans le domaine fréquentiel de l'audible. Nous disposons néanmoins d'une grande marge dans la définition effective de la plage de mesure en fréquence puisque seuls certains nourrissons sont réellement sensibles à cette très large palette. Dans les faits, un homme adulte perçoit des sons dont les fréquences s'étendent de quelques dizaines de Hz à quelques kHz (souvent moins de 10 kHz). C'est donc dans cette zone fréquentielle nettement plus réduite qu'on cherchera à maximiser la précision des capteurs.

Quel que soit le type de capteur, son positionnement par rapport à la zone de coupe influence singulièrement la mesure. Plusieurs essais préliminaires présentés dans [DENAUD et al_2002]

ont montré une certaine sensibilité du microphone à la distance à la source puisqu'une chute de 10 dB du niveau moyen des spectres est observée quand le capteur passe de 0.15 à 1.5 m de la source. Cette remarque reste vraie pour une sonde intensimétrique. Les accéléromètres, comme tous capteurs vibratoires, fournissent un signal d'autant plus « propre » que le nombre d'intermédiaires (surfaces de contact ou fluides) qui les séparent de la source d'excitation est faible. L'idéal serait donc de les fixer directement sur les outils. Pour maximiser la rigidité du montage des accéléromètres, l'emploi de liaisons goujonnées est recommandé. Cette liaison assure une linéarité de la réponse du capteur jusqu'à une vingtaine de kHz ($2/3$ de la fréquence de résonance de la liaison mesurée à 31 kHz par le constructeur B&K). Enfin, les accéléromètres doivent être positionnés axialement par rapport à l'onde mesurée afin de limiter les mesures parasites dues aux excitations transverses de leurs cellules piézoélectriques.

2.2.2 Solutions employées

2.2.2.1 Les outils

Les deux directions fondamentales du procédé de déroulage sont les axes X et Y tels qu'ils ont été définis en II.1.2. Etant donné les caractéristiques unidirectionnelles des accéléromètres, ces directions s'imposaient pour mesurer les vibrations générées par la coupe. Les outillages disponibles sur la microdériveuse ne permettant pas de remplir ces conditions (cf. [DENAUD et al_2002]), nous avons été amenés à en réaliser de nouveaux (cf. Figure 49) dont les croquis partiellement cotés sont disponibles en ANNEXE I.

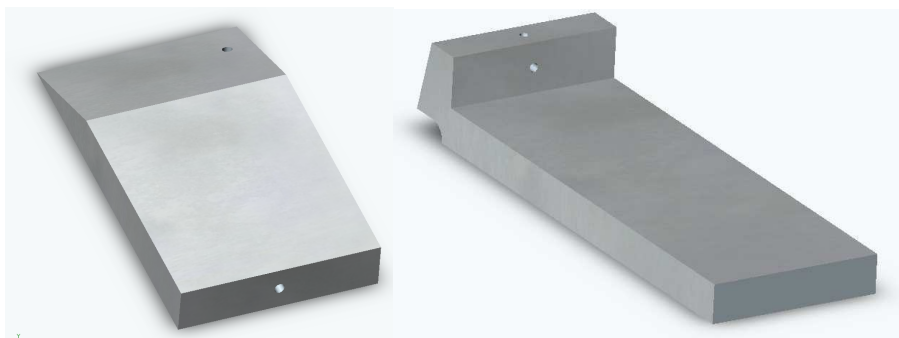


Figure 49 : Vue en 3D du couteau et de la barre de pression réalisés

Le couteau et la barre de pression sont plus larges qu'à l'accoutumée (60 mm au lieu de 40) afin de permettre le positionnement d'un accéléromètre directement sur la face de dépouille à proximité de la source, tout en autorisant une coupe centrée sur la bissectrice de l'arête. Les trous de fixation des goujons sont visibles sur la Figure 49. Cette géométrie nous permet de dérouler des éprouvettes de 20 mm de largeur sans mettre en péril le capteur. L'accéléromètre en pointe d'outil a été fixé côté machine pour profiter de la bonne rigidité de l'ensemble ainsi que par commodité en particulier pour le maintien du câble.

Le nez de la barre de pression présente une partie massive nécessaire à la fixation des accéléromètres. Nous avons scrupuleusement respecté les recommandations des opérateurs

expérimentés pour définir l'angle d'entrée de la barre (16°). Cette géométrie favorise indéniablement l'apparition d'un mode de flexion dont nous reparlerons lors de la caractérisation mécanique du montage. La proximité des capteurs par rapport à la source d'excitation a été privilégiée. En effet, lors de mesures effectuées sur le porte-barre, la très faible dynamique des signaux (déjà relativement faible en prise directe sur la barre) rendait leur exploitation hasardeuse.

Le couteau a été usiné dans un acier faiblement allié (60SMD8, composition : 0.6%C, 1.8%Si, 0.7%Mn, 0.3%Cr, 0.5%Mo, 0.2% V). Après traitement thermique (trempe à 900°C et revenu à 250°C, 55-56 HRC suivant les points de mesure), il a été rectifié et très légèrement poli (P800) pour éliminer la bavure (morfilage) tout comme le patin de frottement. Tous les filetages ont été repris après traitement. La barre a été fabriquée à partir d'une plaque d'acier courant XC38 puisqu'un traitement thermique n'était pas nécessaire dans le cadre de cette étude. Son angle de bec a également été ébavuré par un léger polissage (P800).

2.2.2.2 Les capteurs : choix final et montage

La Figure 50 illustre la mise en position des différents capteurs utilisés à proximité de la zone de coupe. Le couteau a été équipé de deux accéléromètres de type 4394 (B&K) dont les signaux de sortie ont été baptisés Xc et Yc. La déviation de leur réponse en fréquence n'excède pas $\pm 2\%$ entre 5 Hz et 10 kHz et $\pm 10\%$ entre 1 Hz et 25 kHz. Leur très faible masse (2.9g), permet de négliger l'influence de leur présence sur le comportement vibratoire de l'outil. La barre est équipée de capteurs (Xb et Yb) plus massifs et 10 fois plus sensibles de type 752-100 (B&K), suspectant un niveau vibratoire moins conséquent que pour l'outil. Ces quatre capteurs sont à électronique intégrée c'est-à-dire qu'une tension est directement délivrée en mV/m.s².



Figure 50 : Dispositif de mesure des efforts (FXc, FYc, FXb, FYb), des vibrations (Xc, Yc, Xb, Yb) et des sons

Chaque câble blindé a été fixé au bâti à l'aide de colliers moyennant une certaine marge nécessaire aux mouvements d'initialisation des couronnes. Les connections ont été protégées des projections d'eau par un joint siliconé.

Si le choix d'accéléromètres piézoélectriques est presque trivial tant leurs avantages sont nombreux (précision, robustesse, faible encombrement, prix,...), en revanche, on peut logiquement se poser la question de l'utilisation d'une sonde intensimétrique ou d'un microphone. La grandeur mesurée, rappelons-le, est vectorielle dans le premier cas et scalaire dans le second. Nous avons finalement retenu le système le plus simple¹² en première approche pour deux raisons principales : le prix et la possibilité de travailler dans un environnement exempt de toute perturbation extérieure. En effet, nous disposions déjà d'un microphone de mesure à condensateur omnidirectionnel précis et adapté (4188-A-021, ± 2 dB de 8Hz à 12.5kHz, B&K) qui nous a permis de déterminer un niveau de bruit moyen en journée entre 45 et 55 dB en moyenne. La nuit, cette même mesure ne dépassait guère les 25 dB. En effectuant les essais dans ces conditions, on s'assure un niveau de bruit de fond limité en dehors de celui de la machine elle-même. Ne négligeons pas non plus les remarques des opérateurs expérimentés, qui écoutent aussi avec attention les sons émis par « la carcasse » et le moteur de broche.

Le microphone a été positionné à 15 cm au dessus de la zone de coupe : la boule de protection utilisée pour prévenir des risques de projection d'eau est visible sur la Figure 50. Ce choix est le fruit des résultats préliminaires décrits dans [DENAUD et al_2002] et de rapides essais complémentaires. La distance à la source constante nous imposait de le fixer sur le chariot mobile. La position habituellement occupée par la caméra a été testée. Le niveau du signal enregistré était légèrement plus faible qu'avec la solution retenue. De plus, l'utilisation d'un guide d'ondes (cylindre creux garni de divers matériaux absorbants) a aussi été envisagée afin de protéger le microphone des sources sonores autres que la coupe mais sans succès tant le signal était atténué.

L'avis des utilisateurs habituels de la machine à l'écoute des fichiers enregistrés a permis d'avaliser le choix retenu. Le signal mesuré en positionnant le microphone dans la couronne était méconnaissable (probablement dû aux multiples réflexions). Quant à celui obtenu en employant un guide d'ondes, il était quasiment inaudible.

Un porte-comparateur magnétique a été utilisé pour positionner le microphone dans la direction et à la distance voulue par rapport à l'arête de l'outil. Il était agrémenté d'une pince, garnie d'une double couche de matériau absorbant, qui isolait le capteur des vibrations de la machine.

Enfin, le bon fonctionnement de chaque capteur a été vérifié. Les accéléromètres étaient neufs ou avaient moins de deux ans d'une utilisation très ponctuelle. La calibration du microphone a été vérifiée par le constructeur. La majorité des câbles de connections des capteurs d'efforts a

¹² Ce choix n'est pas une vérité en soi et l'utilisation d'une sonde intensimétrique serait certainement riche d'enseignements.

été renouvelée¹³. Ils ont été étalonnés avant chaque série d'essais. Des poids de 1, 2 et 5 kg ont été utilisés pour ajuster les coefficients de l'amplificateur de charges multicanaux (KISTLER 5017A) des signaux pour une pesanteur supposée de 9.81 N/kg. Cette précaution est nécessaire puisque la réponse de ce type de capteur peut légèrement dévier avec le temps.

2.2.2.3 La centrale d'acquisition

Nous avons privilégié l'utilisation d'un système unique d'acquisition afin de s'assurer d'une synchronisation optimale des signaux. Notre choix, effectué conjointement avec l'équipe usinage des métaux du LABOMAP, s'est porté vers un système PULSE (7537A B&K). Ce multianalyseur de signaux acoustiques ou vibratoires (FFT, bandes d'octaves, analyse modale, zoom,...) en temps réel à 5 canaux est capable de garantir une fréquence utile de 25.6 kHz (la fréquence d'échantillonnage maximale étant 65536 Hz) tout en assurant une précision excellente de la mesure (± 0.05 dB d'incertitude sur l'amplitude dans les cas les plus défavorables à laquelle il faut ajouter l'incertitude de chaque capteur). Un second boîtier d'acquisition à 7 canaux a été connecté au premier lorsque le nombre de paramètres à mesurer l'exigeait en particulier en présence de la barre de pression. Il était piloté en mode maître-esclave par le premier mais cela monopolisait une voie. Il n'était donc pas possible d'acquérir les 12 signaux simultanément : FXc, FYc, FXb, FYb, Xpatin, Ypatin, Xc, Yc, Xb, Yb, Micro et EP. Dans la pratique, une valeur moyenne du coefficient de frottement est utilisée pour la décomposition des efforts de coupe sur les deux faces de l'outil. Les essais menés sans barre nous fournissant une série de valeurs de référence de ce coefficient (mêmes modalités en particulier la vitesse et les essences), le patin n'a plus été utilisé par la suite.

Une procédure générale intégrant les caractéristiques de chaque capteur a permis de visualiser en temps réel les signaux et de les enregistrer ($f_e=65536\text{Hz}$). Les données ainsi stockées ont pu être analysées dans différentes phases de dépouillement afin de comparer les performances des outils de traitement du signal choisis.

2.3 Caractérisation mécanique de la microdériveuse

2.3.1 Fixation des outils

La nature et plus particulièrement la rigidité des systèmes de bridage des outils ont des conséquences non négligeables sur leur comportement mécanique ([NAGATOMI et al_1993]). Le porte-outil est encastré dans une rainure peu profonde et vissé. L'ajustement est serré, ce qui permet une remise en position précise. Le couteau est fixé dans le porte outil par coincement à l'aide d'une cale biaise de pente 5% (cf. Figure 51) serrée par deux vis. Cette

¹³ Même avec un seul des deux capteurs d'une couronne en état de marche, la mesure reste possible, mais la sensibilité est approximativement divisée par deux.

géométrie favorise la répartition de la pression exercée sur l'outil et limite sa déformation. Par contre, la répétitivité du bridage et de la mise en position est délicate à assurer. Le positionnement de l'arête de l'outil s'effectue à l'aide de la caméra de façon manuelle. En utilisant le grossissement maximum de l'objectif, l'incertitude sur son alignement avec l'axe de la broche peut raisonnablement être estimée à 2 dixièmes de millimètres.

Le bridage a été effectué en utilisant une clé BTR selon une procédure manuelle (blocage des vis avec le petit bras de la clef, un demi tour supplémentaire avec le grand bras sur la vis inférieure, nouveau blocage avec petit bras de la vis supérieure). Certes peu orthodoxe mais reproductible, cette démarche permet de brider l'outil sans trop déformer le porte-outil (sensible étant donné la faible section de la partie supérieure) avec plus de précision qu'en utilisant une clé dynamométrique surdimensionnée. Malgré toutes ces précautions, l'opération n'est pas sans effet sur la rigidité du système. Le parti a donc été pris de limiter au maximum les phases de démontage.

Le principe de fixation du porte-barre et de la barre est rigoureusement le même que celui du porte-outil. Cette dernière n'a été démontée qu'une fois, suite à un incident.

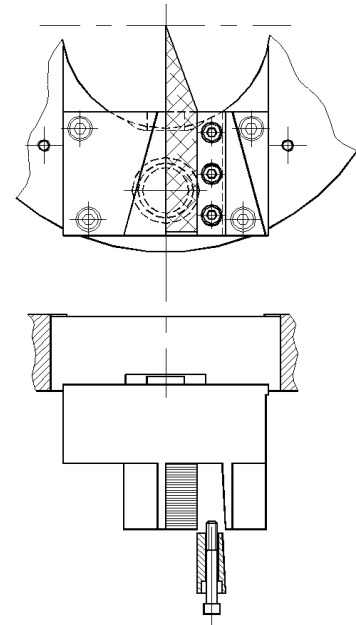


Figure 51 : Fixation du couteau sur le porte-outil et du porte-outil sur la couronne d'après [BUTAUD_1994]

2.3.2 Sonnage

L'opération de « sonnage » consiste à déterminer la réponse impulsionnelle, ou la fonction de transfert, d'un système mécanique. D'un point de vue plus physique, le module de la fonction de transfert est homogène à l'inverse d'une masse. On peut alors l'interpréter comme l'image de l'inverse de la masse modale en fonction de la fréquence. Une faible excitation, dont le contenu fréquentiel se trouve à proximité d'une fréquence de résonance, engendre de fortes accélérations ce qui témoigne bien d'une diminution de la masse apparente de la machine. Pour ce faire, on utilise en général un marteau instrumenté et un ou plusieurs accéléromètres afin de mesurer l'excitation et la réponse du système. Les traces des fréquences de résonance, qui dépendent des points d'application et de mesure, sont souvent prépondérantes sur les spectres. Il est donc très utile, de les connaître en ces points à l'avance, que l'on veuille les éliminer ou suivre leur comportement.

2.3.2.1 Démarche expérimentale

Le dispositif de mesure décrit en IV.2.2.2.2 a été utilisé en l'état (outils sonnés in situ). Les positions des chocs appliqués avec le marteau (2302-10 B&K) sont visibles sur la Figure 52.

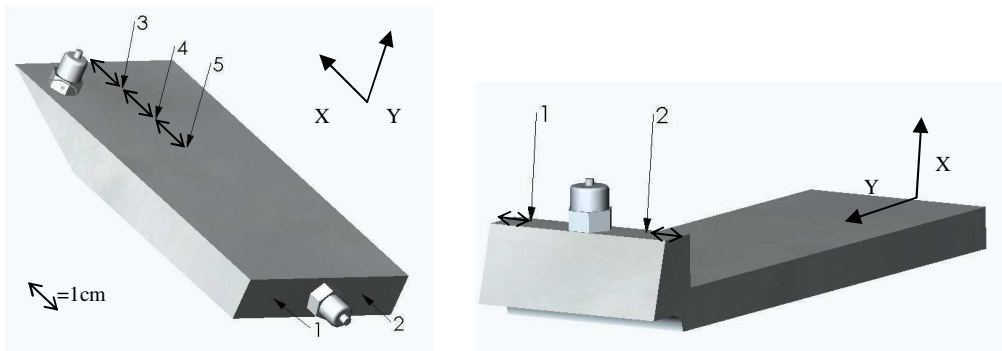


Figure 52 : Direction et localisation des points sollicités avec le marteau instrumenté

Ces directions et ces points d'impact ont bien entendu été choisis pour leurs similitudes avec les sollicitations subies par les outils lors de la coupe. L'interprétation des fonctions de transfert dans des directions de sollicitation et de mesure croisées peut mener à de graves erreurs comme nous le verrons par la suite. La barre n'a pas uniquement été sonnée dans la direction X, mais les faibles valeurs des fonctions de cohérences obtenues perpendiculairement, n'ont pas permis leur exploitation. Au niveau du nez de la barre, la qualité de l'impact était plus qu'hasardeuse. A l'opposé, le porte-barre massif ne permettait pas d'exciter suffisamment les accéléromètres (saturations systématiques du marteau). Nous ne présenterons que les résultats du sonnage suivant X.

Chacune des fonctions de transfert et de cohérence présentées est le résultat de la moyenne linéaire de 5 chocs « réussis » avec un embout en aluminium (pas de rebond du marteau et une bande fréquentielle suffisamment étendue). Pour exciter les basses fréquences en particulier suivant Y, nous avons renouvelé la mesure en utilisant un embout en PTFE capable de fournir plus d'énergie dans cette bande (spectres associés non représentés). La résolution en fréquence est de 16 Hz puisque la période d'amortissement était très courte (62.5 ms). En effet, le système présente une grande « inertie » vis-à-vis de l'excitation transmise. Une échelle en dB (référence 1 (m/s²)/N) a été privilégiée puisque dans notre application, elle permet de mieux visualiser les différentes fréquences de résonance.

Règles de décision pour la définition d'un pic spectral correspondant à une résonance du système pour chaque fonction de transfert :

➤ *Définition de deux bandes fréquentielles :* Dans la première, notée zone *I*, la fonction de cohérence qui caractérise la qualité de la réponse impulsionnelle est très proche de 1 et les allures des spectres sont semblables (mêmes fréquences pour un même mode et coefficients d'amortissement proches). Indiquée sur fond blanc dans les tableaux fournis, sa limite supérieure coïncide avec le début de la seconde bande (zone *II*). La fonction de cohérence y varie localement et les fréquences de résonance y sont plus ou moins bien marquées selon les points d'impacts. Sa limite supérieure précède l'effondrement des fonctions de cohérence (10 kHz dans le meilleur des cas). La zone *II* est indiquée par un fond hachuré dans les tableaux.

➤ *Définition d'un pic* : Chaque pic est répertorié si la valeur de la fonction de cohérence associée dépasse 0.9. (immédiat dans la zone *I* et au cas par cas dans la zone *II*). Ceux accompagnés d'un retournement de phase¹⁴ sont indiqués en rouge dans les tableaux.

Pour la barre de pression, la cohérence des signaux obtenus au point (2) étant très dégradée, seuls les résultats du sonnage en (1) ont été exploités. Le système de bridage laisse en porte-à-faux la barre de pression sur une part non négligeable de sa largeur ce qui est nettement moins vrai pour le couteau. La partie non bridée est donc très sujette à vibrer excessivement. Toutefois, ce comportement ne devrait pas dégrader les mesures en cours d'usinage où sollicitations et mesures se situent dans une zone serrée par le porte-barre. Ne disposant que d'un point de mesure, seules les règles concernant la fonction de cohérence seront appliquées.

2.3.2.2 Le couteau

La cohérence des signaux, est excellente de 500 à 6000 Hz dans les deux directions. L'allure des spectres y est aussi très similaire. Les résultats obtenus avec l'embout en PTFE permettent d'étendre cette bande jusqu'à 100 Hz en basse fréquence qui constituera la zone *I*. Au-delà et jusqu'à 10 kHz s'étend la zone *II* comme définie précédemment.

Dans la direction de coupe X (cf. Figure 53), le décalage des courbes est une conséquence du système de bridage de l'outil. Le point 1 se trouve à proximité de la couronne et de la partie la plus massive du porte outil. La masse apparente y est plus faible sans que cela ne modifie fondamentalement l'allure de la réponse.

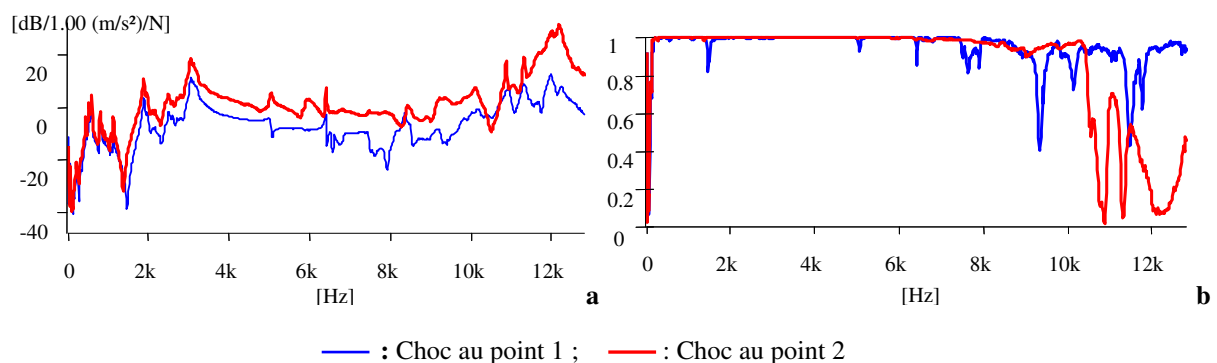


Figure 53 : Sonnage dans la direction de coupe X ; **a** Fonctions de transfert (X_c , Marteau) en dB (référence 1m/s^2) ; **b** Fonctions de cohérence (X_c , Marteau)

Dans la direction radiale (cf. Figure 54), la masse modale (comme la masse réelle compte tenu du biseau de l'outil) augmente lorsqu'on se rapproche du porte-outil. Les 3 réponses

¹⁴ Dans un système mécanique linéaire classique type masse-ressort, le passage de la résonance est accompagné d'un déphasage de $-\pi$ sur le spectre des phases. Pour une structure complexe, ce déphasage n'est pas toujours visible (proximité des fréquences de résonance).

impulsionnelles sont logiquement hiérarchisées en amplitude en fonction de leur distance à l'arête du couteau.

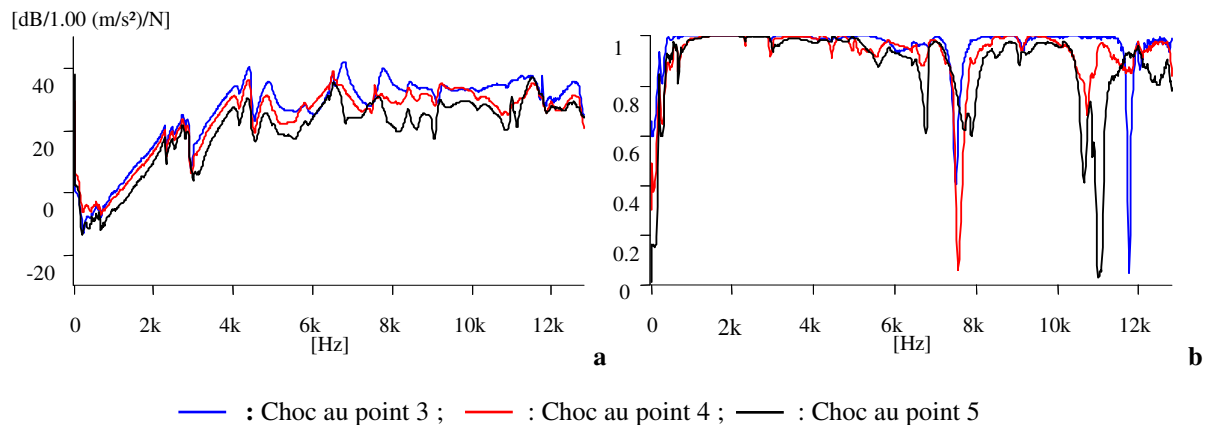


Figure 54 : Sonnage dans la direction radiale Y; **a** Fonctions de transfert (Y_c , Marteau) en dB (référence 1m/s^2); **b** Fonctions de cohérence (Y_c , Marteau)

Les chutes locales de la fonction de cohérence ne sont pas forcément rédhibitoires. Elles peuvent témoigner comme c'est le cas à proximité de 7.5 kHz, d'une antirésonance (la masse modale tend vers l'infini). Comme son nom l'indique, toute l'énergie de cette bande est absorbée par la structure. L'exploitation des résultats reste donc possible jusqu'à 10 kHz.

Le tableau suivant répertorie les fréquences de résonance de l'ensemble, mesurées au niveau de l'outil dans les deux directions principales du déroulage, en fonction des règles de décisions établies. Il nous permettra d'interpréter les spectres obtenus pendant la coupe.

X (Hz)	192	432		496		576		784	880	928	1072	1120	1872	1936	2064	2144		2480	2576	2688		
Y (Hz)	192	432	480		540		624										2272	2448				2720
X (Hz)	2768		3040	3104				5024		6000		6384	6480	6608	7456		8336					10860
Y (Hz)		2848				4048	4384	4864		5792		6368	6480		7760		8736	8416	9200			

Tableau 5 : Fréquences de résonance mesurées sur l'outil monté dans les deux directions X et Y ($\pm 8\text{Hz}$)

192 : Pic mesuré à 192 Hz sur la fonction de transfert en amplitude dans la zone I

6384 : Pic mesuré à 6384 Hz sur la fonction de transfert en amplitude dans la zone II accompagné d'un retournement de phase

Etant donné la qualité de la mesure, nous pouvons avoir toute confiance dans les mesures des fréquences de la zone I. Dans la zone II, les résultats restent tout à fait exploitables mais une plus grande prudence sera requise lors de l'interprétation des signaux.

2.3.2.3 La barre de pression

La Figure 55 présente le résultat du sonnage de la barre de pression dans la direction X pour les deux directions de mesure.

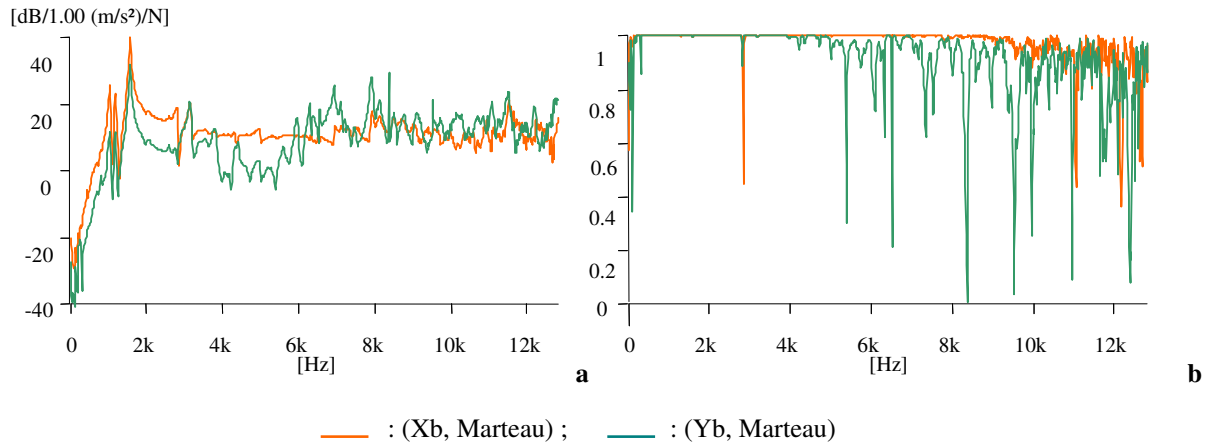


Figure 55 : Sonnage dans la direction de coupe X en (1), **a** Fonctions de transfert en dB (référence 1m/s²) ; **b** Fonctions de cohérence

Les relevés suivant Y (perpendiculaire à la sollicitation) peuvent sembler corrects jusqu'à 4 kHz d'après la valeur de la fonction de cohérence. Pourtant, il ne s'agit que de l'image de la sensibilité transverse de l'accéléromètre (5% d'après le constructeur). La similitude des spectres des deux directions en est l'illustration. Seule la fonction de transfert (Xb, marteau) sera prise en compte par la suite puisque ce second spectre n'est pas le résultat de la réponse impulsionnelle suivant Y. La fonction de cohérence permet de définir la zone I jusqu'à 9 kHz, la zone II s'étalant alors jusqu'à 11 kHz.

Comme nous l'avons pressenti, un mode de flexion simple est accompagné d'une fréquence de résonance dominante en 1568 Hz. Le dernier pic marqué apparaît près de 5 kHz (4928 Hz). Au-delà, avec une échelle linéaire, il n'aurait pas été possible de les identifier. Leur rôle restera mineur dans l'interprétation.

X (Hz)	128	192	256	432	1024	1168	1568	2032	2576	2784	3120	4288	4928	6320	6512
X (Hz)	6928	7448	7552	7904	8112	8480	8672	9008	9392	9648	9856	10320	10576	10928	

Tableau 6 : Fréquences de résonance mesurées sur la barre montée suivant X (±8Hz)

128 : Pic mesuré à 192 Hz sur la fonction de transfert en amplitude dans la zone I

1568 : Pic mesuré à 6384 Hz sur la fonction de transfert en amplitude dans la zone II accompagné d'un retournement de phase

2.3.2.4 Influence du démontage des outils

Le principe de fixation des outils ne permet pas d'obtenir un bridage parfaitement reproductible des outils. Concrètement, cela se traduit par un décalage plus ou moins proportionnel des fréquences et des amplitudes des résonances de l'ensemble. Toutefois, grâce aux précautions employées, la reproductibilité est satisfaisante.

Pour le couteau, dans la direction de coupe, les décalages observés sont négligeables dans la zone *I* (de 100 Hz à 6 kHz). Dans la direction radiale, ils sont minimales en deçà de 3 kHz et ils restent modérés (quelques dizaines de Hz) jusqu'à 6000 Hz. Au-delà, et quelque soit la direction, la correspondance des spectres est plus aléatoire mais reste correcte. Ce n'est pas complètement surprenant puisque cette tendance est déjà visible sur un sonnage unique.

Concernant la barre, les observations sont similaires. Les décalages fréquentiels n'excèdent pas quelques dizaines de Hz ce qui ne constitue en rien une gêne tant la fréquence de résonance associée au mode de flexion simple est prédominant et d'identification aisée.

Une certaine prudence dans les interprétations pour les hautes fréquences sera requise afin de ne pas attribuer au processus de coupe la signature d'un comportement mécanique différent du système.

2.3.3 Essais à vide et Usinage d'un matériau de référence

Plusieurs auteurs utilisent un enregistrement à vide du fonctionnement de la machine afin d'identifier certaines signatures inhérentes à son fonctionnement (classiquement d'origines électriques ou hydrauliques). Un usinage virtuel (en dehors de la matière) le plus proche possible de la réalité a donc été enregistré : tous les outils et les capteurs montés, un disque de hêtre bridé sur la broche et des paramètres de coupe réalistes ($V_c=0.5\text{m/s}$, $E_p=1\text{mm}$). Toutefois, si une telle mesure permet un premier niveau d'analyse, elle reste loin de la sollicitation réelle qu'est la coupe. Pour cette raison, seule une modalité sera présentée.

Les travaux menés par THIBAUT ou DECES-PETIT déjà mentionnés, avaient montré l'intérêt de remplacer le bois par du PTFE pour décrire le mécanisme de formation du copeau.

C'est une manière astucieuse de s'affranchir de toutes les difficultés supplémentaires liées aux hétérogénéités de structure du bois. D'un point de vue vibratoire ou acoustique, le raisonnement reste valable. Dérouler du PTFE permet d'obtenir simplement une signature spectrale proche du comportement de la microdériveuse en fonctionnement. Ainsi, 8 essais de déroulage de PTFE en 1 mm d'épaisseur, détaillés dans le Tableau 7, ont été enregistrés.

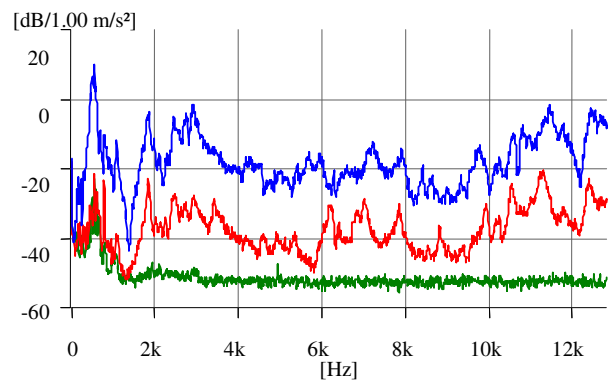
numéro essai	usure	dépouille (°)	Vitesse de coupe linéaire (m/s)
1	rôdé	0	0.5
2	rôdé	0	2
3	rôdé	1	0.5
4	rôdé	1	2
5	usé	0	0.5
6	usé	0	2
7	usé	1	0.5
8	usé	1	2

Tableau 7 : Modalités de déroulage du PTFE (essais 1 à 8)

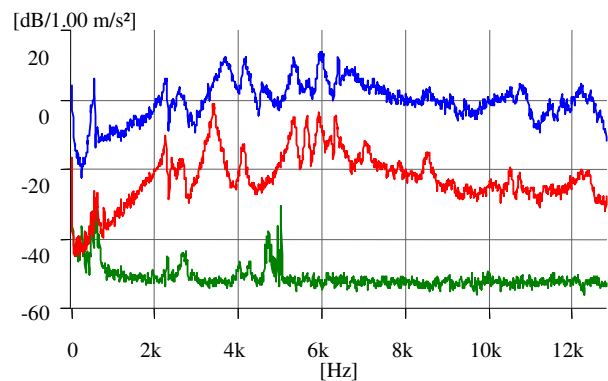
Ces modalités se rapprochent de celles utilisées en usinage sans barre de pression décrites en IV.3.3. L'usinage avec barre de pression du PTFE n'a pas été traité puisque son utilisation n'est aucunement nécessaire (pas de fissuration). Son adjonction risquait de polluer la mesure tant le comportement en compression du PTFE est différent de celui du bois humide. C'est aussi pour cette raison que nous n'avons pas employé de valeur négative de l'angle de

dépouille. Comme nous le verrons, un fort refus de coupe peut apparaître avec une dépouille nulle (faible compressibilité du PTFE).

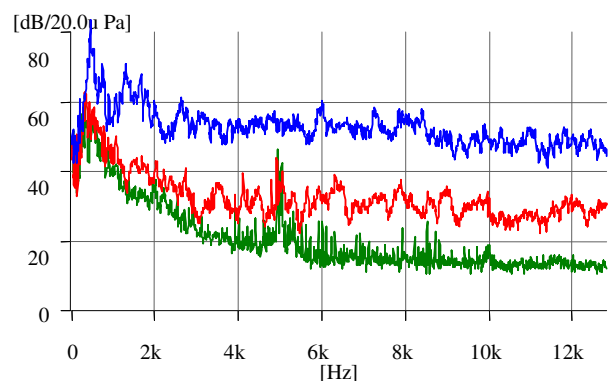
La Figure 56 montre les spectres obtenus à partir des signaux des accéléromètres fixés sur le couteau et du microphone lors d'un enregistrement à vide et d'un usinage de PTFE et de hêtre avec les mêmes paramètres de coupe (essai 1). Cette bande spectrale s'étend jusqu'à 12.8 kHz (puissance de 2 la plus proche des limites du capteur le plus contraignant i.e. le microphone). Elle englobe les capacités auditives réelles des opérateurs et constituera presque toujours la plus large bande des analyses fréquentielles présentées pour le micro. L'enregistrement à vide ne fournit que peu d'information comme on pouvait s'y attendre. Un pic acéré, généré par les variateurs de fréquence des moteurs, apparaît à 5 kHz sur les spectres. Il est rapidement noyé dans le niveau moyen du signal pendant l'usinage ce qui est courant pour des perturbations d'origines électriques. Pour les basses fréquences, les niveaux des signaux sont presque équivalents à ceux obtenus pendant la coupe. La bande 538-576 Hz présente une amplitude particulièrement élevée qui risque de nous gêner dans les analyses futures. Son origine est liée à l'asservissement du moteur de chariot par celui de broche puisqu'elle reste constante en fréquence quels que soit les paramètres de coupe et n'apparaît que lors du fonctionnement simultané des deux moteurs.



a : Accéléromètre Xc



b : Accéléromètre Yc



c : Microphone

— : A vide, — : PTFE, — : Hêtre

Figure 56 : Spectres de Xc (a) et Yc (b), et du micro (c) pendant un enregistrement à vide et lors d'un déroulage de PTFE et de hêtre ($V_c=0.5\text{m/s}$; $E_p=1\text{mm}$).

Paramètre FFT : $T=125\text{ms}$, $df=8\text{Hz}$, $N=3200$, 41 moyennes linéaires sur 1.5 s (overlap=75%). La signification de ces termes sera détaillée dans la partie VI

L'usinage du PTFE est beaucoup plus riche (surtout pour les accéléromètres) puisqu'il sollicite la machine sur une large bande de fréquence de manière similaire au bois. On retrouve en particulier une allure proche de celle des spectres issus des accéléromètres lors du déroulage de hêtre mais pour des niveaux vibratoires bien moindres. Pourtant, entre ces deux opérations, le couteau a été démonté pour être affûté. Cela confirme la validité de nos observations même en cas de démontage de l'outil sur cette bande fréquentielle.

Ces spectres seront considérés comme des images approchées de déroulages idéaux et serviront de références.

3 Procédures Expérimentales

Un tableau joint en ANNEXE I détail les conditions de coupe et les échantillons utilisés. La Figure 58 illustre le principe et les paramètres retenus pour les différentes configurations expérimentales choisies.

3.1 Choix des essences et préparation des éprouvettes

L'étude de la littérature consacrée au déroulage a mis en lumière le risque de confusion introduit par l'emploi d'essences fortement hétérogènes qui multiplie les interactions possibles et contradictoires. Nous avons donc opté pour l'utilisation d'essences plutôt homogènes sachant qu'aucune ne l'est vraiment. Le hêtre et le peuplier ont finalement été choisis. Ils se prêtent bien au déroulage et leurs densités sont assez différentes (ordres de grandeurs respectifs à l'état anhydre : 0.6 et 0.4 g/cm³). Ce sont par ailleurs les deux essences des milieux tempérés les plus déroulées en France.

Avec le concours de l'entreprise *BDA* qui fabrique des placages de hêtre, deux billons d'une cinquantaine de centimètres issus d'un arbre 1 et un billon de longueur comparable mais de plus petit diamètre provenant d'un arbre 2 ont été débités en disques. Le billon II, présentant quelques nœuds adhérents, provenait de la partie supérieure du tronc de l'arbre 1. Le billon I issu du milieu du tronc de cet arbre ne présentait aucune singularité apparente. Le billon III, débité dans le second arbre ne présentait lui non plus aucun défaut visible avant écorçage.

Ils ont été écorcés puis « mis au rond » en utilisant la dérouleuse semi industrielle du *LABOMAP* (typique de l'emballage léger) jusqu'à un diamètre de 380 mm environ pour I et II et 350 mm pour III. Afin de respecter les usages industriels, la mise au rond a été effectuée de façon à optimiser le rendement. La moelle n'était donc pas confondue avec le centre géométrique du billon ce qui offrait la possibilité de suivre l'influence de la direction du bois dans le plan RT. Ils ont ensuite été débités en disques de 20 mm d'épaisseur à l'aide d'une scie à ruban munie d'un guide (scierie *TOUTANT&fils*). Un soin particulier a été apporté au contrôle de cette épaisseur et seuls les disques présentant des écarts inférieurs à 0.2 mm centrés sur l'épaisseur nominale et exempts de défauts ont été conservés.

La mise au rond des billons n'a pas été complètement achevée de manière à laisser une surépaisseur sur toute la longueur des billons. Elle constitue une référence très pratique pour la reconstitution des billons une fois débités en disques. De la sorte, les usinages ont tous pu débiter à partir du même secteur du billon. Chaque disque a été numéroté en partant du pied de l'arbre puis percé en son centre avec une perceuse à colonne classique de l'atelier pour être fixé sur le mandrin de la microdériveuse. Enfin, les disques ont été immergés dans une eau régulièrement renouvelée pour prévenir toute attaque bactérienne.

La scierie *GONOT* nous a fourni deux billons de 250 mm de diamètre et de plus de 600 mm de longueur de I 214, clone de peuplier parmi les plus appréciés des dérouleurs (très peu de défauts et couleur extrêmement homogène). Ils ont rigoureusement subi la même procédure que les précédents. Les billons très bien conformés ont été mis au rond pour un diamètre de 240 mm pratiquement centré sur la moelle.

Une mise au rond a été effectuée avant chaque essai à une vitesse de coupe de 0.5 m/s pour une épaisseur de 0.5 mm jusqu'à l'obtention d'un placage continu et stabilisé excepté pour les modalités spécifiques aux critères épaisseur (essais 108 à 125) et vitesse (essais 130 à 137).

Pour ces derniers, la « mise au rond » était conduite avec l'épaisseur désirée pour l'acquisition suivante de sorte que la surface du disque décrivait une portion de spirale représentée sur la (Figure 57). Cette procédure est nécessaire lorsqu'on ne souhaite effectuer qu'un usinage puisque les deux faces d'un même placage sont fabriquées lors de deux tours successifs. De plus, l'épaisseur déroulée est aussi égale dès le début à la profondeur de passe choisie.

Enfin, pour les essais 108 à 125, afin d'assurer une longueur usinée parfaitement maîtrisée, une rainure a été réalisée dans les disques concernés suivant le schéma ci-contre. Les placages ainsi produits se prêtent bien à une caractérisation « hors ligne » comme nous le verrons par la suite.

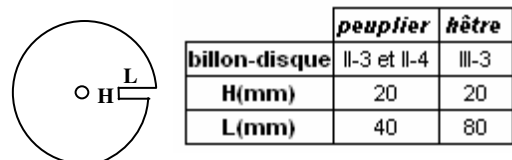


Figure 57 : Préparation spécifique des éprouvettes des essais 108 à 125

3.2 Plan d'expérience : choix des variables et des niveaux

Le détail des configurations finalement retenues est représenté sur la Figure 58. Un plan d'expérience complet sur les paramètres clés mis en lumière lors de l'état de l'art du procédé et orienté au vu des renseignements fournis par les opérateurs a d'abord été élaboré. Il correspond aux modalités numérotées 8 à 104 du programme expérimental. Certains facteurs présentant un riche potentiel nécessitaient plus de finesse dans l'analyse. Plusieurs niveaux supplémentaires ont donc été explorés. Ce compromis limite le nombre d'essais tout en permettant d'identifier les interactions éventuelles.

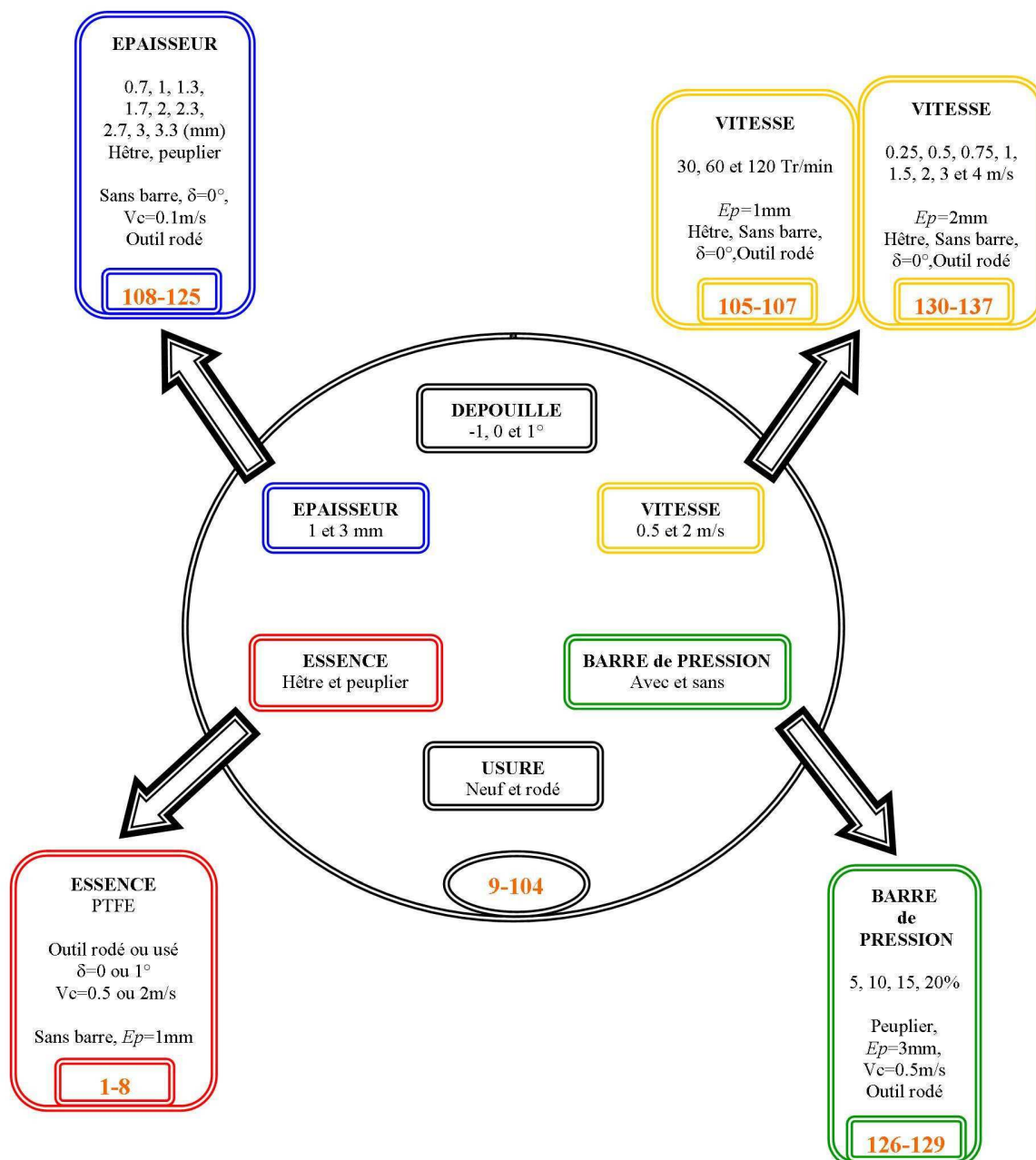


Figure 58 : Schéma de principe des essais réalisés

Pour le plan complet (essais 9-104), les paramètres retenus et leurs niveaux sont :

- Essence : hêtre et peuplier.
- Usure : outil rodé ($50\text{ m} < L_{\text{usinée}} < 350\text{ m}$) ou très dégradé ($L_{\text{usinée}} > 6000\text{ m}$ et arête émoussée artificiellement). Le billon II et une partie du billon I de hêtre ont servi à atteindre les 6000 m d'usinage ($E_p=1\text{mm}$, $V_c=1\text{m/s}$, $\delta=1^\circ$) soit plus de 20 rondelles. L'arête a ensuite été légèrement émoussée en utilisant un papier à grain fin (P800) pour exagérer la valeur du rayon de bec et amplifier la signature de l'usure. Les placages produits sont immédiatement devenus pelucheux, signe d'une usure prononcée. Après 4000 m d'un usinage similaire (essence, réglages, et acier identiques), BEER, dans [BEER_1998], relève un rayon de bec de

l'arête du couteau de 9 μ m. Nous ne pouvions mesurer efficacement ce rayon sans détruire l'outil mais le recul d'arête avoisinant les 178 μ m (moyenne de 13 mesures au microscope optique sur 10 mm centrés sur le milieu de la zone usée de l'outil après la dernière acquisition), il n'est pas déraisonnable de l'estimer entre 20 et 30 μ m.

➤ Valeur de l'angle de dépouille : -1, 0 et 1°. Ces valeurs sont susceptibles de générer les situations de refus de coupe, de plongée d'outil, d'instabilité ou de stabilité de l'outil, selon les autres paramètres.

➤ Epaisseur : 1 et 3 mm qui correspondent aux bornes des épaisseurs les plus couramment déroulées pour ces deux essences.

➤ Pression de la barre : sans barre ou (2.4,0.7) et (0.8,0.5) pour les couples (h,v) respectivement en 3 et 1 mm soit 16.67 et 5.66% de pression. Ces réglages nous ont été proposés par les opérateurs rencontrés (à l'origine pour le hêtre).

➤ Vitesse de coupe : 0.5 et 2 m/s qui s'inscrivent dans les deux domaines identifiés dans [MARCHAL_1989].

Dans le cas du hêtre, les disques 3 à 15 du billon I ont été utilisés pour mener à bien ces essais (12 + 1 détruit lors d'un incident) soit moins de 29 cm sur la hauteur de l'arbre en incluant l'épaisseur du trait de la scie. On peut donc faire l'approximation raisonnable que les propriétés du bois sont stables pour cet échantillonnage. Concernant le peuplier, 24 disques tirés du billon I ont été nécessaires puisque seules deux modalités étaient réalisables par disque. Ce bois étant particulièrement homogène, l'hypothèse précédente reste valide. Rappelons que l'ensemble des disques utilisés ne représente pas plus de 5% de la hauteur totale de l'arbre (en comptant le trait de scie).

Quatre modalités n'ont pas pu être réalisées tant le refus de coupe était important dans le cas du hêtre pour une valeur négative de l'angle de dépouille. Elles correspondaient aux disques 8 et 15 qui n'ont pas résisté aux efforts et se sont fendus. Cette rupture a toujours cheminé par la moelle de l'arbre, signe de la présence de contraintes résiduelles de croissance.

Parmi les paramètres listés, certains sont particulièrement intéressants pour leur influence sur le processus de coupe. Ainsi, l'épaisseur du placage déroulé sans barre de pression va générer des taux de fissurations variables. Neuf modalités ont été pratiquées pour chaque essence (essais 108 à 125). Les réglages choisis (en particulier la vitesse de coupe) et la méthode de préparation des éprouvettes maximisent les chances de respect de l'épaisseur tout en facilitant une étude précise de la fissuration.

Le taux de pression, en déplaçant le plan de coupe, introduit un des plus sévères transitoires du déroulage. Quatre placages de peuplier (essais 126 à 129) de 3 mm d'épaisseur ont été réalisés à partir des disques 7 et 9 du billon II.

La vitesse de coupe conditionne la fréquence d'apparition des défauts recherchés. A ce titre, elle peut influencer la lisibilité de leur signature. Sept essais supplémentaires (essais 130 à 137) ont été réalisés à vitesse linéaire constante pour les disques de hêtre 4 et 5 du billon III. Enfin, les disques 5, 6 et 7 du billon II de hêtre ont été déroulés dans leur totalité à vitesse de rotation constante afin d'en évaluer l'influence sur les signatures vibratoires mesurées. En effet, bien que le régime de coupe ne soit pas constant, cette pratique est parfois utilisée dans l'industrie.

3.3 Déroulement des essais

Tous les essais ont été réalisés en choisissant le rayon initial et le rayon final excepté pour les essais 108 à 125 consacrés à l'étude du rôle de l'épaisseur (mode manuel plus commode).

Le nombre d'essais par rondelle pour les essais 9 à 104 et 126 à 129 a été volontairement limité pour minimiser l'impact de la réduction du diamètre sur la valeur effective de l'angle de dépouille et de la cote horizontale de la barre. Les valeurs des rayons ont été choisies de sorte qu'au moins 5 tours soient effectués et que l'essai dure plus de 2 secondes. Le détail des rayons utilisés pour chaque essai est joint en ANNEXE I.

L'objectif étant, bien entendu, d'enregistrer toute la coupe, l'acquisition était déclenchée lorsque l'effort F_{Xc} excédait 5% de sa valeur courante avec un retard de 150ms. Aussitôt après l'usinage, les placages produits ont été numérotés et immergés dans l'eau pour être analysés a posteriori. La manutention des placages très fissurés était souvent très délicate et leur reconstitution après usinage n'était possible que pour des vitesses de coupe lentes.

4 Caractérisation des placages

4.1 Mesure de la fissuration

Aujourd'hui encore, il n'existe pas de moyen objectif et rapide de caractériser pleinement la fréquence et profondeur des fissures. Les méthodes usitées sont :

➤ l'observation directe : en ligne, une caméra rapide ou un appareil photo capable de prendre des images en rafale permettent de décrire au moins qualitativement (suivant la fréquence d'acquisition) l'évolution de la fissure ([LENEY_1960], [THIBAUT_1988]). Hors-ligne avec une lunette binoculaire, il est possible de les caractériser quantitativement en fléchissant le placage. Cette mesure est toutefois fastidieuse et très délicate à maîtriser. Pour déterminer les distances entre les fissures, il faut la reproduire de nombreuses fois pour un même placage. Sans un système d'entraînement fiable, les risques d'erreurs sont conséquents (cumulatifs).

L'imprégnation permet de mesurer le placage à plat. Le colorant migre dans les fissures qui deviennent plus ou moins bien visibles sur une tranche du placage perpendiculaire au fil du

bois. [MOVASSAGHI_1985] a utilisé du bleu d'Astra (solution aqueuse à 0.5%) en soulignant la difficulté de réaliser des observations de bonne qualité sur des essences à haute perméabilité (aubier de Douglas selon l'auteur). Nous avons tenté d'utiliser ces dosages pour les placages fabriqués mais avec un succès tout relatif. A l'état vert, le colorant migrait très rapidement latéralement et en dehors de la fissure. A hygrométrie stabilisée (12% environ), il avait tendance à ne pas parvenir au fond des fissures.

➤ le moulage du placage dans une résine époxy (araldite blanche): après durcissement, une coupe perpendiculaire au fil du bois permet une bonne observation des fissures avec un grossissement moyen d'après [BOULLLOUD_1972] cité dans [MOVASSAGHI_1985]. Cette méthode est encore plus laborieuse que la précédente. Sa sous-traitance reste très onéreuse et son apport supplémentaire par rapport à la mesure visuelle est assez mince dans notre cadre. Nous avons préféré donc l'écarter.

➤ la flexion : encore aujourd'hui dans l'industrie, les dérouleurs fléchissent le placage entre leurs mains alternativement suivant les deux faces. L'effort nécessaire doit être relativement proche de manière à obtenir un placage suffisamment « serré » ce qui signifie peu fissuré. Cette méthode nécessite une grande pratique pour être répétitive. Pour le moment, les diverses tentatives vers la conception d'un banc spécialisé (flexion 4 points en général) n'ont pas véritablement abouti principalement de par le faible pouvoir discriminant des bancs et les casses fréquentes du placage ([DEVILLARD et POTIN_1996] et [BREGANT et JEAGLE_1997]).

La connaissance des fréquences d'apparition des fissures dans le cas des bois homogènes constitue un indicateur intéressant puisque, rappelons-le, pour une essence donnée, elles sont corrélées négativement à la variation de l'épaisseur.

Nous avons donc été contraints d'utiliser dans un premier temps des méthodes visuelles malgré tout assez limitées. Nous avons alors contribué à la mise au point d'un prototype de machine spécial voué à cette tâche : le Martinomètre.

4.1.1 Approche visuelle

De manière simple, la fréquence moyenne de fissuration d'un placage est le nombre de fissures par unité de longueur multiplié par la vitesse de coupe linéaire. Quand le phénomène est bien marqué, cette mesure est d'autant plus précise que la longueur du placage considéré est grande. Par contre, elle perd en objectivité dès que les fissures deviennent moins visibles. Quelques placages types dont nous reparlerons dans l'analyse, ont subi cette procédure.

Afin d'évaluer la possibilité d'estimer la profondeur des fissures à partir de leur fréquence, six placages verts déroulés sans barre de pression ont été analysés à l'aide d'une binoculaire. Un montage simple, constitué d'un demi cylindre court de 60 mm de diamètre et de son complémentaire (de diamètre $D+2*Ep$), le tout fixé sur une plaque, a été réalisé (cf. Figure 59).

Il fléchit le placage sans risquer d'étendre les fissures (rayon du cylindre proche du rayon de courbure naturel du placage après déroulage) et le maintient en position pendant la mesure. L'épaisseur locale du copeau E_p , la profondeur p et la distance « inter-fissures » d ont été relevées pour chaque fissure du placage à l'aide d'une mire graduée pour un grossissement $\times 20$.

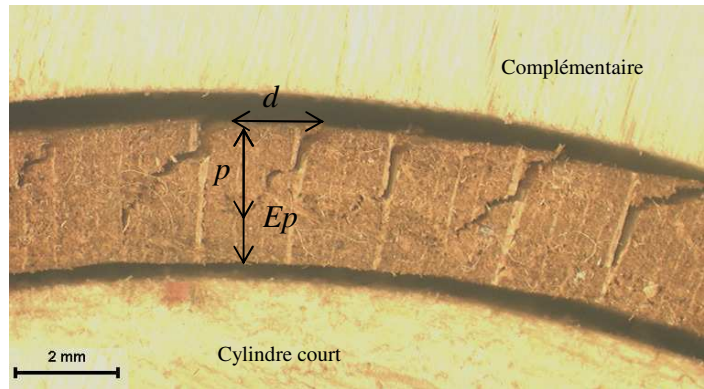
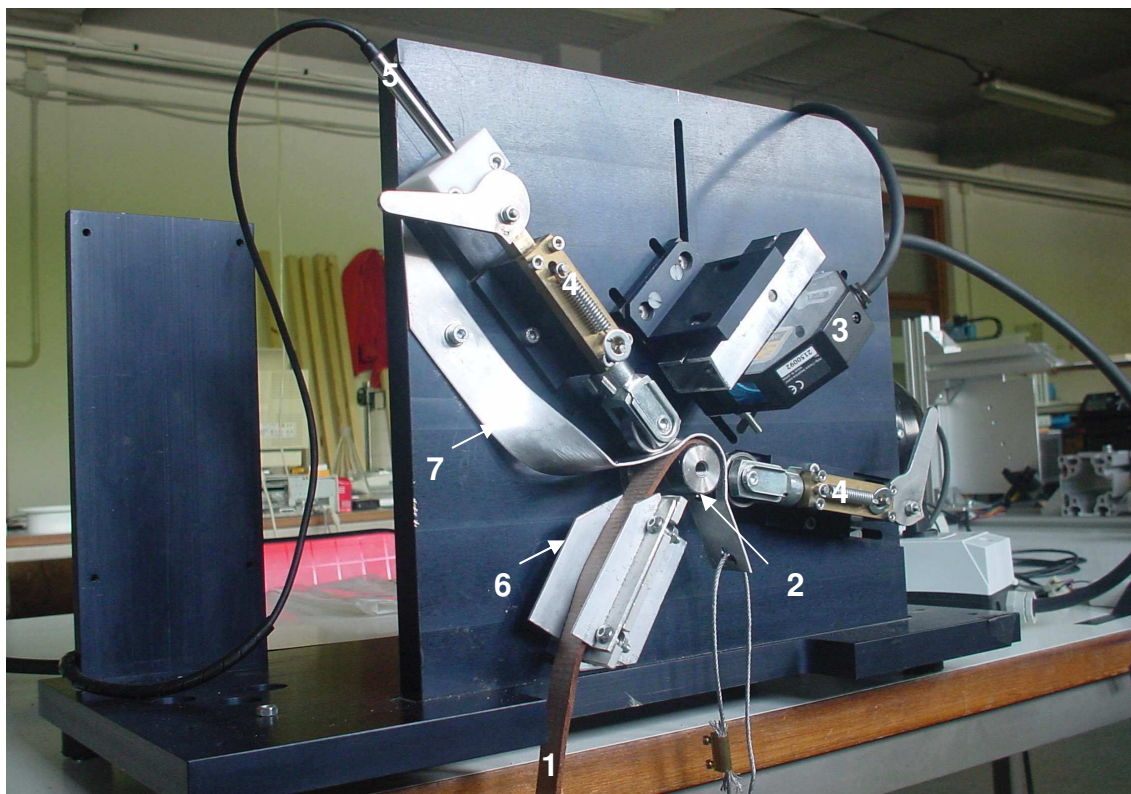


Figure 59 : Placage fissuré de hêtre Gx20

4.1.2 Martinomètre

Une connaissance objective de la position des fissures nous est apparue comme une première étape indispensable. Une des difficultés de cette mesure provient du fait que les fissures se referment et deviennent difficilement détectables lorsqu'on analyse le placage à plat. L'idée la plus prometteuse consistait donc à le fléchir pour rendre ces fissures visibles d'un capteur (sans contact de préférence). Le département de caractérisation non-destructive du bois du laboratoire IVALSA-CNR de Trento (Italie) a développé un prototype basé sur ce principe.



1 : Placage
2 : Arbre du réducteur
3 : Capteur laser

4 : Ensembles de mesure et de maintien du placage
5 : Capteur LVDT

6 : Rail de guidage
7 : Feuille de maintien du placage

Figure 60 : Martinomètre

Le placage (1) est entraîné en rotation par une roue fixée sur l'arbre de sortie d'un réducteur (2) monté sur un moteur. La vitesse de rotation de la roue est fixée (5 Tr/min) afin de limiter les perturbations d'origines électriques. Un capteur laser de déplacement (3) de très bonne précision (Keyence LK-G32 ; résolution théorique de 0.05 μm sur ± 5 mm) mesure le profil de la face supérieure de l'échantillon. Ce dernier est maintenu par deux poussoirs à ressorts munis de roulements à billes de 30 mm de diamètre (4). L'un d'entre eux est équipé d'un capteur (5) LVDT (AT3-004 ; résolution 0.8 μm sur ± 2 mm) qui mesure le déplacement de la face supérieure du placage pendant la mesure sur la largeur du roulement (9 mm). Le guidage du placage est assuré par un rail réglable (6) et une feuille d'aluminium pliée pour épouser la géométrie de la roue (7). Les deux capteurs sont reliés à une carte d'acquisition (NI A/D). Une application spécifique a été développée sous LabView pour collecter les données à une fréquence d'échantillonnage de 1000Hz.

Après plusieurs essais préliminaires, les placages ont finalement été mesurés à 15% d'humidité directement sur l'arbre de sortie du moteur ($D=25\text{mm}$). La présence d'eau libre en surface du placage et, dans une moindre mesure, d'eau liée dans les cellules du bois détériore sévèrement la qualité du signal du laser. L'idéal aurait probablement été de tenter de mesurer les placages au point de saturation des fibres mais le temps nous manquait pour assurer une réelle stabilisation du taux d'humidité. Dans le doute, ils ont été séchés partiellement sachant bien que la réduction de leur longueur allait rendre délicat le calage de ces données avec celles enregistrées pendant la coupe. Ils ont donc été pesés avant et après séchage afin de connaître leur taux d'humidité réel. Leurs profils de densité ont aussi été relevés pour pouvoir recalculer les positions des fissures avant le retrait.

Parallèlement, le petit diamètre de l'arbre a favorisé la croissance des fissures sans toutefois en créer de nouvelles. Cette option ne portera pas à conséquence dans notre démarche qui vise prioritairement à déterminer la position des fissures et non leur profondeur. Pour des placages irrégulièrement fissurés, il faudrait utiliser une roue dont le diamètre soit proche du rayon de courbure naturelle des échantillons. Notons que la détection des fissures risque alors d'être plus délicate.

Les mises au point de cet outillage et du protocole expérimental ont été laborieuses et restent imparfaites. Il s'agit néanmoins d'une première mesure objective de la position des fissures d'un placage sur une grande longueur.

La Figure 61 présente un exemple typique des relevés fournis par le Martinomètre. La position du profil de la face supérieure, assimilée à une mesure de l'épaisseur du placage, sera abordée plus en détail en comparaison avec d'autres techniques par la suite.

Le profil de la face fissurée présente des signatures caractéristiques. Les vallées successives aux pics correspondent aux plus petites distances entre le placage et le capteur c'est-à-dire au bord de la lèvres supérieure de chaque fissure qui constitue une référence naturelle pour déterminer la position de leur ouverture.

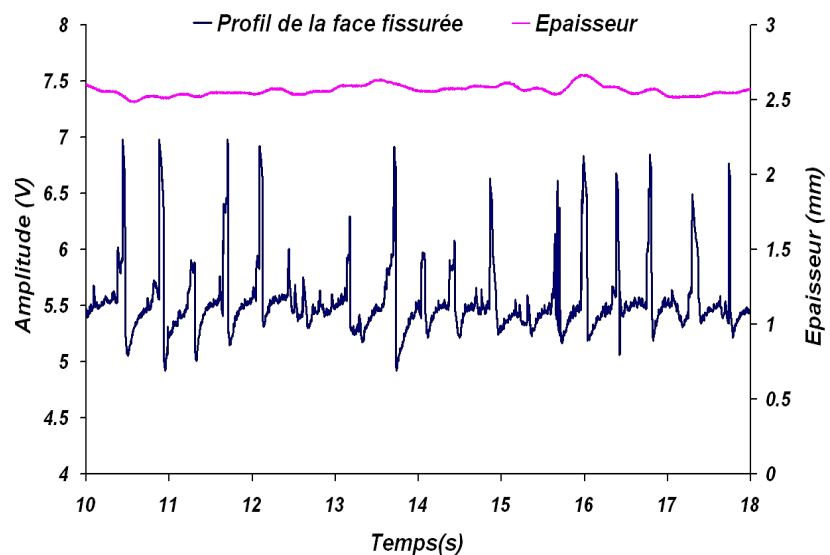


Figure 61 : Relevé typique du martinomètre (hêtre, sans barre, $E_p=2.7\text{mm}$)

Pour remonter à cette distance à partir des données temporelles, il suffit d'utiliser la vitesse linéaire en périphérie de la roue de guidage qui correspond bien à celle de défilement du placage « fermé ».

Le faisceau du laser arrive faiblement incliné par rapport à la tangente à la surface du placage (angle 45° et positionnement du faisceau quasiment sous le roulement du capteur LVDT). Cette configuration maximise la détection de la fissure en introduisant une brusque variation du signal au passage d'une lèvre à l'autre (pics Figure 61). En contrepartie, elle introduit une indétermination mineure sur la position réelle de la lèvre supérieure. En effet, suivant la géométrie de la lèvre, le faisceau parcourt une distance plus ou moins longue avant de passer de l'intérieur à l'extérieur de celle-ci. Concrètement, sur le signal, cela se traduit par une vallée d'autant plus pentue que la lèvre est aigüe.

Les placages produits lors des essais 108 à 125 ont été analysés pour leurs faciès de fissurations typiques.

4.2 Mesures de densité

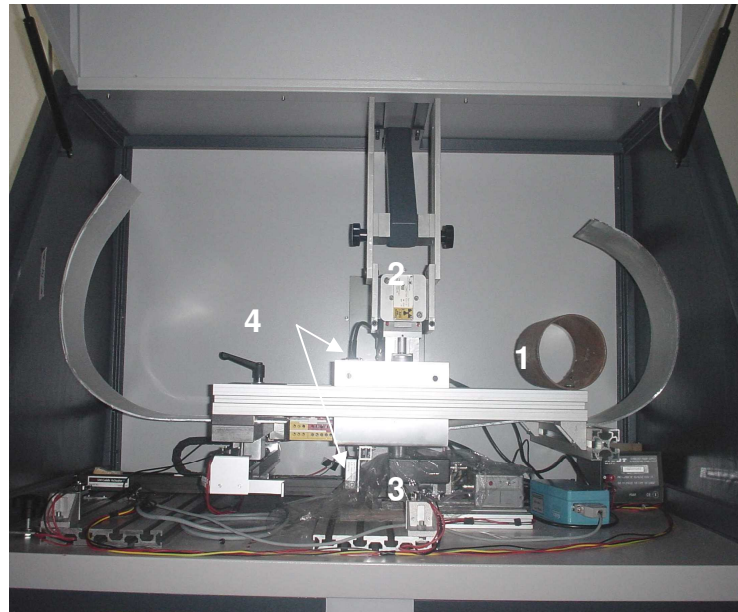
Ce système, initialement équipé d'une table XY, permettait de mesurer une carte de densité d'un échantillon de type panneau, planche ou feuille. Il a été modifié par le Dr. SANDAK afin de dresser rapidement un profil de densité d'un placage produit avec la microdériveuse (faible largeur et grande longueur). Un prototype de système d'entraînement a été réalisé à partir d'éléments modulaires. Une douzaine de roues caoutchoutées de faible diamètre et reliées à un petit moteur à courant continu roulent sans glisser sur les deux faces du placage qui translate ainsi à vitesse constante. Le contact est maintenu à l'aide d'un élastique qui présente l'avantage de tolérer les fortes ondulations du placage. L'échantillon, préalablement enroulé autour du tube (1), passe entre un générateur de rayons X (2) et une photodiode réceptrice (3) (Hamamatsu, S8559 reliée à un amplificateur C9051). Ce capteur mesure

l'intensité du signal transmis qui est fonction de la densité, de l'épaisseur et du taux d'humidité du bois (cf. Équation 23).

Aussi, deux capteurs lasers (4) (M5L/10 et ILD 1400-50(00)) montés tête-bêche sont placés juste après la source. Ils mesurent les deux faces du placage, donnant accès à son épaisseur locale par différence des signaux. Une application (développée sous Labview VI) permet d'acquérir les données des trois capteurs par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition (NI A/D, fréquence d'échantillonnage choisie de 1000 Hz). Un relevé obtenu pour un placage de Douglas ($E_p=2.3$ mm) est joint (cf. Figure 63.).

Il existe un décalage temporel entre les signaux des lasers et celui de la photodiode dont l'origine est physique (acquisition simultanée mais lieu de mesure différents). La vitesse de défilement est quasiment constante (45.25 mm/s ± 0.25 d'après nos mesures). Il est aisé de recalibrer les données les unes par rapport aux autres, ce qui a été fait sur la figure ci-contre.

Le diamètre du faisceau des rayons X émis par la source a été réglé à sa valeur minimale soit 1 mm. Cela signifie que chaque point de mesure donne une image de la densité du placage lissée sur le petit cylindre correspondant. Par contre, le pas de la mesure, défini par le rapport de la vitesse de défilement et de la fréquence d'échantillonnage, est inférieur à 5 centièmes de mm. On dispose donc d'une information précise mais lissée sur la taille du diamètre du faisceau ce qui implique un filtrage des signaux.



1 : Tube support du placage 3 : Photodiode et amplificateur
2 : Générateur de rayons X 4 : Capteurs laser de déplacement

Figure 62 : Montage de mesure du profil de densité d'un placage

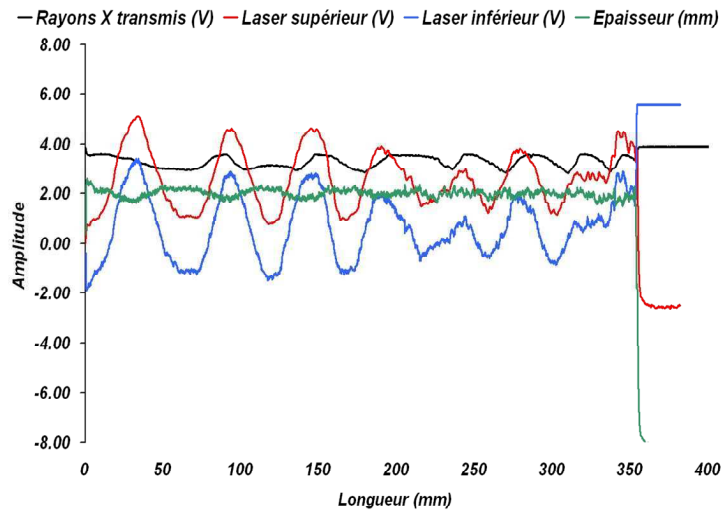


Figure 63 : Mesure d'un placage de Douglas de 2.3 mm d'épaisseur avec le densimètre expérimental

A partir de ces informations (absorption, épaisseur et hygrométrie moyenne), nous avons pu déterminer le profil de densité des échantillons partiellement séchés (environ 15% d'humidité) des essais 108 à 125.

4.3 Mesures des variations d'épaisseur

4.3.1 Mesures en ligne

Le capteur LVDT de mesure de déplacement monté sur la microdériveuse donne une précieuse information en ligne de la valeur de la surépaisseur. Il est muni d'un roulement à bille de 5 mm de diamètre qui reste en contact avec la surface du billon fraîchement usinée. Malheureusement, sa technologie mécanique ne lui autorise pas une grande dynamique : pas plus d'une vingtaine de Hertz pour une amplitude de quelques dixièmes de millimètres d'après le fabricant. Concrètement, ce capteur ne pourra nous fournir qu'une indication sur des variations lentes de l'épaisseur du placage puisqu'il requiert un fort filtrage.

Il a été employé pour les essais 1 à 108 dont 97 ont fourni un signal exploitable (7 enregistrements sont noyés dans le bruit de fond en plus des 4 configurations déjà citées).

Cependant, cette information reste insuffisante pour caractériser avec précision les variations d'épaisseur rapides pendant la coupe. D'autres dispositifs, encore au stade de prototypes, ont dû être testés. L'analyse des résultats nous permettra quelques réflexions sur leurs principes et leurs performances respectives.

4.3.2 Utilisation du Martinomètre et du densimètre

Les mesures des épaisseurs obtenues des deux appareils ont été effectuées simultanément avec celle de la fissuration et de la densité. Elles concernent donc les mêmes échantillons.

On assimilera les mesures effectuées sur un profil du placage à son épaisseur moyenne. Cette approximation est en général minimale mais pour certains copeaux épais et profondément fissurés, il est possible d'observer des variations importantes de l'épaisseur plus marquées sur un bord que sur l'autre, et dont la fréquence avoisine celle des fissures. Ce phénomène est typique du déroulage de bois dense sans étuvage préalable (défini comme placage rugueux en III.3.2.2). La mesure issue du capteur LVDT du martinomètre sera plus sensible aux arrachements (roulement large de 9 mm) que celle obtenue à partir des deux lasers du densimètre qui est par nature plus locale.

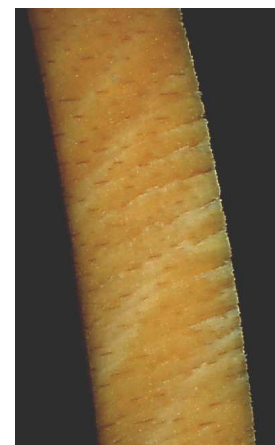


Figure 64 : Placage rugueux

En effet, les deux capteurs laser du densimètre fournissent les profils des deux faces d'un placage au même point. La différence des deux signaux est donc une véritable mesure de l'épaisseur selon un profil.

Pour les deux systèmes, les sensibilités des capteurs utilisés et le pas de mesure sont inférieurs au dixième de mm ce qui est largement suffisant compte tenu de la précision nécessaire à la caractérisation de l'épaisseur d'un placage de bois vert. Par contre, comme pour la mesure de densité, la zone sur laquelle cette information est obtenue est beaucoup plus vaste. La technologie des capteurs (PCD) renvoie l'intensité du barycentre des points du spot. On ne dispose alors que d'une image lissée sur cette zone de la valeur recherchée qui implique un filtrage des mesures.

De même, lorsque le roulement de 30 mm de diamètre, qui joue le rôle d'un palpeur pour le capteur LVDT, s'enfonce d'un dixième de mm dans le bois, la largeur de contact est proche de 5 dixièmes de mm. Il sera important de tenir compte de ces restrictions dans l'analyse.

Contrairement aux données recueillies pendant la coupe, l'utilisation du martinomètre et du densimètre a nécessité un séchage partiel des échantillons qui se traduit par une réduction de l'épaisseur théoriquement déroulée. En effet, la teneur en eau reste un facteur critique en favorisant la diffusion du rayon des lasers. Les essais préliminaires menés sur les placages verts les plus minces et les moins denses (peuplier, $Ep=0.7$ mm) avaient fourni des épaisseurs moyennes nulles, voire négatives!

A partir de coefficients de retrait radiaux moyens par essence (0.0025 pour le peuplier et 0.0022 pour le hêtre par % d'humidité) proposés dans [GUITARD_1994], il nous sera possible d'évaluer l'influence de ce retrait sur les mesures. Dans cette direction, on pourra sans risque supposer les différences locales de densité comme négligeables.

4.4 Le cas de l'état de surface

La surface d'un placage déroulé se présente schématiquement comme une succession de deux ou trois marches d'escaliers d'une trentaine de microns de côté (diamètre d'une cellule), le tout oscillant dans une bande d'un dixième de millimètre environ d'après les observations de [THIBAUT_1988]. La mesure, évoquée dans [DENAUD et al_2003], des profils primaires de l'état de surface de placages de *dodomissinga* (*Parkia sp.*) ou de grignon franc (*Ocotea rubra Mez*) à l'aide d'un perthomètre muni d'un palpeur confirme cette modélisation. L'information est précieuse puisque l'échelle de mesures est large par rapport aux capacités actuelles des appareils. Les difficultés proviennent plutôt de la nature même du matériau.

Nous avons donc pour objectif la mesure des arrachements locaux (surfaces pelucheuses ou rugueuses). Un système de palpation mécanique est mal adapté comme nous l'avons expliqué. Les techniques optiques semblent plus adéquates mais le problème soulevé dans le paragraphe précédent exclut leur emploi pour des échantillons encore humides, même partiellement. Un

profil est bien relevé mais il ne s'agit pas de la surface de placage au sens propre du terme. Seule la mesure d'un placage à l'état anhydre est susceptible de fournir cette information. Les distorsions locales dues au retrait risquent d'être considérables à l'échelle cellulaire. De plus l'opération de séchage a de fortes chances d'évacuer une grande partie des fibres des surfaces pelucheuses.

Bien que les moyens de mesure actuels laissent entrevoir des résolutions extrêmement élevées, le problème reste entier dès qu'il s'agit de bois vert. Nous nous limiterons donc à une qualification visuelle de l'état de surface des placages générés.

PARTIE V : Approche temporelle du déroulage : analyse phénoménologique globale

Comme nous l'avons déjà évoqué, le domaine du temps permet des niveaux de description multiples. Une première observation à l'aide de critères simples est utile afin d'orienter des analyses plus fines et d'éviter de grossières erreurs. Ce contexte général permet d'appréhender les grandes tendances du comportement vibratoire et acoustique de la machine pendant la coupe qui n'a été abordé que de manière parcellaire dans le cas du déroulage, comme nous l'avons constaté dans la partie III.

Pour mener à bien cette tâche, l'analyse des efforts de coupe et bien entendu de la qualité du produit constituent des repères solides. Les mesures de la fissuration moyenne et celles des variations d'épaisseur obtenues pendant la coupe sont toutes indiquées pour un tel niveau d'observation ce qui privilégie l'emploi des configurations expérimentales 9 à 104 (sans interdire le recours à des essais supplémentaires le cas échéant). En particulier, les résultats des essais de déroulage de PTFE seront utilisés ponctuellement lorsqu'ils permettent de clarifier l'analyse. Concernant l'état de surface, les limitations inhérentes aux capacités des appareillages, compte tenu de la spécificité du matériau, nous amènent à classer visuellement les placages.

Pour tous les calculs de corrélations, les valeurs des paramètres ont été définies de manière suivante : angle de dépouille (-1, 0 et 1), épaisseur (1 et 3), vitesse (0.5 et 2), barre de pression (0 ou 1 pour « avec » ou « sans », excepté pour le suivi de l'épaisseur où les valeurs réelles du taux de compression ont été employées), usure (0 ou 1 pour « rodé » ou « usé ») et essence (1 ou 2 pour le hêtre ou le peuplier). Les choix arbitraires pour les facteurs du plan d'expérience à deux niveaux n'ont aucune incidence sur la détermination des coefficients de corrélation. Ces derniers seront généralement directement suivis de leur signification statistique. Les taux de confiance supérieurs à 99,99% seront notés comme égaux à 100% par convention pour éviter la confusion puisque la précision des calculs ne permet pas d'excéder deux chiffres significatifs.

1 Qualité globale du placage

1.1 Etat de surface

L'observation des placages nous conduit à identifier trois familles d'états de surface.

(a) : Les placages pelucheux sont toujours et uniquement obtenus avec un outil usé. Même pour les essais complémentaires menés à basse vitesse (0.1 m/s), un bon affûtage de

l'outil permet d'obtenir des placages exempts de peluche. Conformément aux observations de la littérature, les placages de peuplier sont nettement plus pelucheux que ceux de hêtre.

(b) : La seconde classe est constituée uniquement de placages de hêtre déroulés sans barre de pression de 2.7 mm d'épaisseur et plus, avec un outil bien affûté. Elle se caractérise par la présence de fortes variations d'épaisseur dont la période avoisine celle de la fissuration (cf. IV.4.3.2). Ce phénomène, observable uniquement suite à un traitement hygrothermique insuffisant, reste assez localisé puisqu'il ne concerne que quelques centimètres par tours. Les arrachements laissés sur le billon (cas extrême sur la Figure 65) favorisent l'entretien d'une périodicité du phénomène sur un tour, probablement liée à l'orientation du plan de coupe.



Figure 65 : Arrachements sur le billon de hêtre suite à la fabrication d'un placage rugueux

Certains placages de peuplier, obtenus dans des conditions similaires, présentaient aussi des arrachements mais beaucoup moins nets que dans le cas du hêtre. Plus difficilement identifiables et très probablement causés par le mécanisme de fissuration, ces arrachements ne feront pas l'objet d'une nouvelle catégorie de placages.

(c) : La dernière classe regroupe tous les placages restants c'est-à-dire ceux dont l'aspect général était « satisfaisant ». Cette dichotomie, bien que peu discriminante, sied assez bien à une grande échelle d'observation. Par contre, une caractérisation quantitative précise de l'état de surface reste inaccessible.

1.2 La fissuration

1.2.1 Fissuration moyenne des placages

Parmi les essais qui ont été détaillés en IV.3.2, l'identification des conditions expérimentales propices à la formation de fissures est simple. Tous les essais réalisés sans barre au-delà de 1 mm d'épaisseur pour le hêtre et 1.3 mm pour le peuplier sont fissurés de manière nette. Pour tous les essais du plan complet où la barre de pression a été employée, aucune fissure de type « classique » n'a pu être observée dès la fin du premier tour de déroulage où l'épaisseur nominale est atteinte. Par contre, les essais 126 et 127, réalisés sur du peuplier en 3 mm d'épaisseur pour des taux de pression de 5 et 10%, ont produit des placages fissurés ce qui suggère un réglage optimal¹⁵ au-delà de 10 % de l'épaisseur.

¹⁵ Cette remarque concerne essentiellement le cas de la fissuration. Le réglage définitif de la barre est un compromis entre fissuration et variations d'épaisseur du placage.

Dans cette approche globale du procédé, nous avons choisi de traiter essentiellement les configurations issues du plan complet. La mesure de la fréquence de fissuration moyenne des placages est assez précise lorsque les fissures sont bien marquées et lorsqu'elles s'étendent d'une extrémité à l'autre des placages. Les copeaux de 3 mm d'épaisseur n'ont donc pas posé de difficulté particulière. L'usure n'étant pas, a priori, un facteur perturbateur du mécanisme de fissuration, seules les modalités « outil rodé » ont été étudiées.

Le Tableau 8 présente le nombre moyen de fissures par mètre de placage pour différentes configurations expérimentales susceptibles d'intervenir sur le mécanisme de fissuration. En effet, l'état de l'art nous a montré que les contributions du réglage de l'outil (angle de dépouille) et de la vitesse de coupe ne sont pas complètement tranchées. La fréquence moyenne, exprimée en Hz, correspond à la fréquence supposée d'apparition des fissures lors des acquisitions (moyennant une vitesse de coupe égale à la consigne). Nous serons amenés à détailler davantage ce point dans la partie VI.

Angle de dépouille (°)	Vitesse linéaire (m/s)	Essence	Nombre moyen de fissures par mètre	Fréquence moyenne (Hz)
-1	0.5	hêtre	318	159
0	0.5	hêtre	346	173
1	0.5	hêtre	334	167
-1	2	hêtre	358	716
0	2	hêtre	294	589
1	2	hêtre	328	656
-1	0.5	peuplier	266	133
0	0.5	peuplier	260	130
1	0.5	peuplier	268	134
-1	2	peuplier	283	565
0	2	peuplier	293	586
1	2	peuplier	281	562

Tableau 8 : Fissuration moyenne des placages (peuplier et hêtre, $E_p=3\text{mm}$, outil rodé)

Chaque valeur moyenne est le fruit de la mesure sur au moins 800 mm de placages (jusqu'à 2000 mm mais pas forcément consécutifs). L'écart type des mesures reste compris entre 10 et 30 fissures par mètre ce qui montre bien que le phénomène de fissuration n'est pas parfaitement périodique, en particulier pour le hêtre. Comme l'avait souligné [MOVASSAGHI_1985], l'orientation du plan de coupe et la nature du plan ligneux jouent un rôle essentiel dans ce mécanisme.

Seule l'essence influence de manière significative la fréquence moyenne d'apparition des fissures ($r=-0.8559$ à 99.96%) à épaisseur constante. Elles sont donc plus nombreuses à épaisseur égale pour le hêtre que pour le peuplier. Par contre, pour les essais réalisés à partir de peuplier uniquement, la vitesse de coupe favorise la formation de fissures ($r=0.9216$ à 99.10%). Le fait que cette relation ne soit pas sensible pour le hêtre dont le plan ligneux, par la présence des rayons notamment, est plus à même de perturber le mécanisme de fissuration explique en partie pourquoi cette tendance n'a pas été clairement mise à jour dans la littérature. De plus, toujours concernant le hêtre, la présence d'arrachements évoqués dans le paragraphe précédent diminue singulièrement la fréquence d'apparition des fissures (257 ondulations par mètre en moyenne). Suivant la proportion des placages atteints par ce défaut, les mesures ont plus ou moins été polluées par rapport à un mécanisme de fissuration « idéal ».

L'analyse fréquentielle des données proposée dans la partie suivante nous fournira des éléments de réponse sur ce point.

Pour les placages de hêtre de 1 mm d'épaisseur, la difficulté de mesure liée à l'identification des fissures rend délicate leur exploitation directe puisque le nombre moyen de fissures par mètre oscille entre 718 et 1111 (moyenne totale de 888) pour les mêmes configurations expérimentales que précédemment. On ne dispose donc que d'un ordre d'idée assez vague de la fréquence d'apparition dans ce cas. La situation est encore plus délicate pour les placages de peuplier de 1 mm d'épaisseur où des zones faiblement fissurées et des zones indemnes se côtoient. Nous avons préféré renoncer à cette mesure dont le sens est très altéré (fréquence de fissuration inférieure à celle obtenue pour des placages plus épais).

L'intérêt de ces mesures serait grandement accru si elles ouvraient l'accès à une information, même peu précise, sur la profondeur des fissures, ce qui n'a pas été clairement traité dans le passé.

1.2.2 Lien entre fréquence et profondeur des fissures

Un élément de placage de hêtre d'épaisseur variable (de 2 à 4 mm, résultat du premier tour de déroulage) a été caractérisé suivant le protocole décrit en IV.4.1.1. Le pas de la fissuration est très significativement corrélé à l'épaisseur du copeau et à la profondeur relative des fissures (respectivement 0.3005 et 0.3584 à 100%, 208 ddl). La profondeur relative augmente aussi avec l'épaisseur déroulée (0.4612 à 100%) ce qui parachève la vérification des tendances mises à jour dans la littérature ([MOVASSAGHI_1985] et [THIBAUT_1988] notamment).

Deux placages de peuplier et trois de hêtre d'épaisseur quasiment constantes ont été caractérisés suivant le même protocole. Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant.

	Nombre de fissures	Epaisseur moyenne (mm) / Ecart type (%)	Pas moyen (mm) / Ecart type (%)	Profondeur moyenne (mm) / Ecart type (%)	r (pas/profondeur)	Signification statistique (%)
Peuplier 1	119	3.37 / 4	4.11 / 31	1.77 / 29	0.2009	97.15
Peuplier 2	75	3.52 / 2	4.20 / 29	1.94 / 22	0.2342	95.69
Hêtre 1	124	3.55 / 1	3.52 / 31	1.94 / 24	0.2290	98.95
Hêtre 2	124	3.56 / 1	3.83 / 28	2.10 / 23	-0.0006	0.52
Hêtre 3	123	2.97 / 2	2.89 / 27	2.06 / 28	0.1909	96.66

Tableau 9 : Lien entre la profondeur et le pas des fissures pour 5 placages fortement fissurés

(hêtre et peuplier, $V_c = 0.5\text{m/s}$, sans barre, $\delta = 0^\circ$)

Le pas et la profondeur des fissures sont significativement corrélés pour 4 des 5 placages mesurés¹⁶. Ce lien n'est donc pas seulement significatif lorsque l'épaisseur du placage varie

¹⁶ Le très faible taux de corrélation obtenu pour le second placage de hêtre suggère une erreur de mesure.

mais aussi lorsqu'elle est constante. Néanmoins, il est relativement faible puisque la fréquence n'explique pas plus de 6 % de la variance totale de la profondeur des fissures. En effet, d'autres facteurs, dont en particulier le plan ligneux, sont susceptibles d'influencer fortement leur propagation comme la photographie présentée en IV.4.1.1. (Figure 59) l'illustre pour les rayons ligneux dans le cas du hêtre.

1.3 Variation d'épaisseur en ligne

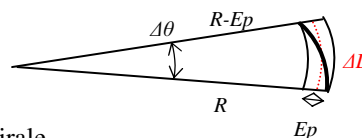
Etant donné les caractéristiques du capteur LVDT, les 93 signaux concernés (8 essais de déroulage de PTFE ajoutés aux 92 réalisés à partir de bois dont 85 ont fourni des mesures d'épaisseur utilisables) ont préalablement été filtrés (Butterworth, ordre 3, fréquence de coupure notée $f_c=20$ Hz). Le maigre déphasage introduit par cette opération n'est pas du tout pénalisant pour cette analyse.

1.3.1 Méthodologie

A partir d'une mesure de sur-épaisseur (signal EP), il est possible de retrouver l'épaisseur réelle du placage produit. Il suffit de soustraire les relevés de deux tours successifs pour une même position angulaire. Pour les essais à vitesse linéaire constante, il faut alors ré-échantillonner les données suivant un pas angulaire constant. Seule la connaissance de la loi de vitesse de la machine peut permettre d'effectuer rigoureusement cette opération. Ne disposant pas de cette information, nous avons été contraints de supposer un comportement idéal du moteur de broche, c'est-à-dire une accélération égale à la consigne idéale.

La trajectoire suivie par l'outil est une spirale passant par le rayon initial et dont le pas est l'épaisseur nominale du placage. On peut assimiler la petite longueur ΔL d'une portion de spirale parcourue pour un petit angle $\Delta\theta$ à celle de l'arc de cercle médian soit :

$$\Delta L = \Delta\theta \left(R - \frac{\Delta\theta}{2\pi} \frac{Ep}{2} \right)$$



Équation 19 : Longueur d'une portion élémentaire de spirale

En sommant pour un nombre n de petits éléments de spirale, on obtient la longueur de la portion de spire considérée.

$$L_n = n * \Delta\theta \left(R_i - n \frac{\Delta\theta}{2\pi} \frac{Ep}{2} \right) \quad \text{où } R_i \text{ est le rayon initial du début de l'usinage}$$

Équation 20 : Longueur d'une spirale comptant n éléments angulaires

Il suffit alors d'intégrer la fréquence d'échantillonnage et la vitesse de coupe pour en déduire le nombre de points N_m à considérer pour une portion angulaire m donnée. Nous avons choisi 1000 points par tours pour effectuer cet échantillonnage ce qui représente une précision largement suffisante.

$$N_m = \frac{f_e}{Vc} 2\pi \frac{m}{1000} \left(R_i - \frac{m}{1000} \frac{Ep}{2} \right)$$

Équation 21 : Nombre de points à considérer pour une spirale comptant m millièmes de tours

Le nombre de points à moyenner pour une portion angulaire d'un millième de tours comprise entre m et $m+1$ est obtenu par la différence des parties entières de N_{m+1} et N_m . Cette approche permet de calculer la différence de longueur entre deux portions successives d'une même spire en limitant l'erreur commise. En effet, un échantillonnage s'effectue sur un nombre entier de points. En sommant chaque petit élément de la spirale, on risque de cumuler les erreurs d'arrondis dans le calcul. La soustraction des longueurs supposées ne présente pas cet effet cumulatif des erreurs.

Cependant, on perçoit bien la sensibilité de cette formulation aux conditions expérimentales et en particulier à la vitesse réelle de la coupe. Le nombre de points de calcul n'est qu'une image du temps supposé de parcours de l'outil (l'incertitude sur la fréquence d'échantillonnage est négligeable). Ce temps est le rapport de la vitesse linéaire sur la longueur usinée. Leurs incertitudes relatives se somment.

$$dL = \frac{\partial L}{\partial Ri} dRi + \frac{\partial L}{\partial Ep} dEp \text{ soit pour } n \text{ éléments de tours}$$

$$\frac{\delta L_n}{L_n} = \frac{\delta Ri}{Ri - \frac{n\Delta\theta}{2\pi} \frac{Ep}{2}} + \frac{n\Delta\theta}{2\pi} \frac{\delta Ep}{2(Ri - \frac{n\Delta\theta}{2\pi} \frac{Ep}{2})}$$

Équation 22 : Incertitude sur la longueur usinée

On peut supposer que l'avance est bien maîtrisée (incertitude de 0.01 mm selon [DECES-PETIT_1996]). De même, bien que la valeur de rayon initial ne soit connue qu'au millimètre près, son influence reste faible dès que le rayon de déroulage est suffisamment important. Un simple calcul pour des valeurs types (8 tours avec $70 < Ri < 250$ mm, et $0.5 < Ep < 3.5$ mm) montre que l'incertitude de mesure n'excède pas 1.5% dans le cas du peuplier (billon de diamètre relativement faibles) et 1% pour le hêtre.

L'incertitude sur la valeur de vitesse linéaire est très sensible aux grands rayons et aux faibles vitesses. Pour les plages de variation des paramètres proposées dans le calcul précédent et pour des vitesses allant de 0.1 à 5 m/s, l'incertitude relative sur la vitesse passe de 80 à 2% ! Dans les essais concernés par le mesure de la sur-épaisseur, elle n'excède pas 12% ce qui est tout de même considérable.

Le ré-échantillonnage s'effectue donc avec une incertitude frôlant les 14% sur le temps, ou la longueur usinée, dans les cas les plus défavorables. En général, elle se situe plutôt près de 10% à faible vitesse et entre 5 et 6 % à forte vitesse. L'impossibilité de connaître la loi de

vitesse du moteur de broche constitue un écueil majeur pour la précision des résultats. Néanmoins, elle n'interdit pas les interprétations physiques des phénomènes les plus marqués.

Il ne reste plus alors qu'à soustraire les relevés du capteur obtenus pour deux tours successifs afin de connaître l'épaisseur réelle du placage produit. Cette démarche a été appliquée au signal EP de chacun des 93 essais concernés.

1.3.2 Exemples de résultats

La figure suivante représente trois situations caractéristiques de conditions de coupe utilisées. L'origine a été définie lorsque l'épaisseur déroulée devient non nulle (fin du refus de coupe initial). L'essai 36 est typique des observations de plusieurs auteurs pour des conditions de coupe comparables (sans barre, dépouille nulle, faible épaisseur, faible vitesse). L'outil refuse légèrement la coupe puis plonge dans le billon avant d'osciller faiblement (± 0.04 mm) en tendant lentement vers l'épaisseur nominale. La période d'oscillation moyenne semble s'étaler sur deux tours.

Il s'agit d'un mécanisme bien connu en l'absence de barre de pression où une faible dépouille combinée à une fine épaisseur confère une certaine instabilité au processus. Un léger refus de coupe est accompagné, le tour suivant, d'une faible plongée d'outil. Ce régime peut se poursuivre pendant de nombreux tours avant de se stabiliser.

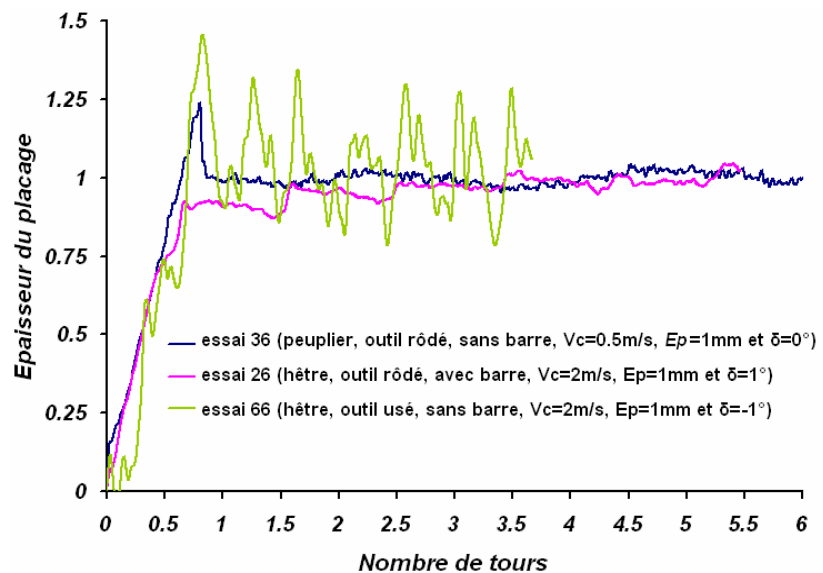


Figure 66 : Epaisseurs de trois placages en fonction du nombre de tours

Pour mesurer la période moyenne des oscillations lorsque celles-ci existent, un fort filtrage a été appliqué afin de ne conserver que les très basses composantes fréquentielles (f_c entre 1 et 10 Hz suivant les ondulations recherchées). La détection des maximums ou des minimums locaux étant grandement facilitée, un algorithme disponible sous Labview a été utilisé. La moyenne de la différence de leurs abscisses fournit une mesure simple de cette période qui vaut 2.167 tours pour l'essai 36. En tenant compte de l'incertitude de mesure et de la réalité physique du procédé, on peut raisonnablement penser qu'il s'agit bien d'une périodicité sur deux tours.

Le second placage (essai 26) présenté est typique de réglages acceptables et fréquemment employés dans l'industrie. Pourtant, l'épaisseur varie singulièrement tout au long de l'essai.

Elle n'est d'ailleurs pas encore stabilisée en fin d'acquisition. On retrouve le mécanisme décrit notamment par [HOADLEY_1962] et [THIBAUT_1988]. Dès le premier tour, le plan de coupe théorique est repoussé sous l'action de la barre ce qui réduit l'épaisseur réelle du copeau produit. Pendant les tours suivants, le décalage est peu à peu réduit ce qui se traduit par une compression de plus en plus intense du bois avant d'atteindre un équilibre. L'observation du signal brut du capteur de sur-épaisseur est éloquent. Par exemple, pour un placage de 3 mm d'épaisseur de hêtre, il se stabilise à une valeur excédant la côte nominale de 0.5 mm voir davantage. La période d'oscillation moyenne, 0.932 tours, est proche d'un tours et on peut une nouvelle fois considérer que ce décalage tire son origine de l'incertitude sur la vitesse de coupe.

Enfin, le troisième enregistrement (essai 66) est le fruit de conditions de coupe très défavorables. La combinaison « faible » épaisseur, absence d'une barre de pression, outils fortement usé, dépouille négative et vitesse de coupe élevée pour une essence qui se déroule industriellement à chaud provoque bien évidemment des perturbation majeures dans la genèse du copeau, à commencer par le refus de coupe. Non présenté sur la Figure 66, il s'étale sur près d'un tour ce qui explique la forte plongée qui s'en suit et la moyenne des oscillations plutôt supérieure à la cote nominale dans les tout premiers tours. Le temps de stabilisation est indéniablement plus long que lorsque la dépouille est positive et que l'outil est correctement affûté. On peut remarquer aussi la trace laissée par une mise au rond imparfaite du billon sur la rampe d'épaisseur du premier tour de déroulage. Cette opération s'effectuait juste avant l'acquisition c'est-à-dire avec un outil très dégradé dans ce cas.

L'amplitude des oscillations, proche de 0.5 mm, diminue très lentement sur ces premiers tours. Leur période moyenne principale s'étale sur 0.448 tours soit environ un demi tour. Elle semble aussi accompagnée d'une oscillation dont la fréquence est double mais nous nous garderons de descendre en deçà, étant donné le filtrage à 20 Hz appliqué en temporel (faible réponse dynamique du capteur).

Ces quelques exemples nous permettent déjà de valider un de nos objectifs : produire des variations d'épaisseur typiques du procédé. Il ne nous reste plus qu'à exploiter ces données de manière systématique afin d'en identifier les paramètres clefs.

1.3.3 Analyse des mesures de l'épaisseur des placages

Pour simplifier le traitement des données, le premier tour de déroulage a été exclu du calcul des paramètres de description de l'épaisseur ce qui n'interdit pas la prise en compte de ses conséquences dans les tours suivants.

Les positions d'apparition des valeurs maximales et minimales (P_{min} et P_{max}), l'écart type, les coefficients d'asymétrie (Skewness) et d'aplatissement (Kurtosis) de la distribution des mesures de l'épaisseur ont été calculés pour chaque essai à partir du début du second tour. Ces

paramètres ont tous été choisis pour leur capacité à décrire les instabilités de la mesure de l'épaisseur. La portion de placage sur laquelle s'effectue le calcul des critères et la nature de Pmin et Pmax sont précisés sur la Figure 67. Il s'agit du profil du placage de 3 mm d'épaisseur obtenu en présence de la barre de pression lors de l'essai 27.

La moyenne est en fait un indicateur pauvre pour une telle application où même de fortes oscillations peuvent ne pas apparaître. Par contre, l'écart type, qui décrit la dispersion des mesures autour de la moyenne, est a priori mieux adapté pour le suivi des variations d'épaisseur. Les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement, moments d'ordre 3 et 4, parachèvent la description de la distribution des données. Enfin, plutôt que d'utiliser la position du maximum local, nous nous lui préférons le rapport P_{max}/nb où nb représente le nombre d'échantillons.

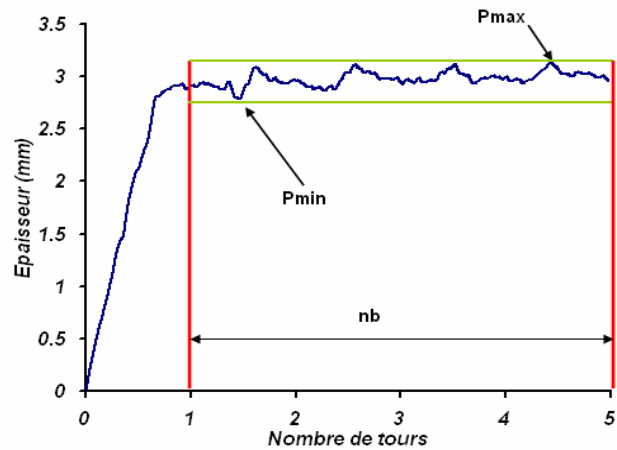


Figure 67 : Représentation des critères retenus pour l'essai 27 (hêtre, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=2\text{m/s}$, $\delta=1^\circ$, avec barre, outil rodé)

De cette manière, on réduit le biais lié à la longueur de l'essai. Cette précaution n'est pas souhaitable pour la position du minimum local qui est souvent obtenue en début d'essai, notamment en présence de la barre. Au contraire, elle pourrait introduire un nouveau biais en réduisant artificiellement ce paramètre lorsque le nombre de tour de déroulage est important.

Le Tableau 10 est un extrait de la matrice des corrélations (jointe en ANNEXE II) des critères et des paramètres de coupe utilisés pour 85 essais (le PTFE est traité séparément pour ne pas biaiser l'analyse) dont les coefficients sont au moins significatifs à 10 %. La plupart des relations qui les unissent peuvent s'expliquer à partir de l'étude des courbes proposées dans le paragraphe précédent. Rappelons qu'une corrélation significative n'impliquant pas nécessairement une relation de cause à effet directe, une certaine prudence est de rigueur dans l'interprétation. Les liens qui unissent certains descripteurs entre eux n'apportent pas d'information en soi sur l'influence des paramètres du procédé. Par contre, ils peuvent être utiles pour croiser les données et faire émerger les tendances les plus probables.

L'impact de chaque facteur du plan d'expérience sur les indicateurs retenus a été analysé afin de juger de leur pertinence :

- La barre de pression (exprimée par son taux de compression soit 0, 5.66 ou 16.67 % pour ce calcul). C'est le premier facteur en terme de rayonnement d'action. Son usage s'accompagne de l'apparition précoce d'un minimum local ($r=-0.3268$ à 99.77 %) et diffère

l'émergence du maximum ($r=0.4984$ à 100 %) d'autant plus clairement que le taux de pression est élevé.

La relation relativement faible qui lie Pmin à Pmax/ nb ($r=-0.2046$ à 93.97 %) confirme cette tendance. Le croisement de ces remarques avec les observations du paragraphe précédent ne laissent que peu de doutes dans ce cas sur une réelle relation causale.

Cependant, en reconduisant le calcul uniquement sur les essais menés en présence de la barre, le coefficient de corrélation mesuré n'est plus significatif. Seule une analyse de différents taux de compression pour une même épaisseur pourrait permettre de trancher. Nous conserverons une évolution binaire de ce facteur pour l'analyse des sons, des vibrations et des efforts.

Couples de variables analysées (85 échantillons)	r	Signification statistique (%)
Pression de la Barre & Pmin	-0.3268	99.77
Pression de la Barre & Pmax/nb	0.4984	100
Pression de la Barre & Coefficient d'asymétrie	-0.3447	99.88
Pression de la Barre & Coefficient d'aplatissement	-0.2018	93.6
Essence & Coefficient d'asymétrie	0.1997	93.31
Vc & Ecart Type	0.1926	92.25
Pmin & Ecart Type	-0.2475	97.76
Pmin & Coefficient d'asymétrie	0.2685	98.7
Pmin & Pmax/nb	-0.2046	93.97
Coefficient d'aplatissement & Pmax/nb	-0.3398	99.85
Usure & Pmax/nb	-0.2181	95.51
Usure & écart type	0.4522	100

Tableau 10 : Corrélations au moins significatives à 10% des paramètres et critères descripteurs des variations d'épaisseur (85 modalités de déroulage)

Une autre conséquence du déplacement du plan de coupe est matérialisée par la diminution du coefficient d'asymétrie ($r=-0.3447$ à 99.88 %) dont la moyenne est légèrement négative (-0.0954). En effet, en l'absence de barre, l'outil a tendance à plonger dans le billon. La convergence de l'épaisseur vers sa valeur nominale peut s'effectuer de manière décroissante. Ce phénomène disparaît complètement sous l'action de la barre (cf. Figure 66 et Figure 67) où l'épaisseur produite augmente progressivement. La distribution des mesures est logiquement décalée vers les valeurs inférieures à la moyenne. Le lien « positif » qui unit le coefficient d'asymétrie à Pmin ($r=0.2685$ à 98.70 %) accrédite cette interprétation.

La moyenne du coefficient d'aplatissement pour l'ensemble des essais vaut 5.5483 ce qui dépasse nettement la valeur 3 associée traditionnellement à une distribution gaussienne. Cela n'a rien de surprenant puisque la régularité de l'avance vise à produire un copeau d'épaisseur constante. Lorsque la barre agit, la diminution du Kurtosis caractérise un étalement de la distribution des valeurs autour de la moyenne. C'est une autre manière de décrire le rôle favorable joué par la barre dans la genèse et l'entretien des variations d'épaisseur. Cette tendance reste néanmoins relativement faible (significative à 93.6 %) mais la bonne corrélation qui lie le coefficient d'aplatissement à Pmax/nb ($r=-0.3398$ à 99.85 %) nous laisse

penser que l'explication est valide. Plus le maximum local est détecté tardivement et plus la distribution est étalée ce qui est en accord avec les observations en présence de la barre de pression.

On peut donc retenir que ces 4 indicateurs sont sensibles aux variations d'épaisseur induites par la barre (épaisseur plus faible en début d'usinage et lente convergence vers l'épaisseur nominale). Il est surprenant de constater que l'écart type n'est pas corrélé à l'usage de la barre. Nous allons voir qu'il s'agit d'un effet perturbateur attribuable à l'usure de l'outil.

➤ L'essence. Le fait que le coefficient d'asymétrie ($r=0.1997$ à 93.31%) ait plutôt tendance à se décaler vers les valeurs positives matérialise l'influence de la densité du bois, à taux de pression de la barre donné. Le plan de coupe des premières rotations pour le hêtre est significativement plus déplacé puisqu'il présente une rigidité radiale supérieure à celle du peuplier. L'épaisseur déroulée tend plus lentement vers la côte nominale. Le même calcul conduit seulement sur les essais sans barre ne permet pas d'obtenir une corrélation significative ce qui conforte le raisonnement.

➤ L'usure du couteau. Tout d'abord, elle s'accompagne d'un maximum local précoce ($r=-0.2181$ à 95.51%). Cette tendance est uniquement sensible en l'absence de barre puisque le coefficient de corrélation devient non significatif dans le cas contraire. Les mises au rond et la coupe difficile conduisent à de fortes oscillations du signal dès le début du second tour. Ce phénomène est très limité sous l'action de la barre où l'épaisseur croît toujours, plus ou moins rapidement, vers sa valeur nominale (cf. Figure 66). Mais surtout, l'usure et l'écart type des mesures augmentent clairement de concert ($r=0.4522$ à 100%). Deux raisons peuvent expliquer la croissance de la dispersion des mesures : une dégradation du produit ou de la mesure. L'usure favorise les deux en jouant un rôle clef dans la stabilité de l'usinage et sur la qualité du placage produit.

Pour des conditions rigoureusement identiques, elle peut faire passer le régime de coupe d'un état stable à un état instable comme nous en avons fait l'expérience dans le cas du PTFE pour les essais 6 et 2. Le fait d'utiliser l'outil usé n'a plus permis de réaliser un copeau continu (cf. Figure 68). L'outil refuse la coupe sur un tour complet avant de plonger pour prendre près de deux fois l'épaisseur désirée au tour suivant et ainsi de suite. Dans le cas du bois, le phénomène est moins marqué mais l'écart type y est tout de même sensible.

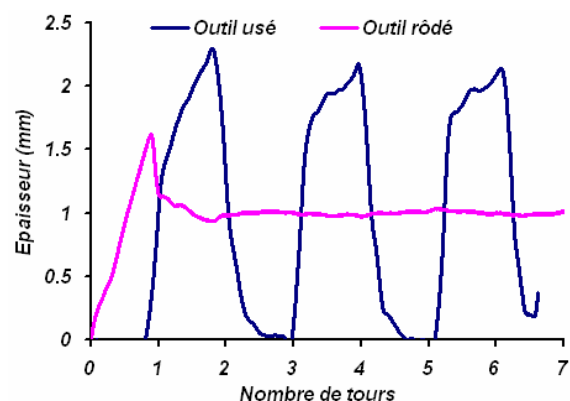


Figure 68 : Influence de l'usure sur le refus de coupe lors de déroulages de PTFE ($E_p=1\text{mm}$, $V_c=2\text{m/s}$, $\delta=0^\circ$ essais 2 : outil rodé ; essai 6 : outil usé)

Parallèlement, nous avons toujours constaté la présence de fibres arrachées sur le copeau et le billon lorsque le couteau était dégradé (placages de catégorie (a)). Ce foisonnement de cellules, particulièrement bien visible dans le cas du peuplier, est le résultat de l'effet Horner. Le roulement positionné à l'extrémité du capteur LVDT se trouve en contact avec une multitude de cellules arrachées qui sont à l'origine d'oscillations rapides et relativement amples. C'est précisément dans ces conditions que la mesure perd en précision.

Néanmoins, on peut penser que ce second effet prédomine. L'écart type est un bon indicateur des variations d'épaisseur. Il devrait être corrélé à l'utilisation de la barre ce qui n'est pas le cas d'après la matrice des corrélations. En revanche, si le calcul tourne uniquement sur les essais effectués avec un outil bien affûté, cette corrélation devient forte et très significative ($r=0.6004$ et 100%). Les mesures sont donc très perturbées par la présence de fibres arrachées sur le billon.

➤ La vitesse de coupe. L'augmentation de la vitesse de coupe permet en général de limiter voir d'éradiquer l'effet Horner comme nous l'avons évoqué dans la partie II. Cette tendance n'a pas pu être observée tant le rayon de bec de l'outil était important. Elle s'accompagne même d'une légère croissance de l'écart type ($r=0.1926$ à 92.25%). Là encore, ce facteur vitesse limite la résolution du capteur et favorise les instabilités de coupe.

Afin de valider ces remarques, le calcul complet de la matrice des corrélations, jointe en ANNEXE II, a été reconduit pour les seules modalités « outil rodé ». Les grandes tendances et les mécanismes décrits sont conservés même si localement certaines variables disparaissent ou sont substituées. Par exemple, P_{min} remplace le coefficient d'asymétrie dans sa relation avec l'essence mais l'interprétation reste valide. Le seul véritable fait nouveau provient de l'apparition d'un lien qui unit dépouille et coefficient d'asymétrie ($r=-0.3310$ à 96.65%). La moyenne du coefficient d'asymétrie sur cet échantillonnage est clairement négative (-0.1415). Le fait d'utiliser une dépouille fortement négative s'accompagne toujours d'un refus de coupe et de variations de l'épaisseur plus ou moins importantes autour de la côte nominale. C'est ce qui explique pourquoi ces conditions s'accompagnent d'un retour du barycentre du nombre de mesures vers leur moyenne.

Il n'est pas totalement surprenant de voir apparaître l'influence de l'angle de dépouille uniquement à ce stade de l'analyse tant les autres facteurs, notamment la présence de la barre et l'usure de l'outil, peuvent être masquant au-delà du premier tour de déroulage.

A ce stade, nous disposons déjà de deux couples d'indicateurs (P_{min} , P_{max}/nb) et (Skewness, Kurtosis) intéressants pour décrire les variations de l'épaisseur, en particulier liées à l'usage de la barre. L'écart type est aussi très efficace mais sa sensibilité aux perturbations de la mesure interdit son usage pour des surfaces pelucheuses.

Si ces critères fournissent une indication utile sur la présence et la sévérité des oscillations de l'épaisseur, il serait aussi bon de mieux les décrire dans le temps (en particulier en fonction des paramètres du procédé). L'objectif reste, bien entendu, l'identification de leurs signatures sur les relevés du microphone et des accéléromètres. Pour les essais où une période dominante était mesurable, sa valeur moyenne a été déterminée suivant la démarche décrite dans le paragraphe précédent (38 essais au total).

1.3.4 Analyse des périodes d'oscillation

Avant toute chose, il faut comprendre pourquoi les périodes des oscillations ne sont pas toujours mesurables. Les poids 0 et 1 ont respectivement été affectés aux cas « mesure impossible », « mesure réalisée ». Trois paramètres du procédé sont significatifs : l'essence ; le taux de pression de la barre et l'usure. Il est intéressant de remarquer que l'épaisseur nominale ne biaise pas la possibilité de la mesure.

Les chances de pouvoir détecter une période dominante sont plus réduites pour les essais menés sur le peuplier ($r=-0.2535$, 98.00%). La raison provient probablement de sa propension à produire des surfaces pelucheuses. Le fait que l'usure joue un rôle défavorable ($r=-0.2130$ à 94.83%), accrédite cette hypothèse. On peut aussi penser que sa plus grande déformabilité limite les perturbations en présence de la barre. En effet, la valeur du taux de pression et plus généralement son usage, favorisent logiquement la mesure d'une période dominante ($r=0.2718$, 98.82% avec des taux de pression fixés à 0, 5.66 ou 16.67% pour ce calcul).

Tenant compte de ces observations, il est préférable d'exclure les modalités « outil utilisé » de l'analyse pour éviter de bruyier les résultats. La matrice des corrélations établie ne comporte donc que 23 modalités (cf. Tableau 11). Etant donné l'incertitude de mesure sur la valeur réelle de la vitesse de coupe, nous avons fait le choix, comme pour les exemples présentés, d'arrondir ces périodes à la portion de tour la plus proche, soit 0.5, 1 ou 2 tours. Cette hypothèse donne un fort sens physique aux mesures tout en entraînant des modifications mineures des coefficients calculés. Enfin, la valeur moyenne de la période des oscillations étant égale à 1.37 tours, une corrélation négative suggère une périodicité sur un tour (seule une modalité a conduit à une période d'un demi tour).

La baisse de la période moyenne d'oscillation lorsque la barre agit (cf. Tableau 11) traduit donc une périodicité sur un tour. On retrouve cette tendance pour les essais 26 et 27 respectivement présentés sur la Figure 66 et la Figure 67. En résumant, si la période d'oscillation sans barre peut atteindre deux tours, elle est plutôt astreinte à une rotation du billon, ou moins, dans le cas contraire. Les évolutions des indicateurs P_{min} , P_{max}/nb et de l'écart type, bien corrélés à l'action de la barre, abondent dans ce sens.

La tendance qui lie essence et période d'oscillations va dans le sens des observations de [MARCHAL_1989] concernant l'influence de la densité du bois sur l'instabilité de la coupe. On peut donc raisonnablement supposer que ce lien est causal. Plus l'essence est dense et plus la probabilité d'obtenir des oscillations « rapides » est forte. Une valeur importante de l'angle de dépouille, en particulier en l'absence de la barre de pression, favorise certainement ce mécanisme, mais le peu de données disponibles (8 essais) ne permet pas de conclure ($r_{(\text{période oscillation/dépouille})} = 0.5345$ à 83.67%).

Variables (23 échantillons)	r (période d'oscillation/v variable)	Signification statistique (%)
Essence	0.6645	99.95
Pression de la barre	-0.7162	99.99
Angle de dépouille	0.1372	46.75
Épaisseur nominale	-0.3488	89.71
Vitesse de coupe	-0.0734	26.08
Pmin	0.5995	99.75
Pmax/nb	-0.5445	99.28
Ecart type	-0.6101	99.80
Coefficient d'asymétrie	0.3369	88.41
Coefficient d'aplatissement	0.1492	50.33

Tableau 11 : Corrélation et taux de confiances reliant périodes moyenne d'oscillations, paramètres et descripteurs (23 essais)

1.4 Synthèse sur l'approche de la qualité générale du placage

Trois classes de qualité de l'état de surface du placage ont été isolées. La présence de fissures et leurs fréquences d'apparition moyennes ont été déterminées en fonction des paramètres de coupe. Nous avons aussi toutes les chances d'observer des transitoires importants et corrélés à la vitesse de rotation du disque pour les essais réalisés en présence de la barre. Le suivi des mesures acoustiques et vibratoires par rotation du disque devrait donc permettre de décrire leur faculté à détecter ces transitoires.

Pour décrire l'évolution de l'épaisseur du placage, en plus de leur période d'oscillation moyenne pour certains essais, nous disposons de 5 critères. Performant pour des placages non pelucheux, l'écart type donne une image de l'amplitude des oscillations (au-delà du premier tour). En présence de la barre de pression, il intègre aussi l'influence de la lente convergence de l'épaisseur vers sa cote nominale ce qui fait de lui un descripteur global des variations de l'épaisseur. Pmin et Pmax/nb sont de bons indicateurs du rôle joué par la barre. Si on les combine aux valeurs du coefficient d'aplatissement et surtout d'asymétrie, ils fournissent une information sur la pente de convergence vers l'épaisseur nominale. Ces coefficients permettent de finaliser la description de la distribution des mesures mais restent très sensibles à l'usage de la barre.

Plusieurs travaux fondateurs déjà cités ont montré la pertinence du suivi des efforts en vue d'établir un diagnostic de l'état de la coupe. Notre objectif premier restant la mise en lumière des grandes tendances des signaux vibratoires en fonction des paramètres de coupe et des

défauts générés, il est judicieux de débiter par l'étude des efforts. Elle nous permettra de simplifier et d'étayer cette démarche.

2 Les efforts

Les informations les plus riches sont les fruits de la décomposition des efforts de coupe sur les deux faces de l'outil proposée dans [THIBAUT_1988] et reprise dans [MOTHE_1988], [MOVASSAGHI_1985] et [MARCHAL_1989]. Néanmoins, les directions de sollicitation des vibrations se prêtent moins bien à cette approche. Nous avons donc pris le parti d'étudier les deux approches afin de ne conserver que la plus utile à notre application. Un premier point, et non des moindres, réduit les possibilités d'utilisations de la décomposition sur les deux faces : l'usure de l'outil. Le rayon de bec étant ici considérable par rapport aux ordres de grandeur proposés par THIBAUT, la contribution des efforts en pointe d'outil ne peut plus être négligée. Cela contredit une des deux hypothèses fondamentales et invalide le calcul. L'analyse comparative ne se portera que sur les modalités « outil rodé » (ce qui n'interdit pas la caractérisation de l'influence de l'usure dans les directions de coupe et d'avance).

Pour chaque configuration expérimentale (essais 1 à 104), la moyenne, l'écart type, les maximums et les minimums locaux des efforts ont été calculés sur le dernier tour enregistré et sur la totalité de l'essai (données brutes jointes en ANNEXE II). La durée du dernier tour a été obtenue conformément à la démarche présentée dans le paragraphe précédent. Elle introduit une incertitude sur la valeur des coefficients mesurés dont les conséquences sont négligeables. Comme nous le verrons par la suite, le faible biais généré localement est masqué à la fois par la nature intégratrice des indicateurs mais aussi par la taille assez importante de l'échantillonnage.

Le suivi des niveaux moyens et de leur variabilité fera l'objet d'une étude systématique puisqu'ils constituent une première description des sollicitations mécaniques à l'origine des vibrations et des sons enregistrés dans la zone de coupe. La littérature offre de solides références concernant la moyenne des efforts, mais il n'existe pas, à notre connaissance, de travaux proposant une étude systématique de la variabilité de ces efforts. Les autres critères ne seront présentés que lorsqu'ils apportent des éléments nouveaux ou un meilleur éclairage sur les phénomènes observés afin de ne pas surcharger l'analyse.

Pour déterminer les valeurs de F_a et F_d correspondantes aux mesures des efforts de coupe (cf. II.4.2), il nous faut connaître le coefficient de frottement entre l'outil et le bois pour chaque configuration expérimentale.

2.1 Mesure du coefficient de frottement

Les valeurs du coefficient de frottement moyen ont été déduites de l'évolution du rapport entre les composantes tangentielle et normale de l'effort exercé par le billon sur le patin de

frottement une fois le premier tour de déroulage achevé. Ces efforts ont préalablement été filtrés (Butterworth ordre 3, $f_c=20$ Hz). Cela ne modifie pas fondamentalement la valeur moyenne du coefficient de frottement mais en limite singulièrement la variabilité locale.

Parmi les 48 configurations possibles, 46 ont permis le calcul de phi, angle du cône de frottement, (essais 9 à 20, 33 à 44, 57 à 68 et 81 à 92, excepté 17 et 18 où Xpatin n'a pu être enregistré). L'analyse des corrélations confirme les résultats de la littérature (cf. Tableau 12).

L'angle de frottement est corrélé fortement et négativement à la vitesse de coupe. On relève aussi un lien plus faible à la nature de l'essence. Remarquons enfin que l'usure, qui dégrade fortement l'état de surface du placage (catégorie (a)), n'a pas d'influence significative sur l'angle de frottement conformément aux observations de [THIBAUT_1988] et [BEAUCHÊNE_1996]. Ces mesures peuvent contribuer au calcul sans biaiser l'analyse. Par contre, la décomposition des efforts sur les deux faces de l'outil sera interdite pour ces essais puisque la composante en pointe d'outil ne peut être négligée.

	r (Phi paramètre)	Signification statistique
Angle de dépouille (-1, 0 et 1°)	-0.1763	75.89
Epaisseur (1 et 3 mm)	-0.0977	48.18
Usure (rôdé=0, usé=1)	-0.1357	63.13
Essence (hêtre=1, peuplier=2)	0.2568	91.51
Vitesse (0.5 et 2 m/s)	-0.7109	99.9

a

Vitesse de coupe linéaire (m/s)	Peuplier	Hêtre
0.5	22.631	20.756
2	17.890	16.099

b

Tableau 12 : a Corrélations par rapport à Φ (°), **b** Angles de frottements moyens (en °)

Les valeurs moyennes de phi (Tableau 12 b) illustrent ces tendances en masquant néanmoins de fortes disparités locales entre les configurations expérimentales et durant un même essai. De plus, ces résultats semblent excéder de 1 à 4 ° les observations de la littérature ([DECES-PETIT_1996], [MOVASSAGHI_1985]). Les conséquences d'une telle variation sur la validité des efforts F_a et F_d lorsqu'ils sont déséquilibrés ont déjà été décrites en II.4.1. Il faut reconnaître que de ces mesures sont extrêmement sujettes aux erreurs de mesures puisque les efforts mis en jeu sont faibles.

Pour les 8 modalités consacrées au PTFE, ces risques sont encore plus grands. L'angle de frottement moyen augmente d'à peine 1° avec la vitesse, conformément aux tendances observées par [DECES-PETIT_1996], mais aucune corrélation significative n'a pu être relevée.

Comme la plupart des auteurs, nous utiliserons des valeurs moyennes par essence et par vitesse pour le calcul des efforts de coupe sur les deux faces de l'outil (données brutes jointes en ANNEXE II).

2.2 Les efforts exercés par le couteau

Avant toute chose, la question du domaine fréquentiel d'étude se pose (comme pour tout capteur). Deux stratégies s'offrent à nous :

1. Filtrer les mesures d'efforts en fonction des caractéristiques du dispositif de mesure (un filtre passe bas dont la fréquence de coupure avoisine 2 kHz suffit)
2. Evacuer toute source de perturbation du signal y compris les fréquences de résonance de la machine, ce qui impose un filtrage beaucoup plus sévère ($f_c \leq 100$ Hz). Si les conséquences d'une telle opération sont négligeables pour le calcul des valeurs moyennes, ce n'est pas du tout le cas en ce qui concerne l'écart type.

La seconde approche lisse fortement le signal et donne un accès immédiat aux variations lentes des efforts. Selon toute vraisemblance, leurs mises en phase avec les profils de l'épaisseur du placage seront facilitées. Malheureusement, la fissuration éventuelle, dont on connaît les fréquences moyennes d'apparition, sera éliminée. En revanche, la première solution permettrait de tenir compte des deux phénomènes et de tous ceux susceptibles d'être interprétables physiquement sans erreur due à la mesure. La contrepartie réside dans le fait que ces informations se mêlent. Leurs contributions respectives sont donc plus délicates à isoler.

Dans un contexte d'approche global du procédé, l'amputation d'une grande part de l'information peut réduire singulièrement voire biaiser l'interprétation des résultats. Nous avons donc pris le parti de choisir la première solution.

2.2.1 Fa ou FXc ?

Etant donné la disposition et la nature des accéléromètres, nous n'avons pas d'accès direct aux vibrations sur la face d'attaque. La comparaison des mesures des efforts et des vibrations est plus immédiate dans la direction de coupe. Il nous faut déterminer les conséquences d'une telle approche.

Les tableaux suivants sont issus de la matrice des corrélations des efforts en fonction des facteurs du plan d'expérience (excepté l'usure) pour les critères moyenne et écart type sur un tour. Le fait de tenir compte du premier tour où l'épaisseur passe de zéro à une valeur proche de la cote nominale ne porte pas à conséquence sur les tendances dans cette direction. Concrètement, les taux de confiance associés aux valeurs des coefficients de corrélation ne sont pas modulés de manière significative (<5%), ce qui valide bien l'hypothèse selon laquelle l'incertitude sur la durée réelle d'un tour peut être négligée pour ce niveau d'analyse.

	r (Moyenne Fa)	Signification statistique en % (Moyenne Fa)	r (Moyenne FXc)	Signification statistique en % (Moyenne FXc)
Essence	-0.6092	100	-0.5729	100
Angle de dépouille	-0.026	13.80	-0.2806	94.39
Barre de pression	0.3165	96.98	0.3829	99.21
Epaisseur	0.5381	99.99	0.4794	99.93
Vitesse	0.0539	28.10	0.0637	32.94

a

	r (Ecart type Fa)	Signification statistique en % (Ecart type Fa)	r (Ecart type FXc)	Signification statistique en % (Ecart type FXc)
Essence	-0.3506	98.43	-0.3209	97.21
Angle de dépouille	0.0509	26.60	-0.0191	10.16
Barre de pression	-0.3862	99.27	-0.4295	99.74
Epaisseur	0.5633	100	0.5534	99.99
Vitesse	0.1158	56.18	0.0945	47.24

b

Tableau 13 : Comparaison des coefficients de corrélation obtenus sur un tour entre
(a) la moyenne et (b) l'écart type de FXc et de Fa et les facteurs expérimentaux
(calcul sur 47 échantillons sans la modalité usure de l'outil)

Les effort dans la direction de coupe et sur la face d'attaque sont intimement liés : $r_{(FXc/Fa)}=0.8698$ à 100% pour la moyenne et $r_{(FXc/Fa)}=0.9871$ à 100% pour l'écart type. On retrouve donc une sensibilité commune des mesures pour presque tous les facteurs, excepté l'angle de dépouille.

Les valeurs retenues pour l'épaisseur du placage nous placent dans la partie linéaire du modèle défini par THIBAUT et décrit en II.4.2.2. où le mécanisme principal de formation du copeau est le cisaillement dans un plan quasiment perpendiculaire à la face d'attaque. Une extension de la surface de ce plan engendré par la croissance de l'épaisseur se traduit logiquement par une hausse des deux efforts moyens.

La densité du bois est un premier indicateur utile pour quantifier les différences observées entre deux essences en déroulage d'après les conclusions de [MOVASSAGHI_ 1985]. Ayant choisi les poids 1 et 2 respectivement pour le hêtre et le peuplier, il est logique d'observer une corrélation négative puisque l'énergie nécessaire à la déformation du bois est moindre pour l'essence la moins dense. Parallèlement, l'écart type, qui matérialise la dispersion des mesures, est significativement réduit en premier lieu de par sa relation intrinsèque au niveau moyen des efforts. Les fréquences de résonance inférieures à la limite définie par le filtre passe bas (576 Hz en particulier) seront d'autant plus présentes que la sollicitation mécanique sera importante. De plus, lors de l'ouverture des fissures, qui s'apparente presque à un mécanisme de coupe interrompue, la variation du niveau de l'effort sera limitée pour une essence peu dense. La nature du plan ligneux et en particulier l'absence de gros rayons dans le bois de peuplier, peut aussi concourir à cette tendance mais dans une moindre mesure.

Les résultats de la littérature ont montré une aggravation sévère du mécanisme de fissuration avec l'augmentation de l'épaisseur du placage. Cela explique pourquoi l'écart type des efforts est très significativement favorisé dans ce cas. L'usage de la barre de pression, dont l'objectif est précisément de limiter la formation des fissures, produit l'effet inverse. Cela ne veut pas dire que la barre ne provoque pas une certaine instabilité des efforts puisque nous avons observé des variations importantes de l'épaisseur du placage précisément de son fait dans le cas du hêtre, avec un outil bien affûté. Cependant, les perturbations dont elle est à l'origine se traduisent par des oscillations bien plus faibles que celles induites par le phénomène de fissuration. Son effet sur la valeur des efforts est lui aussi classique.

Les niveaux moyens de F_a et de F_{Xc} ne sont pas significativement reliés à la vitesse de coupe dans le domaine d'étude conformément aux observations présentées dans [MARCHAL_1989] et [DECES-PETIT_1996]. Il est aussi intéressant de remarquer que les écarts types ne sont pas non plus influencés de manière significative par la vitesse, pour les plages de variation des paramètres utilisés. D'après nos connaissances, ce point n'avait pas encore été clairement établi dans la littérature.

En revanche, leurs comportements divergent en fonction du paramètre « angle de dépouille ». Le graphique dit « des effets » (cf. Figure 69) est le résultat de la moyenne des valeurs (ici de la moyenne et de l'écart type de F_{Xc}) pour chaque niveau des facteurs du plan d'expérience complet (92 essais). Combiné au « graphe des interactions », dont la construction est similaire, il donne un accès rapide aux contributions de chaque paramètre pour un critère défini.

L'effort dans la direction de coupe augmente lorsque la valeur de l'angle de dépouille diminue (surtout si elle est négative) mais de manière assez faiblement significative ($r=0.2806$ à $94,39\%$ sans le facteur usure et $r=-0.1817$ à 91.71% pour les 92 essais).

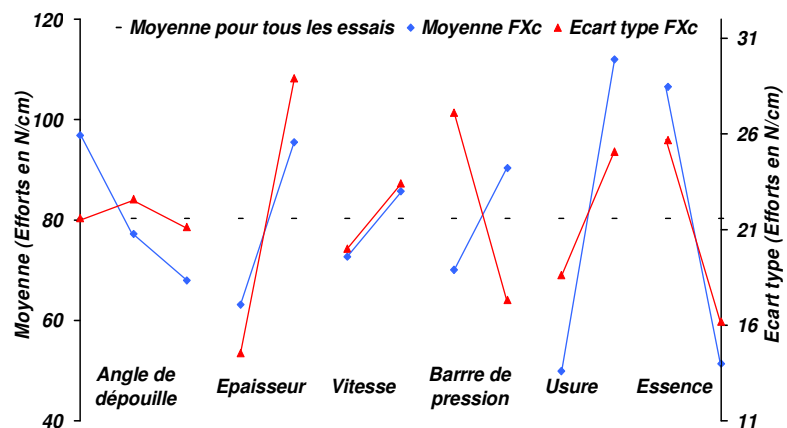


Figure 69 : Graphique des effets de la moyenne et de l'écart type de l'effort F_{Xc} sur un tour (92 essais)

Il faut reconnaître ici la contribution d'une partie des efforts sur la face de dépouille mise en évidence dans [THIBAUT_1988]. C'est précisément pour cette raison que l'auteur a décomposé les efforts de coupe sur les deux faces. Sans pouvoir négliger cet effet, il reste néanmoins plus faible que les trois facteurs principaux.

Par contre, la dispersion des mesures des deux efforts ne semble pas dépendre de l'angle de dépouille. Le léger maximum relevé lorsque ce dernier est nul provient probablement de la

fissuration. C'est dans cette configuration que la transmission de l'ouverture brutale des fissures est la plus directe.

Enfin, la Figure 69 présente l'usure de l'outil comme le facteur principal du module de l'effort FXc. Une analyse des corrélations appuie cette remarque en fournissant un coefficient de 0.5522 à un taux de confiance de 100%. Cela rejoint les observations de la littérature (en particulier [BEER_1998]). Son influence sur la variabilité des mesures est favorable aussi mais de façon nettement moins flagrante ($r=0.1916$ à 93.27%).

2.2.2 Fd ou FYc ?

Comme dans le paragraphe précédent, les tableaux suivants sont issus de la matrice des corrélations reliant les critères choisis aux facteurs du plan d'expérience pour un tour de déroulage, mis à part le cas de l'usure.

	r (Moyenne Fd)	Signification statistique en % (Moyenne Fd)	r (Moyenne FYc)	Signification statistique en % (Moyenne FYc)
Essence	-0.1708	74.91	-0.1745	75.93
Angle de dépouille	-0.4474	99.84	0.3687	98.92
barre de pression	0.1618	73.27	0.0228	12.11
Epaisseur	-0.0783	39.90	0.3344	97.84
Vitesse	0.1735	75.64	-0.1032	51.02

a

	r (Ecart type Fd)	Signification statistique en % (Ecart type Fd)	r (Ecart type FYc)	Signification statistique en % (Ecart type FYc)
Essence	-0.4295	99.74	-0.4172	99.65
Angle de dépouille	-0.2016	82.58	-0.0495	25.91
barre de pression	-0.1425	66.06	-0.0115	7.13
Epaisseur	0.2549	91.62	0.3088	96.53
Vitesse	0.392	99.36	0.3773	99.11

b

Tableau 14 : Comparaison des coefficients de corrélation obtenus sur un tour entre
(a) la moyenne et (b) l'écart type de FYc et de Fd et les facteurs expérimentaux
(calcul sur 47 sans la modalité usure de l'outil)

On retrouve un lien étroit entre les deux efforts : $r_{(FYc/Fd)}=-0.8574$ à 100% pour la moyenne et $r_{(FYc/Fd)}=0.8941$ à 100% pour l'écart type. En particulier, ils sont très dépendants de la valeur de l'angle de dépouille pour ces 47 échantillons. Les signes des coefficients caractérisent le comportement des deux composantes vis-à-vis de la dépouille. Lorsque cet angle augmente, la pression exercée sur la face de dépouille diminue tandis que FYc tend vers des valeurs franchement positives ($FYc_{moyen}=18.24$ N/cm pour 47 échantillons). En excluant les modalités où la dépouille est négative, la corrélation reste significative seulement pour Fd ($r=-0.3567$ à 95.11%) ce qui matérialise la grande sensibilité de FYc au mécanisme de refus de coupe. Par contre, FYc est aussi influencé par la valeur de l'épaisseur déroulée comme l'ont constaté

plusieurs auteurs dont notamment THIBAUT dans [THIBAUT_1989] (ce qui avait motivé la définition de F_d).

Certaines tendances, supposées prépondérantes semblent, a priori, non significatives. Nous ne retrouvons pas de dépendance significative (même si le sens de variation est respecté) du module de l'effort sur la face de dépouille vis-à-vis de la vitesse de coupe décrite par [MARCHAL_1989] et [DECES-PETIT_1996], même en ne conservant que les essais où l'angle de dépouille est négatif ou nul. Bien qu'ayant choisi deux modalités de vitesse sensées appartenir aux deux domaines identifiés dans II.4.3.2.4., le nombre de variables (facteurs internes et externes du plan d'expérience) relativement conséquent joue probablement un effet masquant. Par contre, la variabilité des mesures des deux efforts est favorisée pour des vitesses élevées. L'explication est à la fois physique, puisque la vitesse favorise les variations d'épaisseur (cf. V.1.3.3), mais probablement aussi mécanique par la présence plus marquée des vibrations accompagnant l'énergie supplémentaire communiquée à la structure.

Le facteur essence semble uniquement influencer la dispersion des mesures et non leurs modules. En observant de plus près les données, on s'apercevrait qu'un essai (30) présente un comportement vraiment atypique. Les paramètres (hêtre, $\delta = -1^\circ$, $E_p = 1\text{mm}$, $V_c = 2\text{m/s}$ et utilisation de la barre), éminemment favorables à un refus de coupe, se concrétisent par un effort dans la direction d'avance considérable ($F_{Yc_{\text{moyen}}} = -317\text{ N/cm}$!). Un tel refus de coupe n'est ni observé avec une épaisseur plus importante ni pour le peuplier dans les mêmes conditions. Le même essai mené à faible vitesse n'ayant pu être réalisé, il est difficile de d'exclure cette modalité dont les mesures semblent plausibles. Par contre, son « isolement » vis-à-vis des autres relevés perturbe l'analyse. Le calcul mené sur les 46 échantillons restant n'éclaire pas tellement plus le cas de l'effort sur la face de dépouille mais montre que F_{Yc} est significativement influencé par le type d'essence ($r = -0.5294$, à 99.98%), dont la densité des couches superficielles en contact avec la face inférieure est une bonne approximation, et plus légèrement par la barre de pression ($r = 0.2602$, à 91.92%).

Cela nous apprend que les refus de coupe pour cet échantillonnage de paramètres sont assez mineurs ($F_{Yc_{\text{moyen}}} = 25.52\text{ N/cm}$ sur 46 échantillons). Dans ces conditions, la barre a plutôt tendance à favoriser une plongée de l'outil plutôt qu'un refus de coupe comme l'avait observé THIBAUT en augmentant les efforts sur la face d'attaque.

L'intégration du facteur usure permet de retrouver davantage de situations propices au refus de coupe et donc de réduire l'effet dispersif introduit par l'essai 30 précédemment cité. Le graphique des effets, établi à partir des 92 essais de l'échantillonnage, révèle des tendances plus classiques avec des coefficients de corrélation significatifs à 5% entre la moyenne de F_{Yc} et la valeur de l'angle de dépouille, le type d'essence et bien sûr l'usure de l'outil.

L'effet perturbateur de l'épaisseur devient non significatif, tant du point de vue de la moyenne que de la variabilité de FYc, lorsque tous les essais sont pris en compte. Enfin, le rôle de la vitesse de coupe est affirmé même s'il ne peut être considéré comme significatif ($r=-0.1706$ pour un taux de confiance de 89.60%).

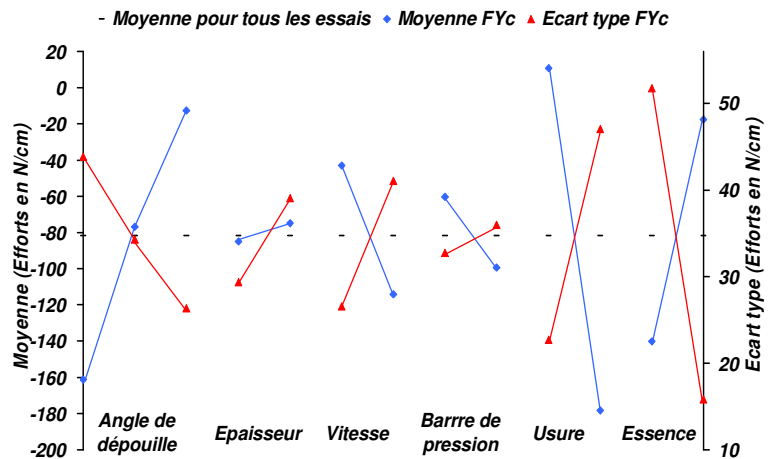


Figure 70 : Graphique des effets de la moyenne et de l'écart type de l'effort FYc sur un tour (92 essais)

La prise en compte du premier tour de déroulage permet d'accéder à une mesure du refus initial de coupe tel qu'il a été défini dans [DECES-PETIT_1996]. Il constitue un indicateur intéressant de l'adéquation des réglages pour une opération de déroulage donnée. Le suivi de l'évolution du minimum des efforts pendant toute la durée d'un essai fournit une indication similaire mais plus immédiate. Ainsi, la corrélation entre le minimum et l'essence, l'angle de dépouille ou l'usure de l'outil est toujours significative à 5 % au moins (0.5113, 0.3250, -0.4033 respectivement). De plus, l'augmentation de la vitesse de coupe s'accompagne d'une baisse du minimum de l'essai ($r=-0.1978$ à 94.12 %) ce qui reflète bien sa propension à favoriser le refus de coupe.

2.2.3 Choix du repère

Si la décomposition des efforts sur les deux faces de l'outil permet bien de séparer les effets des différents facteurs, elle ne s'impose pas dans le cadre de cette étude.

Avant tout, hormis les erreurs de mesures éventuelles introduites par l'incertitude de mesure du coefficient de frottement, le cas de l'usure pose problème. Dans la direction de coupe, les relevés vibratoires ont toutes les chances de correspondre davantage aux sollicitations mécaniques représentées par FXc (amplitude et cycles de chargement modélisés par la valeur moyenne et l'écart type). Si l'accéléromètre positionné sur la face de dépouille mesure les vibrations générées par Fd, c'est plutôt la signature d'un refus de coupe ou d'une plongée de l'outil qui nous intéresse, pour leurs conséquences sur l'épaisseur du placage. Ces informations sont immédiates par la mesure de FYc et de son signe en particulier. On peut rappeler qu'empiriquement, un bon réglage est celui qui permet d'obtenir un faible effort d'avance mais légèrement positif. Enfin, le fait de conserver le repère initial (X,Y) n'a pas d'incidence sur la sensibilité aux variations d'épaisseur.

	r (Moyenne Fa)	Signification statistique en % (Moyenne Fa)	r (Moyenne FXc)	Signification statistique en % (Moyenne FXc)
Pmin	-0.3356	96.57	-0.3532	97.46
Pmax/nbtour	0.2680	90.55	0.2666	90.37
Ecart type	0.4926	99.88	0.5620	99.98
Skewness	-0.0833	39.07	-0.0471	22.73
Kurtosis	-0.1066	48.73	-0.0924	42.93

a

	r (Ecart type Fa)	Signification statistique en % (Ecart type Fa)	r (Ecart type FXc)	Signification statistique en % (Ecart type FXc)
Pmin	0.3008	94.07	0.3582	97.67
Pmax/nbtour	0.0235	11.57	0.0025	1.20
Ecart type	0.3842	98.56	0.3633	97.88
Skewness	0.0900	41.92	0.1283	57.00
Kurtosis	-0.1043	56.67	-0.1009	46.46

b

	r (Moyenne Fd)	Signification statistique en % (Moyenne Fd)	r (Moyenne FYc)	Signification statistique en % (Moyenne FYc)
Pmin	-0.1234	55.18	-0.2333	85.26
Pmax/nbtour	-0.0343	16.65	0.2579	89.19
Ecart type	0.2405	86.50	0.2987	93.88
Skewness	0.2266	84.03	-0.2026	79.00
Kurtosis	0.1274	56.67	-0.1671	69.71

c

	r (Ecart type Fd)	Signification statistique en % (Ecart type Fd)	r (Ecart type FYc)	Signification statistique en % (Ecart type FYc)
Pmin	0.2239	83.51	0.1478	63.71
Pmax/nbtour	0.0388	18.79	0.099	45.67
Ecart type	0.3783	98.39	0.5146	99.93
Skewness	0.1597	67.51	0.0142	6.94
Kurtosis	-0.103	47.29	-0.1228	54.96

d

Figure 71 : coefficients de corrélation obtenus sur un tour entre la moyenne et l'écart type de FXc, Fa, FYc et Fd et les descripteurs des variations d'épaisseur du placage (calcul sur 40 échantillons, sans la modalité usure de l'outil et sans essai 30)

Les tableaux ci-dessus présentent les coefficients de corrélation et les taux de confiance associés entre les efforts de coupe et les paramètres employés pour décrire les variations d'épaisseur (40 modalités¹⁷ outil rodé, où l'épaisseur a pu être mesurée). Les moyennes et les écarts types des deux types de décomposition sont équivalents vis-à-vis de ces critères. Ils sont en particulier tous sensibles à l'écart type de l'épaisseur. Seule la moyenne de l'effort Fd semble faire exception et c'est souhaitable puisque cet effort a été défini pour ne pas dépendre de l'épaisseur déroulée.

¹⁷ L'essai 30 a été exclu du calcul pour son rôle fortement perturbateur en particulier sur FYc et Fd déjà mentionné

Remarquons que les efforts sont assez peu sensibles aux coefficient d'aplatissement et d'asymétrie. Nous avons déjà remarqué un tassement de leur potentiel lors de l'analyse des essais où une période d'oscillation était mesurable. En revanche Pmax/nb, mais surtout Pmin, restent exploitables (en particulier pour sa sensibilité aux variations des efforts Fa et FXc).

Nous conserverons donc le repère de (X,Y) pour l'étude des vibrations sur le couteau et la barre de pression dont nous allons aborder rapidement le comportement.

2.3 Les efforts sur la barre

44 modalités du plan complet ont permis la réalisation et l'enregistrement des mesures en présence de la barre de pression. Comme pour le suivi des efforts sur le couteau, l'analyse passe par un défrichage des grandes tendances à partir de la matrice des corrélations liant facteurs du plan aux paramètres choisis (moyenne, écart type, minimums et maximums calculés lors du dernier tour de l'acquisition ou sur toute sa durée cf. ANNEXE II). Les Tableau 15 (a) et (b) en sont des extraits obtenus sur le dernier tour enregistré.

	r (Moyenne FXb)	Signification statitique en % (Moyenne FXb)	r (Ecart type FXb)	Signification statitique en % (Ecart type FXc)
Essence	-0.6278	100	-0.7320	100
Usure	0.4073	99.39	0.1910	78.57
Angle de dépouille	0.0627	32.39	-0.0006	0.29
Epaisseur	0.5101	99.96	0.3427	97.72
Vitesse	0.0716	35.57	0.1671	72.17

a

	r (Moyenne FYb)	Signification statitique en % (Moyenne FYb)	r (Ecart type FYb)	Signification statitique en % (Ecart type FYb)
Essence	-0.5034	99.95	-0.7485	100.00
Usure	0.4731	99.88	0.2231	75.46
Angle de dépouille	0.0264	15.71	-0.0240	12.27
Epaisseur	0.5512	99.99	0.3935	99.18
Vitesse	0.2440	88.96	0.1722	74.64

b

Tableau 15 : Comparaison des coefficients de corrélations obtenus sur un tour entre la moyenne et l'écart type de FXb (a) et de FYb (b) et les facteurs expérimentaux (calcul sur 44 échantillons)

Les moyennes et les écarts types des mesures dans les deux directions sont influencés par les mêmes facteurs et dans des mesures comparables comme en témoignent leurs coefficients de corrélation ($r=0.9465$ pour les moyennes et $r=0.9860$ pour les écarts types à 100%).

Concernant la moyenne, il s'agit logiquement de l'essence, modélisable en première approximation par sa densité, de l'usure, cause d'un refus de coupe accompagné d'une sur-épaisseur et enfin de l'épaisseur, qui provoque une augmentation du module des composantes

à taux de pression constant (a fortiori, d'autant plus marqué dans notre cas où ce taux augmente aussi).

On retrouve la trace du rôle essentiel joué par les caractéristiques mécaniques en compression radiale du bois dans l'évolution de l'écart type des mesures. D'après [THIBAUT_1988], les efforts sur la barre sont directement liés à l'évolution de la sur-épaisseur qui est elle-même favorisée par une densité importante du bois. Le hêtre, plus dense que le peuplier, accroît la variabilité des efforts puisqu'il favorise un régime de sur-épaisseur. Les mesures de l'épaisseur du placage et en particulier l'influence de l'essence sur le coefficient d'asymétrie ou sur la période moyenne d'oscillation (plutôt un tour voir moins en présence de la barre) confirment cette analyse.

En excluant les modalités obtenues pour le peuplier, on rend plus prépondérant ce phénomène dans l'échantillonnage. L'influence de l'usure sur les écarts types des deux efforts apparaît comme significative ($r=0.4353$ à 94.49% pour FYb et $r=0.3899$ à 91.08% pour FXb) puisqu'elle favorise aussi le régime de refus de coupe.

Les composantes dans les directions d'avance et de coupe sont proportionnelles comme l'avait montré [THIBAUT_1988]. La figure suivante représente les valeurs moyennes sur un tour des deux efforts exercés par la barre. La qualité de la régression, est excellente dans le cas du hêtre, et correcte pour le peuplier. La sur-épaisseur imputable à l'usure prononcée de l'outil cause une augmentation très sensible des deux efforts.

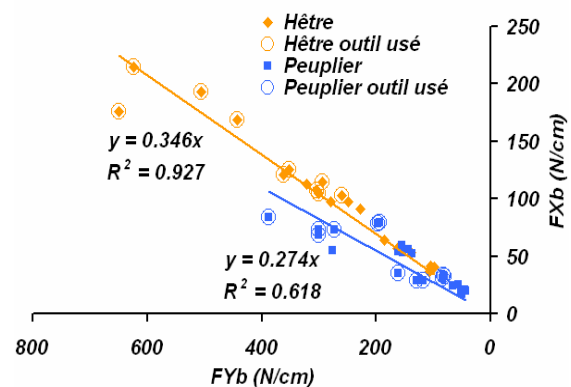


Figure 72 : Efforts exercés sur la barre de pression (44 essais)

La différence de pente observée tire sans doute son origine des caractéristiques mécaniques différentes des deux essences. D'après [GUITARD_1987], le rapport du module élastique en compression tangentielle sur le module élastique en compression radial vaut 0.507 pour le hêtre et 0.414 pour le peuplier (ordres de grandeur obtenus pour des caractéristiques typiques de l'essence). Les valeurs des pentes vont dans le même sens.

3 Signature vibratoire des phénomènes observés

Nous disposons donc de données de référence en terme d'efforts et de qualité du placage qui vont nous guider dans l'interprétation des signaux acoustiques et vibratoires enregistrés. La Figure 73 présente les relevés des capteurs d'efforts, des accéléromètres et du microphone obtenus pour un essai de déroulage de hêtre.

La fréquence d'échantillonnage étant très élevée, le logiciel ne représente que les enveloppes des points des signaux ce qui explique la présence de hachures. Il existe des similitudes entre les enveloppes des différents signaux. En particulier, lorsque la barre de pression entre en action, c'est-à-dire un peu avant la fin du premier tour qui dure environ 2 secondes, les amplitudes des variations des signaux de chaque capteur, en dehors des accéléromètres vissés sur la barre, sont sensiblement réduites.

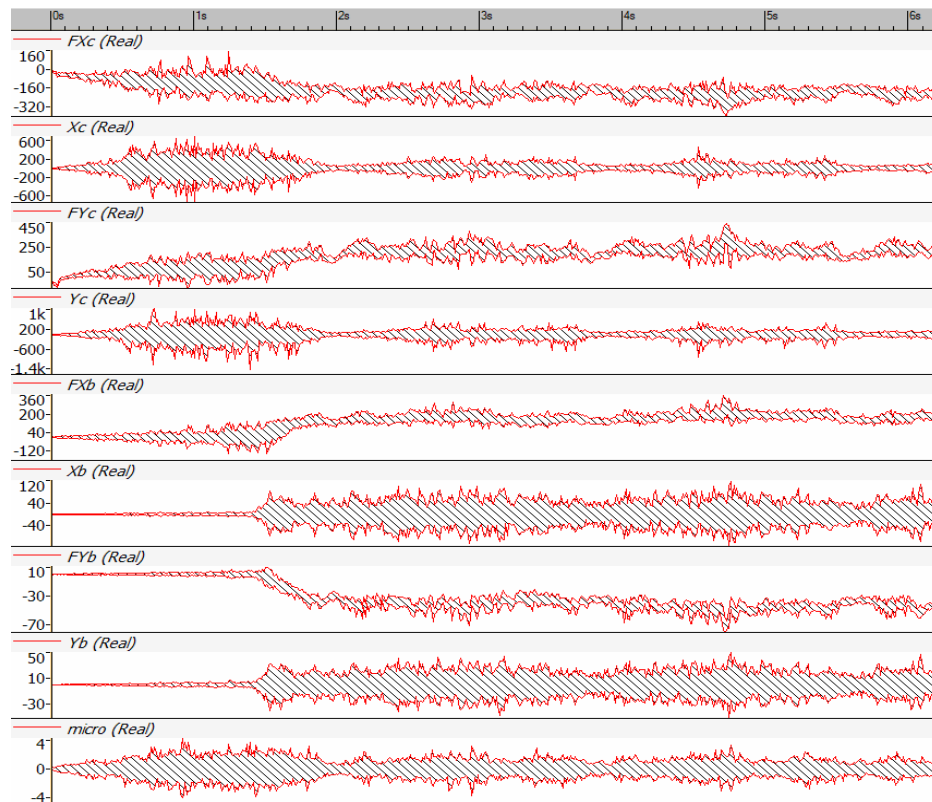


Figure 73 : Relevés des différents capteurs (FXc (x-1), Xc, FYc, Yc, FXb, Xb, FYb (x1/10), Yb et micro, efforts en N/2cm, vibrations en m/s² et pression en Pa) lors des 6 premières secondes d'une opération de microdéroutage de hêtre (essai 23 : $V_c=0.5\text{m/s}$, $E_p=3\text{mm}$, $\delta=0^\circ$, outil rodé, avec barre de pression)

Afin de décrire les tendances et les interactions les plus significatives, des indicateurs propres aux mesures vibratoires et acoustiques ont été calculés sur le dernier tour de chacun des 92 essais du plan complet (nous verrons par la suite pourquoi l'intérêt d'un calcul sur la durée complète de l'essai est limité dans ce cas). Les critères les plus simples et les plus couramment utilisés sont, nous l'avons vu, le RMS et le Kurtosis pour les vibrations. Dans le cas du microphone, la grandeur physique mesurée est une pression qui peut être utilisée en tant que telle, mais la plupart des auteurs lui préfèrent le niveau de pression sonore (rapport de la valeur RMS de la pression à l'incrément minimum de pression détectable par l'oreille humaine, soit 20 μPa , pour une durée déterminée).

Une nouvelle fois, la question du domaine fréquentiel d'étude se pose. Nous avons deux choix assez immédiats :

1. Utiliser les signaux directement et donc échantillonnés à 65536 Hz mais filtrés dès l'acquisition par le filtre anti-repliement de la centrale (25.6 kHz).

2. Filtrer les mesures pour ne conserver que les fréquences susceptibles d'être entendues par les opérateurs.

Nous avons utilisé les deux méthodes en comparant leurs résultats pour l'indicateur RMS. La fréquence de coupure a été choisie à 15 kHz (Butterworth, ordre 3). Elle correspond bien aux fréquences limites réellement audibles par les opérateurs. Par nature, le Kurtosis est sensible aux phénomènes non stationnaires et pour préserver ses chances de fournir une information utile, il est préférable de l'employer pour des signaux non filtrés. Concernant les mesures acoustiques, étant donné que la réponse du microphone s'effondre au-delà de 15 kHz, les différences de résultats entre les deux calculs risquent d'être minimes.

3.1 Vibrations du couteau

3.1.1 Calcul du RMS

Le tableau suivant présente les valeurs des coefficients de corrélation et les taux de confiance associés liant la valeur RMS des signaux des accéléromètres préalablement filtrés (15 kHz) pour les 92 configurations expérimentales du plan complet sur le dernier tour enregistré. Le fait de calculer le RMS des signaux sur la durée d'un tour plus ou moins stabilisé ou sur l'enregistrement complet ne modifie ni les tendances ni les taux de confiances associés. Nous reviendrons sur ce point plus en détail par la suite.

Les coefficients de corrélation et leurs signes illustrés par le graphique des effets (cf. Figure 74) révèlent le comportement « en phase » des niveaux RMS des deux capteurs face à un changement des paramètres de coupe (dans le détail, on distingue tout de même des sensibilités différentes).

	r (RMS Xc)	Signification statistique en % (RMS Xc)	r (RMS Yc)	Signification statistique en % (RMS Yc)
Essence	-0.4365	100	-0.2892	99.48
Usure	-0.1034	67.33	-0.3160	99.78
Angle de dépouille	0.1245	76.31	0.2437	98.08
Barre de pression	-0.3601	99.96	-0.1874	92.64
Épaisseur	0.2558	98.61	0.2050	95.01
Vitesse	0.6159	100	0.5995	100

Tableau 16 : Comparaison des coefficients de corrélations obtenus sur un tour entre les valeurs RMS des signaux Xc et Yc filtrés (15kHz) et les facteurs expérimentaux (calcul sur 92 échantillons).

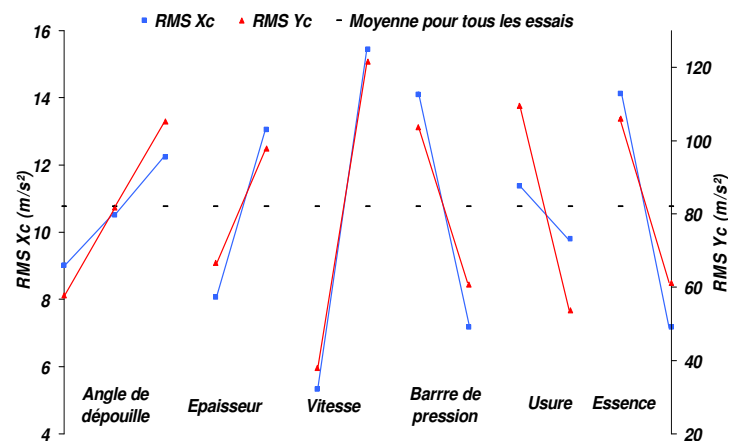


Figure 74 : Graphique des effets de la valeur RMS des signaux Xc et Yc sur un tour (92 essais après filtrage (15kHz))

Les niveaux RMS des deux capteurs ne sont pas significativement corrélés aux valeurs moyennes des efforts de coupe. Par contre, le RMS de Xc l'est aux variations de l'effort FXc ($r_{\text{RMS Xc/Ecart type FXc}}=0.5972$ à 100%). Nous verrons pourquoi cette tendance n'apparaît pas dans la direction Y.

3.1.1.1 Influence de la vitesse

La valeur RMS des signaux issus des deux accéléromètres sont très fortement corrélés à la vitesse de coupe sans qu'un effet masquant grave ne soit sensible. Les tendances mises en évidence par les deux matrices des corrélations obtenues à partir des échantillons à faible et à grande vitesse sont conservées (modification des significations statistiques inférieures à 5%). Il s'agit d'un fait nouveau et rarement explicité y compris dans l'usinage des métaux. Les graphiques des effets (cf. Figure 74 et Figure 78) confirment le rôle prépondérant joué par la vitesse qu'il s'agisse de bois ou de PTFE.

A première vue, dans l'optique de développer un système de contrôle en ligne, cette tendance risque de limiter les applications de l'outil RMS des vibrations. Le même calcul mené sur les signaux bruts augmente très légèrement les valeurs des coefficients de corrélation ($r_{(Xc/Vc)}=0.6608$ et $r_{(Yc/Vc)}=0.5962$) sans limiter leurs significations statistiques. L'énergie supplémentaire transmise aux capteurs, et donc au couteau, lorsque la vitesse de coupe augmente affecte considérablement le domaine fréquentiel de l'audible (en deçà de 20 Hz, la sensibilité des accéléromètres s'effondre).

Les essais 105 à 107 ont été réalisés sur des disques complets de hêtre à vitesse de rotation constante ($E_p=1$ mm, $\delta=0^\circ$, sans barre).

Le tableau ci-contre, présente les valeurs RMS des signaux vibratoires non filtrés calculés sur 2 secondes (durée d'un tour pour la plus faible vitesse). La réduction du niveau moyen des vibrations est très claire pour les trois configurations. Durant l'essai, la vitesse de coupe linéaire diminue proportionnellement à la valeur du rayon de déroulage. Dans le même temps, le seul paramètre modulé en l'absence de barre de pression est la longueur de contact entre la face de dépouille et le billon qui diminue légèrement. On peut assimiler cela à une augmentation progressive de la valeur de l'angle de dépouille.

vitesse de rotation (tr/min)	30	60	120
RMS Xc initial (m/s ²)	11.3	14.6	18.4
RMS Xc final (m/s ²)	5.52	10.7	16.3
diminution (%)	51.15	26.71	11.41
RMS Yc initial (m/s ²)	19	35.6	79.3
RMS Yc final (m/s ²)	10.7	23	51.2
diminution (%)	43.68	35.39	35.44

Tableau 17 : Valeurs RMS des signaux vibratoires bruts des essais 105 à 107 calculées sur 2 secondes

(initial : 2 premières secondes d'usinage, final 2 dernières secondes)

D'après la matrice des corrélations et les graphiques des effets, lorsque son influence est significative, elle s'oppose au phénomène observé et ne peut donc expliquer cette tendance.

De plus, l'augmentation de la vitesse de rotation des moteurs brushless accompagnant la réduction du diamètre du billon n'influence pas significativement la valeur RMS des vibrations. La Figure 75 compare les valeurs RMS de l'accéléromètre Xc obtenues pour le dernier tour et sur la durée totale de l'essai. On peut considérer ces mesures comme équivalentes, surtout si l'on tient compte des perturbations potentielles occasionnées lors du premier tour de déroulage en présence d'une barre de pression (cf. Figure 73).

La Figure 75 révèle aussi l'intérêt limité d'un double calcul (dernier tour ou essai complet). Pour conserver une certaine cohérence avec les analyses des paragraphes précédents, nous ne présenterons plus que des calculs obtenus à partir du dernier tour enregistré. Le cas particulier du premier tour en présence de la barre de pression sera spécifiquement abordé dans la partie VI.

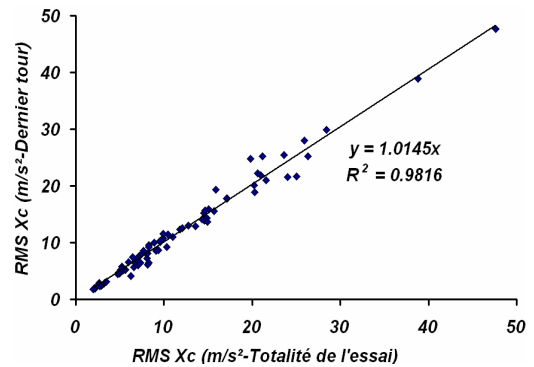


Figure 75 : Valeurs RMS du signal Xc filtré calculé (dernier tour vs essai complet-92 essais)

Le RMS des vibrations est donc très sensible à la vitesse de sollicitation (beaucoup plus que les efforts) qui conditionne pour une grande part, la quantité d'énergie dissipée pendant la coupe. Il ne perçoit ni l'accélération du moteur de broche ni celle de l'avance du chariot ce qui suggère un lien étroit entre le mécanisme de coupe et les vibrations. On peut effectuer le parallèle avec le tournage des métaux. Lors d'une opération de dressage (directions de coupe et d'avance identiques au déroulage), où les vitesses sont bien supérieures en général, travailler à vitesse de rotation constante se traduit toujours par une hétérogénéité forte de l'état de surface, preuve d'une évolution du mécanisme de formation du copeau. La comparaison des spectres des accéléromètres pour les modes de fonctionnement nous permettrait sans doute d'appuyer cette remarque.

On perçoit aussi la difficulté liée à une utilisation directe du RMS des vibrations à vitesse de rotation constante, heureusement minoritairement employé dans l'industrie. En effet, les bornes imaginables pour informer l'opérateur de l'état du process devront être mobiles avant même de tenir compte du moindre paramètre de coupe.

3.1.1.2 Essence

Les niveaux RMS des signaux des deux accéléromètres diminuent fortement lorsqu'on passe du hêtre au peuplier. Nous avons déjà vérifié cette tendance au niveau des efforts de coupe. Il est donc logique de la retrouver en terme d'énergie. Tous les phénomènes mécaniques mis en jeu lors de la fabrication d'un placage (compression, cisaillement, traction) requièrent d'autant plus d'énergie que le bois est dense. De plus, la présence de gros rayons ligneux et

l'orientation du plan de coupe plus instable pour le hêtre ne peuvent qu'accentuer cette tendance. Cela rejoint les observations des opérateurs qui déroulent diverses essences.

3.1.1.3 Epaisseur et barre de pression

Comme la moyenne et surtout l'écart type des efforts de coupe, les niveaux RMS des accéléromètres augmentent avec l'épaisseur et diminuent sous l'action de la barre de manière très nette (cf. Tableau 16) en particulier pour l'accéléromètre Xc vissé sous l'outil. En calculant la matrice des corrélations uniquement sur les 44 essais réalisés en présence de la barre de pression, la corrélation qui lie épaisseur du placage aux niveaux RMS des accéléromètres n'est plus significative. On peut penser qu'il s'agit là de la trace de la fissuration du placage étant donné la forte baisse de l'amplitude des vibrations dès l'entrée en lice de la barre de pression (cf. Figure 73).

La Figure 76 illustre l'évolution des niveaux RMS des accéléromètres calculés sur une durée de 4 secondes (environ un tour) pour les essais (108 à 125). Une relation linéaire modélise bien l'augmentation du niveau vibratoire qui accompagne celle de l'épaisseur et de la fissuration (profondeur et pas d'après 1.2.2).

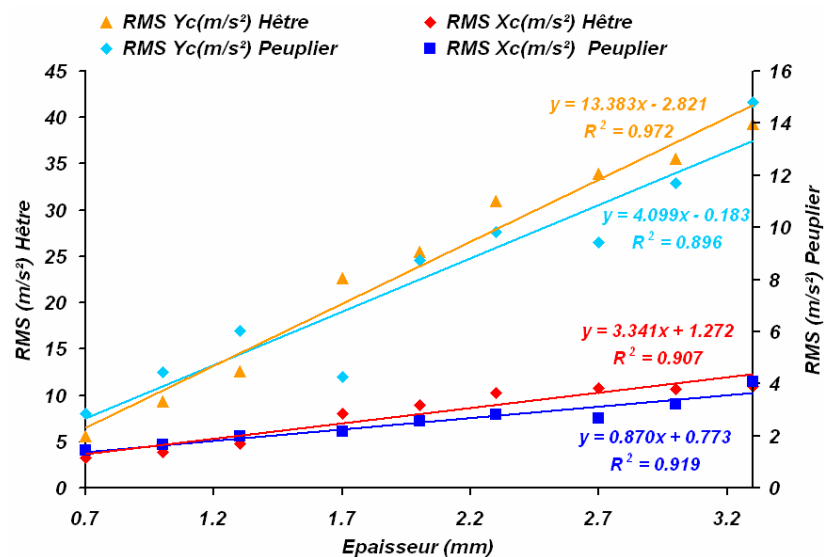


Figure 76 : RMS des accéléromètres de l'outil en fonction de l'épaisseur déroulée (calculé sur 4 s, $V_c=0.1m/s$, $\delta=0^\circ$, sans barre de pression).

Un rapport de l'ordre de 3 existe entre les pentes des régressions pour les deux essences ce qui tend à confirmer l'influence de la densité sur le niveau des vibrations. Enfin, bien que le phénomène de fissuration soit prépondérant dans la direction de coupe, sa signature est nettement plus caractéristique au niveau de l'arête de coupe ce qui souligne l'intérêt de placer les capteurs au plus près de la source des phénomènes recherchés.

Pour terminer de nous convaincre du rôle prépondérant joué par le mécanisme de fissuration, il suffit de mesurer le RMS des capteurs vibratoires lorsque le taux de pression de la barre varie. Les configurations 125 à 129 pour le peuplier s'y prêtent bien (taux de pression respectifs de 0, 5, 10, 15 et 20% avec $Ep=3mm$, $V_c=0.5m/s$, et $\delta=0^\circ$). La Figure 77 présente l'évolution du RMS de Yc calculé sur 4 secondes (déroulage complet sans le premier tour) pour les essais précédemment cités et répétés une fois (1^{ère} et 2^{ème} séries). L'enregistrement de

l'essai 125 a échoué. Les valeurs du RMS pour un taux de pression nul sont issues de l'essai 35 conduit rigoureusement dans les mêmes conditions.

Le niveau vibratoire s'effondre dès que la barre entre en action (comme les enveloppes des signaux de la Figure 73). Même si les fissures sont encore présentes sur le placage, leur extension est déjà fortement limitée par le champ de contrainte exercé par la barre. Ensuite, la baisse est plus régulière et se poursuit même lorsque le placage ne présente quasiment plus de fissures classiques (dès un taux de compression de 15%).

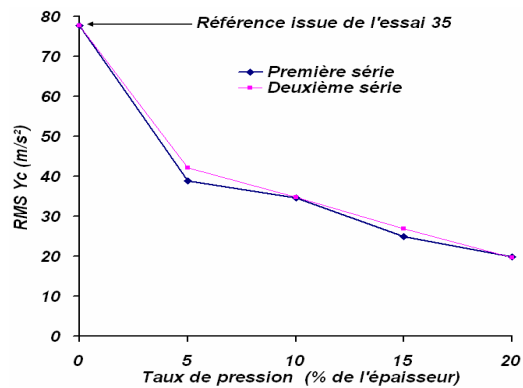


Figure 77 : RMS Yc en fonction du taux de pression de la barre (calculé sur 4 secondes, peuplier, $V_c=0.5\text{m/s}$, $E_p=3\text{mm}$ et $\delta=0^\circ$, essais 126 à 129 répétés une fois).

On peut donc retenir que les capteurs vibratoires sont très sensibles à l'ouverture des fissures en l'absence de barre de pression. Par contre, lorsque celle-ci agit, elle diminue le niveau vibratoire moyen des signaux sans toutefois interdire la détection des fissures comme nous le verrons dans la partie VI lors d'une analyse plus précise de ce phénomène et de la manière de le mesurer. Il aurait été intéressant de dérouler certains placages avec des taux de compression exagérément élevés afin d'en évaluer les conséquences sur le signal.

3.1.1.4 Angle de dépouille et usure

Que le calcul soit mené sur les signaux bruts ou filtrés, le RMS du signal Xc reste insensible d'un point de vue statistique aux variations de la valeur de l'angle de dépouille contrairement à son homologue dans la direction perpendiculaire. Une augmentation de la valeur de cet angle se traduit par une hausse de l'énergie du signal contrairement à l'écart type de l'effort dans la même direction. C'est très probablement une des raisons pour lesquelles l'écart type de FYc et le RMS de Yc ne sont pas corrélés en général. Cette hausse est tout aussi significative lorsque le calcul s'effectue sur les résultats filtrés ou bruts des modalités outil rodé (47 échantillons) et outil usé (45 échantillons).

On peut établir un parallèle avec la remarque proposée par [LIM_1995] selon laquelle au-delà d'une certaine usure de l'arête de coupe (deuxième bosse de la Figure 40), la face de dépouille de l'outil frotte sur la pièce amortissant ainsi les vibrations. Si cette hypothèse (non vérifiée mais également avancée par [CHIOU et al_1999]) est envisageable dans le cas du tournage des métaux, en revanche, pour le déroulage elle semble on ne peut plus crédible. On conçoit aisément que lorsque l'outil talonne, le billon joue le rôle d'un amortisseur.

L'effet de l'usure sur le RMS du signal Yc corrobore cette hypothèse. Comme l'avaient remarqué [NAGATOMI et al_1994] lors de mesures acoustiques en perçage de bois sur une

bande 10-20 kHz, l'usure s'accompagne d'une réduction du niveau vibratoire sur la face de dépouille (cf. Tableau 16). Lorsque le rayon de bec de l'outil est important, la longueur de contact augmente sensiblement en particulier pour des angles de dépouille positifs ou nuls.

Dans la direction de coupe, cette tendance n'est sensible que pour les signaux bruts ($r_{Xc/usure} = -0.3834$ à 99.98%) tandis que l'effet de la dépouille reste non significatif sur le niveau RMS de Xc . Or, l'usure ne se traduit pas seulement par une diminution de la valeur de l'angle de dépouille au sommet de l'arête de coupe, elle modifie aussi le mécanisme de formation du copeau en favorisant la compression et l'arrachement de cellules en amont de l'arête (effet Horner). La signature de ce phénomène semble donc se situer dans les hautes fréquences. Les opérateurs sur dérouleuse ne détectent pas l'usure de l'outil à partir des sons générés par la coupe mais plutôt en écoutant le bruit émis par le moteur qui doit fournir un couple important et en observant l'état de surface du placage.

Ces remarques suggèrent l'existence d'une double signature d'une usure prononcée de l'outil :

- dans le domaine des fréquences plutôt hautes, probablement liée au mécanisme de formation du copeau sans négliger la possibilité d'une interaction des phénomènes en cours sur la face de dépouille (comme nous l'avons déjà remarqué pour FXc)
- à basses fréquences voire sur toute la bande, liée aux interactions face de dépouille/billon.

Lorsque la dépouille est négative, il n'est pas possible de trouver d'influence significative de l'usure de l'outil sur les valeurs RMS des signaux bruts ou filtrés de Yc . Par contre, le fait de ne plus talonner s'accompagne toujours de corrélations significatives entre l'usure et le RMS. Autrement dit, l'effet d'un angle de dépouille négatif prime sur celui, très similaire, produit par la croissance du rayon de bec de l'outil suivant Yc . En revanche, dès que l'angle de dépouille devient suffisamment grand, l'effet « talonnage » introduit par l'usure de l'outil se combine à un changement de régime de coupe mesurable également sur le signal Xc ($r_{(RMS Yc/usure)} = -0.4298$ à 98.59% et $r_{(RMS Xc/usure)} = -0.5211$ à 99.78% pour les 32 essais où $\delta = 1^\circ$).

Ce dernier phénomène est propre à la coupe du bois puisque le graphique des effets réalisés à partir des essais de déroulage de PTFE montre, à l'inverse, une croissance du niveau RMS des vibrations avec l'usure dans la direction de coupe. Le fait que le RMS de Yc semble insensible à l'usure de l'outil étaye encore davantage cette thèse puisque contrairement au cas du bois, réduction de dépouille et usure de l'outil ont des effets antagonistes.

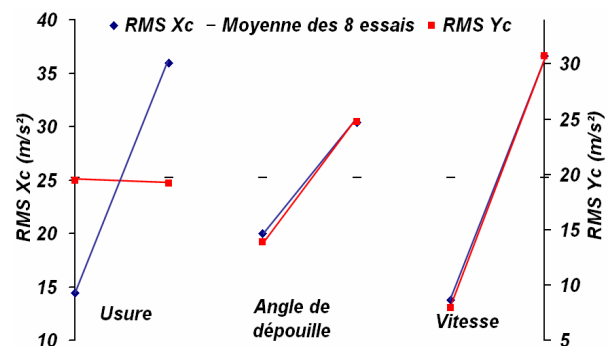


Figure 78 : Graphique des effets des RMS de Xc et de Yc pour 8 essais sur un tour de déroulage (signal brut, PTFE)

A ce stade, il n'est pas possible d'évaluer les contributions respectives de la modification du mécanisme de formation du copeau et de la diminution de valeur de l'angle de dépouille, sur le niveau RMS du signal issu de Yc. On peut simplement remarquer que dans le cas du PTFE, elles s'annulent. L'analyse des spectres des signaux des accéléromètres permettrait certainement d'initier une réponse.

L'interaction qui lie angle de dépouille et usure nous ferme l'accès aux conséquences éventuelles de la présence de paquets de fibres arrachées sur la nature du frottement entre la face de dépouille et le billon. On peut cependant suspecter un rôle mineur de la peluche sur le niveau vibratoire de Yc puisque lorsque l'angle de dépouille est négatif, favorisant pourtant un frottement intense, l'effet de l'usure n'est pas significative.

Le RMS du signal Xc semble donc très influencé par les phénomènes en cours au sommet de l'arête de coupe, tandis que celui de Yc est également largement conditionné par la nature du contact entre l'outil et le billon. Il s'agit d'informations nouvelles dans le cas du déroulage. Nous avons tout intérêt à utiliser des spectres assez étendus pour retrouver les bandes fréquentielles les plus sensibles à l'usure (en particulier dans la direction de coupe).

En choisissant deux modalités caractéristiques (outil neuf, outil usé), on s'interdit l'accès à l'évolution de l'énergie des signaux vibratoires en fonction de l'usure de l'outil. D'après [LIM_1995], elle doit suivre une courbe en forme de double cloche en fonction de la longueur usinée. [LEMASTER et al (b)_2000] a retrouvé un allure semblable en défonçage mais dans des bandes fréquentielles spécifiques. Pour trancher cette question, quelques essais complémentaires ont été réalisés avec des outillages légèrement différents de ceux déjà présentés en partie IV.

3.1.1.5 Influence de l'évolution de l'usure

La mesure du recul de l'arête de coupe, bon indicateur de l'état d'usure de l'outil en déroulage, nécessite le démontage de l'outil. Les contraintes inhérentes à cette manipulation, nous ont convaincu de dissocier l'analyse des effets d'une usure très prononcée de celle du suivi de son évolution. Une campagne expérimentale visant à évaluer l'intérêt de préparer l'arête de coupe par microsablage afin d'améliorer la tenue des dépôts durs, sur des couteaux de déroulage, a été conduite sur la microdérouleuse.

Le principe consiste à pulvériser l'outil, et en particulier son arête, avec un brouillard d'eau et de corindon (oxyde d'aluminium), sous une pression relativement importante (4.5 bar), dans une chambre. L'outil est entraîné en rotation autour de deux axes (A et B) pour homogénéiser le traitement.

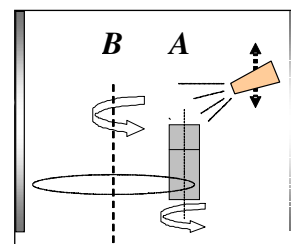


Figure 79 : Principe du microsablage

Cette opération permet d'ébavurer l'outil et de libérer une part de ses contraintes internes. La tenue des couches minces et dures employées pour ralentir son usure est aussi améliorée.

Cinq couteaux identiques en acier 60SMD8 ont été utilisés mais de taille standard pour la microdériveuse ce qui nous interdit le positionnement d'un accéléromètre sur la face de dépouille. (REVETU 1) et (RODE 1) ont subi le flux abrasif pendant un aller retour de la buse. Pour (REVETU 2) et (RODE 2), cette procédure a été répétée une fois. (REVETU 1) et (REVETU 2) ont ensuite été revêtus d'un dépôt de type CrAlN par la méthode PVD (Physical Vapor Deposition : dépôt par condensation de la vapeur métallique à la surface de la pièce). Enfin, le dernier (TEMOIN), n'a subi aucun traitement spécifique ce qui lui confère une arête « parfaite » (rayon de bec de quelques microns).

Nous ne disposons pas de plus d'informations sur les durées effectives de microsablage qui conditionnent la géométrie de l'arête de coupe. Néanmoins, notre objectif pour cette campagne réside dans l'évolution du comportement vibratoire de l'outil en fonction de son usure et non dans la validation du processus de microsablage.

Nous avons utilisé la même centrale d'acquisition mais pour trois capteurs seulement (FXc, FYc et Xc' pour éviter la confusion). L'accéléromètre a été fixé sur le porte-outil en utilisant de la cire d'abeille (linéaire jusqu'à 10 kHz voir 15 kHz si la température ambiante reste faible) puisqu'une liaison visée était beaucoup trop contraignante à réaliser (protocole de fabrication des outils rigide) et à manipuler (démontages répétés des outils pour mesurer le recul d'arête). Cette configuration ne nous permet pas d'accéder aux hautes fréquences. Aussi, le déroulement des essais a été exclusivement consacré au suivi de l'usure. Chaque couteau a fabriqué 3000 m de placage de hêtre ($V_c=1\text{m/s}$, $\delta=1^\circ$, $E_p=1\text{mm}$). La mesure du recul d'arête et les acquisitions d'efforts et de vibrations ont été conduites pour les longueurs usinées suivantes : 0, 90, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 et 3000 m. De cette manière, les effets divergents introduits par la variation des différents paramètres seront évincés. L'accès à l'évolution de l'usure sera direct ce qui est nécessaire puisque nous ne pouvons pas accéder aux conditions les plus favorables de mesure (mesure de Yc sur un large domaine fréquentiel).

Nous présenterons essentiellement les résultats tirés du signal de l'accéléromètre dans la direction de coupe (noté Xc' pour éviter la confusion) et de l'effort FYc.

Les valeurs du RMS du signal ont été calculées sur toute la durée de l'enregistrement disponible au-delà du premier tour de déroulage pour une bande fréquentielle limitée à 12.8 kHz (cf. Figure 80). Certaines données sont manquantes mais ne pénalisent pas la lisibilité des résultats. De plus, les disques de hêtre n'ont malheureusement pas pu être tous prélevés dans le même arbre (de 0 à 1500 m, disques provenant d'un premier arbre ; de 1500 à 3000m, disques issus d'un second arbre pour tous les outils).

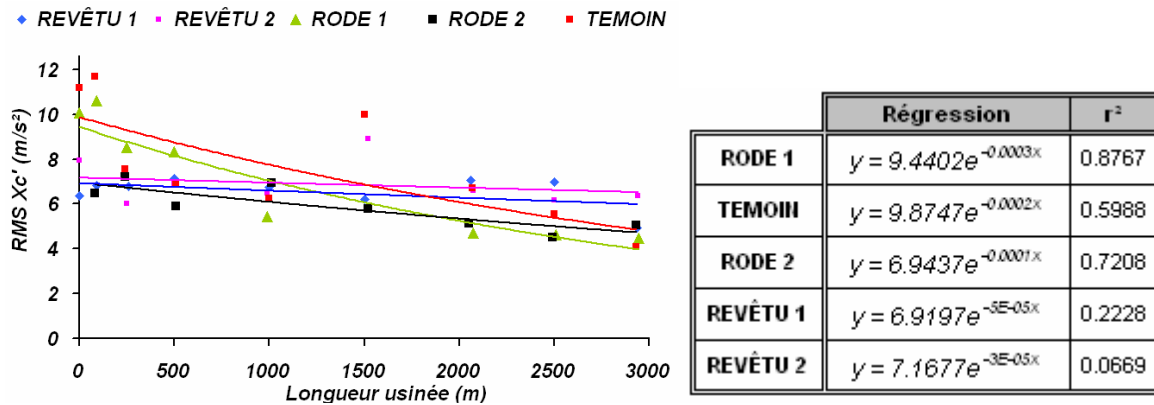


Figure 80 : Evolution du RMS de l'accéléromètre positionné suivant la direction de coupe en fonction de la longueur usinée (hêtre, $V_c=1\text{m/s}$, $\delta=1^\circ$, $E_p=1\text{mm}$).

Quelque soit le mode de préparation de l'arête de l'outil, le RMS du signal décroît plus ou moins régulièrement avec la longueur usinée. Les modèles de régression présentés sur la figure précédente sont tous de type exponentiel (légèrement meilleur que de type linéaire ici). Les valeurs des coefficients de détermination ne permettent pas toujours de considérer ces modèles comme satisfaisants. En particulier, les deux outils revêtus correspondent mal à cette description.

Les relevés vibratoires évoluent peu avec la longueur usinée ce qui révèle un apport des revêtements vis-à-vis de l'usure concrétisé par un faible recul d'arête (cf. Figure 81). Pour les trois autres, les modèles sont acceptables surtout en tenant compte de la perturbation occasionnée par le changement d'arbre. Ces relevés ne correspondent pas aux résultats obtenus dans le défonçage de bois sec par [LEMASTER et al (b)_2000].

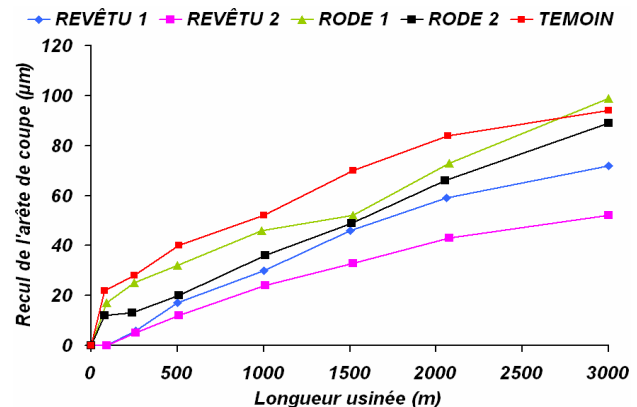


Figure 81 : Recul d'arête en fonction de la longueur usinée (5 outils)

Le suivi de la moyenne de l'effort F_{Yc} (cf. Figure 82) est un bon indicateur pour détecter l'apparition d'un régime de refus de coupe. Après 3000 mètres, cette situation est déjà atteinte pour un des outils et se profile dangereusement pour les 4 autres. De plus, les premières traces de peluche apparaissent sur les placages. On peut donc considérer qu'à ce stade, les opérateurs auraient déjà procédé à un affûtage léger de l'outil (pierrage).

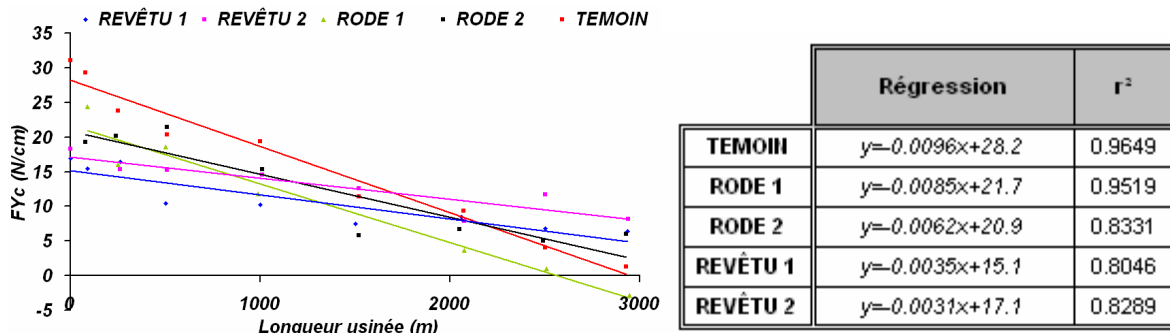


Figure 82 : Evolution de FYc moyen en fonction de la longueur usinée pour les 5 copeaux testés

Il n'est pas impossible de retrouver une forme en double cloche en se focalisant sur certaines bandes fréquentielles particulières et en poussant plus avant l'usure de l'outil mais rien ne le laisse penser. De plus, le calcul du RMS des vibrations dans la direction de coupe (à fortiori aussi pour Yc étant donné la bonne corrélation des relevés vibratoires du paragraphe précédent) semble décrire l'évolution de l'usure de manière satisfaisante puisqu'il propose une hiérarchisation des outils similaire à celle issue de bons indicateurs tels que la mesure de FYc moyen (pentes des régressions) et celle du recul de l'arête de coupe.

En conclusion, nous pourrions retenir que l'usure de l'outil se traduit par une baisse assez régulière du RMS des vibrations sur une large bande fréquentielle. Cette tendance reflète le talonnage de l'outil issu de la croissance du rayon de bec ainsi qu'une évolution du mécanisme de coupe. Leurs conséquences sont néfastes pour la qualité du produit (placages de catégorie (a)).

3.1.2 Calcul du Kurtosis

Pour une distribution gaussienne de référence, qui sied bien en général à la manifestation d'un phénomène physique réel, le Kurtosis associé vaut 3. Dans le cas du déroulage, le phénomène de fissuration risque bien d'augmenter significativement cette valeur. Le tableau suivant présente l'extrait de la matrice des corrélations concernant le Kurtosis des signaux vibratoires dans les deux directions privilégiées du déroulage en fonction des paramètres du plan complet (92 essais).

	r (Kurtosis Xc)	Signification statistique en % (Kurtosis Xc)	r (Kurtosis Yc)	Signification statistique en % (Kurtosis Yc)
Essence	-0.1775	90.94	-0.2716	99.12
Usure	-0.121	74.96	-0.1494	84.49
Angle de dépouille	-0.0304	22.62	0.0217	16.29
Barre de pression	-0.4317	100.00	-0.4180	100.00
Epaisseur	0.3484	99.93	0.3186	99.80
Vitesse	-0.4635	100.00	-0.4076	99.99

Tableau 18 : Comparaison des coefficients de corrélations obtenus sur un tour entre les valeurs du Kurtosis des signaux Xc et Yc bruts et les facteurs expérimentaux (calcul sur 92 échantillons).

Les valeurs moyennes du Kurtosis pour l'ensemble des échantillons valent respectivement 5.61 et 6.72 pour Xc et Yc. Cela implique que toute corrélation négative significative rapproche les mesures d'une distribution aléatoire. Seule l'augmentation de l'épaisseur du placage se traduit par une forte hausse du Kurtosis. Cette tendance n'étant plus significative lorsque le calcul des corrélations s'effectue sur les modalités où la barre de pression agit (44 essais), on peut suspecter une très forte dépendance de la valeur du Kurtosis à la présence ou non de fissures. Le suivi des autres paramètres permet de le confirmer.

Ainsi, lorsqu'on scinde l'échantillonnage en fonction de l'épaisseur déroulée, l'essence reste un facteur défavorable de manière significative uniquement en faible épaisseur ($r_{(\text{KurtosisXc/essence})} = -0.5035$ à 99.96% et $r_{(\text{KurtosisYc/essence})} = -0.5136$ à 99.97%), où nous l'avons vu, le phénomène de fissuration déjà bien marqué à 1 mm pour le hêtre est difficilement décelable (sur certaines portions du placage seulement) pour le peuplier.

Lorsque la vitesse de coupe passe de 0.5 à 2 m/s, les fréquences moyennes de fissuration sont multipliées par quatre au moins (la partie VI apportera des réponses plus précises sur ce point). Les chocs liés à l'ouverture des fissures deviennent de plus en plus fréquents amplifiant le niveau d'énergie moyen du signal. Le Kurtosis diminue alors de la même manière que celui obtenu pour un roulement en fin de dégradation.

Le Kurtosis est donc un indicateur intéressant et relativement sensible de l'apparition de fissures dans le placage puisqu'il permet le distinguo en faible épaisseur entre le hêtre et le peuplier. Son utilisation pourra cependant être limitée lorsque les vitesses de déroulage usitées seront grandes.

3.2 Vibrations de la barre

Nous avons vérifié la proportionnalité des efforts exercés par la barre de pression en V.2.3. D'un point de vue vibratoire, le lien est aussi étroit puisque les RMS des signaux Xb et Yb calculés sur un tour sont corrélés très significativement ($r=0.9934$ à 100%). Leurs comportements respectifs vis-à-vis des paramètres de coupe sont similaires (cf. Tableau 19).

N'excluons pas la possibilité qu'une part importante du signal transmis par l'accéléromètre Yc provienne d'une sollicitation transverse à sa direction de mesure comme nous l'avons remarqué lors des essais de sonnage. La situation est heureusement beaucoup moins critique que lors d'un choc « raide » exercé avec un marteau instrumenté. En effet, sachant que la moyenne des valeurs RMS des 44 essais vaut 31.733 m/s² pour Xb et en tenant compte de la sensibilité transverse de 5 % fournie par le constructeur, la contribution maximale des vibrations dans la direction X mesurée par Yc n'excède pas 1.587 m/s². La moyenne¹⁸ des

¹⁸ Le choix des valeurs moyennes est en effet appuyé par la très bonne corrélation qui lie les deux signaux.

valeurs RMS des 44 essais étant 13.127 m/s² pour Yb, la contribution de la sollicitation transverse n'excède pas 13.76 % du signal. Cette démarche ne présente pas la rigueur d'un calcul d'incertitude précis mais permet simplement de vérifier que l'analyse a un sens.

La densité et la vitesse requièrent plus d'énergie lorsqu'elles augmentent ce qui se traduit par une hausse de l'énergie moyenne contenue dans les signaux vibratoires.

	r (RMS Xb)	Signification statistique en % (RMS Xb)	r (RMS Yb)	Signification statistique en % (RMS Yb)
Essence	-0.3157	96.31	-0.2736	92.77
Usure	-0.4705	99.87	-0.4570	99.82
Angle de dépouille	0.1319	60.68	0.1568	69.06
Epaisseur	0.1897	78.26	0.2075	82.36
Vitesse	0.3233	96.77	0.3394	97.58

Tableau 19 : Coefficients de corrélation obtenus sur un tour entre les valeurs RMS des signaux Xb et Yb filtrés (15kHz) et les facteurs expérimentaux (calcul sur 92 échantillons).

Le cas de l'usure est assez riche d'enseignements. Elle s'accompagne d'une baisse du niveau vibratoire de la même manière que pour les mesures réalisées au niveau du couteau pour les données filtrées. Le fait de reconduire le calcul sur les données brutes ne modifie pour ainsi dire pas les résultats ($r_{(RMS\ Xb/usure)} = -0.4706$ à 99.87% et $r_{(RMS\ Yb/usure)} = -0.4570$ à 99.82%). On peut penser que le mécanisme en cours est comparable à celui observé sur la face de dépouille lorsqu'elle frotte sur le billon. L'usure s'accompagne d'un régime de refus de coupe qui favorise la formation d'une sur-épaisseur sur le billon. Ce dernier joue encore le rôle d'amortisseur des vibrations, de façon d'autant plus intense que la pénétration de la barre est importante. Les essais 128 et 129 menés sur du peuplier avec des conditions de coupe identiques en dehors du taux de pression, respectivement 15 et 20%, tendent dans ce sens puisque le RMS de Yb calculé sur le dernier tour passe de 4.43 à 3.62 m/s². Ces niveaux de pénétration limitent fortement le phénomène de fissuration qui ne peut donc être à l'origine de cette baisse.

Ce mécanisme explique aussi pourquoi moyennes et écarts types des efforts ne sont pas statistiquement liés aux RMS des vibrations dans les directions correspondantes. En effet, si ces critères évoluent plutôt de concert pour tous les facteurs du plan d'expérience, en revanche, pour l'usure, leurs comportements divergent puisque les efforts augmentent sensiblement sous l'action de la sur-épaisseur. En reconduisant le calcul sur les essais réalisés avec un outil rodé, on retrouve des coefficients de corrélations significatifs ($r_{(RMS\ Xb/moyenne\ FXb)} = 0.6463$ à 99.91% , $r_{(RMS\ Xb/Ecart\ type\ FXb)} = -0.3553$ à 90.38% et $r_{(RMS\ Yb/moyenne\ FYb)} = 0.6858$ à 99.97% , $r_{(RMS\ Yb/Ecart\ type\ FYb)} = -0.4485$ à 96.82%).

Enfin, on peut confirmer que l'état de surface et en particulier la présence de fibres arrachées n'a probablement que peu d'influence sur la baisse du niveau des vibrations puisqu'elle est aussi sensible vis-à-vis de l'usure pour les deux essences ($r_{(RMS\ Yb/usure)} = -0.4515$ à 97.32%).

pour le peuplier et $r_{(RMS\ Yb/usure)} = -0.5387$ à 98.57% pour le hêtre) alors que les placages de peuplier sont nettement plus pelucheux.

3.3 Mesures acoustiques : SPL

Le niveau de pression sonore du microphone a été calculé pour les signaux bruts et les signaux filtrés pour les 92 échantillons du plan complet. Comme on pouvait s’y attendre étant donné les caractéristiques du microphone, cette opération n’est pas nécessaire. Nous travaillons quoi qu’il arrive sur une bande limitée à 15 kHz.

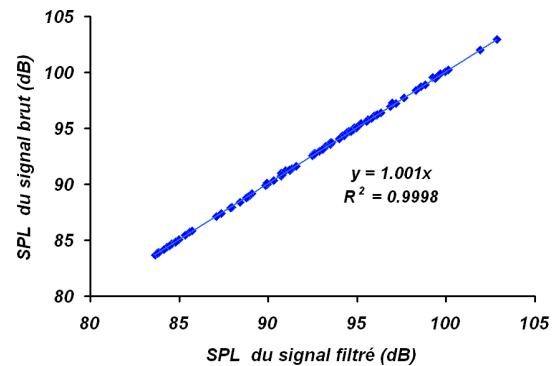


Figure 83 : Comparaison des niveaux de pression sonores mesurés avec ou sans filtrage (92 essais)

Comme pour les autres capteurs vibratoires, les calculs ont été conduits sur un seul tour de déroulage de manière à décrire les interactions entre les paramètres et les descripteurs choisis.

Le Tableau 20 ci-joint, nous révèle tout d’abord une insensibilité du microphone à l’usure et à la valeur de l’angle de dépouille ce qui est décevant pour les entrepreneurs qui espèrent un résultat inverse en particulier pour l’usure. Avant de bannir complètement la méthode, il serait utile de reproduire ces tests pour une dérouleuse de type industriel ou la longueur de l’outil modifie considérablement la situation.

On retrouve aussi dans le tableau ci-contre une forte dépendance à la vitesse. Les raisons énergétiques mises en avant pour les autres capteurs vibratoires restent valables et sont relayées par l’environnement de travail. En effet, tous les éléments de puissance ou de transmission de mouvements sont sollicités plus intensément.

Etant très bien corrélé aux RMS des vibrations, on retrouve la trace d’un lien étroit entre l’écart type des efforts et le SPL. Une fois encore, la présence ou non de fissures permet de comprendre ces liens.

	r (SPL micro)	Signification statistique en % (SPL micro)
Essence	-0.2795	99.30
Usure	-0.0642	45.71
Angle de dépouille	0.076	52.85
Barre de pression	-0.3145	99.77
Epaisseur	0.2435	98.07
Vitesse	0.7468	100
Moyenne_FXc	0.1322	79.11
Ecart type_FXc	0.6032	100
Moyenne_FYc	-0.0864	58.72
Ecart type_FYc	0.3050	99.69
RMS Xc	0.7223	100
RMS Yc	0.7274	100

Tableau 20 : Coefficients de corrélation obtenus sur un tour entre le SPL du micro et les facteurs et descripteurs retenus (92 essais)

Le SPL augmente lorsque les conditions sont réunies pour produire des fissures importantes (forte épaisseur, sans barre). Ainsi, lorsqu'on reconduit le calcul sur les 44 modalités utilisant la barre de pression, seule la vitesse reste significative parmi les 5 facteurs possibles.

Le SPL du micro n'est pas seulement corrélé significativement aux écarts types des efforts et aux RMS des vibrations de la barre, il l'est aussi à la moyenne de l'effort de pénétration FYb ($r=0.3094$ à 95.81%). C'est particulièrement intéressant puisqu'on connaît le lien qui unit cet effort aux variations de la sur-épaisseur sur le billon qui conditionnent celles de l'épaisseur du placage.

3.4 Le cas des variations d'épaisseur

Le tableau suivant est un extrait de la matrice des corrélations entre les mesures acoustiques (SPL), vibratoires (RMS Xc et Yc) et les coefficients descripteurs des variations d'épaisseur. Le seul paramètre significatif est Pmin qui reflète la sensibilité des signaux à l'usage de la barre. En particulier, aucun des trois capteurs n'est sensible à l'écart type de l'épaisseur. Le fait que l'usage de la barre et que l'usure de l'outil s'accompagnent d'une baisse du niveau vibratoire explique ce comportement.

	r (RMS Xc)	Signification statistique en % (RMS Xc)	r (RMS Yc)	Signification statistique en % (RMS Yc)	r (SPL micro)	Signification statistique en % (SPL micro)
Pmin	0.4591	99.71	0.2343	85.44	0.3200	95.59
Pmax/nbtour	-0.0762	35.97	0.0577	27.66	0.0191	9.30
Ecart type	0.0155	7.55	0.1184	53.32	0.1011	46.53
Skeweness	0.2386	86.19	0.0299	14.52	0.2022	78.91
Kurtosis	0.0857	40.08	-0.0889	41.44	0.0316	15.36

Tableau 21 : Coefficients de corrélation obtenus sur un tour entre les valeurs RMS des signaux Xc, Yc, le SPL du microphone et les coefficients descripteurs des variations d'épaisseur (41 essais, sans modalité usure).

3.5 Synthèse

L'influence des différents paramètres du procédé de déroulage sur des indicateurs simples, liés à l'énergie du signal, a été précisée. Le Tableau 22 synthétise les tendances expliquées et nuancées lors de l'analyse.

	RMS Xc	Moyenne FXc	Ecart type FXc	RMS Yc	Moyenne FYc	Ecart type FYc	SPL micro
Essence ²	+++	+++	+++	+++	---	+++	+++
Usure	---	+++	+	---	---	+++	0
Angle de dépeuille	0	-	0	--	+++	-	0
Barre de pression	-	0	---	-	0	0	---
Épaisseur	+	+++	+++	++	0	0	++
Vitesse	+++	0	0	+++	-/0 ¹	++	+++

Tableau 22 : Synthèse des tendances des mesures des efforts (moyenne, écart type), des niveaux de pression sonore et des vibrations (RMS) pour les 92 essais du plan complet

+++=influence positive significative (>99%), ++=influence positive significative (>95%), +=influence positive significative (>90%), 0= influence non significative, -=influence négative significative (>90%), --=influence négative significative (>95%), ---=influence négative significative (>99%)

¹ Très proche de la limite de significativité à 90%

² Reflète l'effet de la densité, de la complexité du plan ligneux et de l'orientation du plan de coupe de manière plus ou moins marquée suivant les paramètres

Les niveaux vibratoires et sonores définis à partir du RMS et du SPL sont en général mieux corrélés aux variations des efforts qu'à leurs modules. Certains facteurs provoquent néanmoins des réactions divergentes. Ainsi, l'usure de l'outil, qui se traduit par une forte hausse des écarts types et des moyennes des efforts, s'accompagne d'une diminution régulière du RMS des accéléromètres (surtout dans la direction d'avance), signe probable d'une modification du mécanisme de formation du copeau mais également de l'interaction entre la face de dépeuille et le billon. En effet, le niveau vibratoire augmente fortement avec la valeur algébrique de l'angle de dépeuille sur cette face. Le microphone n'est pas significativement sensible à ces paramètres dans les plages de variation retenues. Il est par contre très influencé par les perturbations du milieu extérieur et en particulier la valeur de la vitesse de coupe. Cette dernière conditionne également, pour une grande part, le niveau des vibrations. Sans constituer une difficulté insurmontable, cette sensibilité ne facilitera pas la mise en place d'un système de contrôle en ligne.

Tous les indicateurs sont aussi affectés par l'ouverture des fissures. Ce point est intéressant et mérite d'être développé en particulier dans le domaine spectral. En contre partie, à l'échelle d'un tour, leur capacité à percevoir les variations de l'épaisseur du placage n'a pu être que suggérée. En particulier, l'usage de la barre de pression apparaît toujours comme bénéfique alors qu'il s'accompagne aussi de contraintes comme nous l'avons vu en V.1.3.

Cette démarche, nécessaire selon nous, n'avait pas encore été proposée dans la littérature. Elle ne peut se suffire à elle-même et nous invite à analyser plus finement les signaux dans le domaine des spectres en particulier. En effet, l'analyse du contenu des spectres des mesures offre la possibilité de comprendre et de valider les différentes tendances et les résultats établis.

PARTIE VI : Apports des analyses en fréquence et temps-fréquence au suivi du déroulage

1 Analyses vibratoires et acoustiques dans le domaine spectral

Le passage dans le domaine des spectres offre un autre regard sur les phénomènes mis en jeu pendant la coupe en délivrant une représentation immédiate du contenu fréquentiel des signaux. L'analyse globale conduite dans le domaine du temps a révélé certaines tendances des signaux, vis-à-vis des paramètres de coupe, qui méritent d'être étudiées plus finement. En particulier, les rôles joués par la vitesse, la barre de pression et l'usure de l'outil doivent être explicités pour envisager un contrôle en ligne du procédé. D'autre part, la fissuration cyclique du placage influence fortement la plupart des indicateurs utilisés. Rappelons qu'il s'agit d'un défaut des plus contraignants pour les fabricants. De par sa nature quasiment périodique, l'ouverture des fissures risque fort d'apparaître sur les spectres.

La plupart des analyses qui vont suivre sont des estimations des Densités Spectrales de Puissance (DSP) obtenues par la méthode des périodogrammes (Autospectre utilisant la Transformée de Fourier Discrète des signaux discrétisés) présentés succinctement dans la partie III.

1.1 La fissuration

Pour l'ensemble des DSP qui vont suivre (sauf mention contraire), certains paramètres ont été fixés :

- La durée du signal : au moins égale à un tour et ne contenant pas le premier. Dans les faits, le calcul des spectres s'effectue sur 1 à 7 tours suivant les essais (signaux considérés comme stationnaires au-delà d'un tour), ce qui correspond à une durée d'au moins 1.5 s.
- La fenêtre de pondération de type « Hanning ». Bien adaptée au suivi des machines tournantes, elle permet d'éliminer les discontinuités introduites par l'emploi d'une fenêtre uniforme. De plus, combinée à un taux de recouvrement¹⁹ (overlap) supérieur ou égal à 75%

¹⁹ Le taux de recouvrement correspond à la portion d'une fenêtre de temps qui est utilisée dans deux calculs successifs. Concrètement, un taux de recouvrement de 75 % pour une fenêtre d'observation de 500ms signifie que lorsqu'elle a glissé de 100ms sur le signal temporel brut, un nouveau calcul commence. Le nombre de moyennes possibles pour une durée figée est ainsi augmenté ce qui lisse fortement les spectres.

et à un moyennage linéaire des spectres, la pondération devient quasiment uniforme (sans ses inconvénients).

➤ La bande fréquentielle d'analyse : 0-3.2 kHz qui suffit à décrire les fréquences de fissuration les plus élevées parmi les configurations expérimentales adoptées.

➤ La fenêtre d'observation T de 125 ms, compromis entre un grand nombre possible de moyennes des calculs de DSP et une résolution en fréquence suffisamment fine pour notre application, soit 8 Hz dans ce cas. Ces paramètres nous imposent alors le nombre N de points de calcul (400). En effet, en première approche, une résolution grossière facilite l'identification du phénomène de fissuration considéré comme aléatoire (pas parfaitement périodique). Localement, une résolution plus fine sera utile (T=500 ms et N=1600) pour discriminer des fréquences d'excitation proches (fissuration mais pas seulement).

➤ Une moyenne linéaire des résultats (obtenus avec un taux de recouvrement de 95%). Chaque spectre est ainsi le résultat de la moyenne d'au moins 250 calculs.

Le PTFE a été utilisé afin de produire des spectres de référence en fonction des paramètres de coupe (en particulier du point de vue de la fissuration). En conséquence, les essais accomplis avec un angle de dépouille positif et un outil correctement affûté ont été sélectionnés (référéncés 3 et 4 en ANNEXE I) puisque ces conditions sont proches d'un optimum pour ce matériau.

1.1.1 Méthodes de mesure des fréquences de fissuration moyennes

Il est naturel de débiter la recherche des signatures pour des conditions où les défauts ont le plus de chance d'être détectés. Connaissant les paramètres clefs de la fissuration, les DSP des essais les plus enclins à présenter une trace de l'ouverture des fissures ont été obtenues en suivant le protocole précédemment décrit.

1.1.1.1 DSP des signaux des capteurs

La Figure 84 présente les DSP des signaux des accéléromètres Xc et Yc pour l'essai 35 qui correspond à l'usinage d'un placage de peuplier fortement fissuré à faible vitesse ($V_c=0.5\text{m/s}$, $E_p=3\text{mm}$, $\delta=0^\circ$, sans barre de pression avec un outil correctement affûté). Les DSP des signaux émanant des dynamomètres sont très semblables aux spectres des accéléromètres puisque dans ce domaine de fréquence, elles sont sensibles aux mêmes phénomènes (fréquences de résonance et fissuration comme nous allons le voir).

On retrouve sur la Figure 84 plusieurs fréquences de résonances dominantes « proches » de celles qui ont été mises à jour par l'opération de sonnage dans les deux directions de

sollicitation. Les décalages mineurs qui apparaissent localement sont essentiellement²⁰ dus au démontage de l'outil. Compte tenu du système de bridage des outils et de la précision des deux mesures (± 8 Hz pour le sonnage et ± 4 Hz pour le calcul des DSP), ces écarts sont satisfaisants puisqu'ils ne biaisent pas la lisibilité des résultats.

La fréquence de résonance dite « principale » dans le domaine traité est 536 Hz pour les deux signaux qui correspond aux fréquences de 540 pour Yc et 576 Hz pour Xc mesurée lors du sonnage et déjà repérée sur les enregistrements de fonctionnement à vide de la machine. Cette bande fréquentielle ne nous facilitera pas la tâche puisqu'elle peut coïncider avec la fréquence d'apparition des fissures. Nous serons amenés à évaluer à quel point la présence de fréquences de résonance peut pénaliser la détection des fissures.

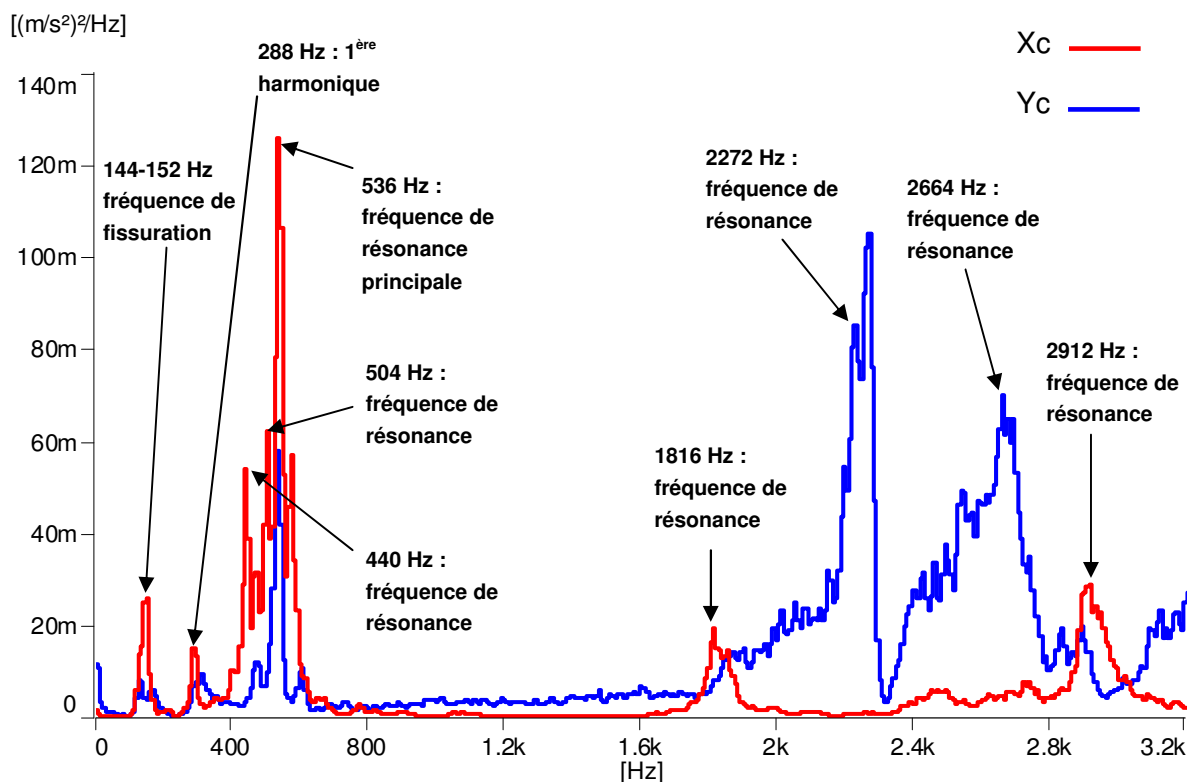


Figure 84 : DSP des signaux des accéléromètres Xc et Yc pour l'essai 35
(peuplier, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=0.5\text{m/s}$, $\delta=0^\circ$, sans barre, outil rodé)

Dans le cas de l'essai 35, la fréquence de fissuration moyenne déduite des mesures effectuées sur le placage devrait être proche de 130 Hz. Il s'agit d'une valeur moyenne qui ne reflète pas la variabilité des distances inter-fissures (écart type de 10 à 30 fissures par mètre suivant les conditions). On doit rechercher une bande de fréquence assez large et plus ou moins bien

²⁰ La coupe constitue une sollicitation mais elle s'accompagne d'un contact entre le billon et l'outil qui est modélisable par une liaison mécanique. Cette rigidité supplémentaire qui boucle le système est parfois considérable dans l'usinage des métaux. A priori, elle est faible pour notre application si les conditions de coupe sont favorables (sans refus de coupe).

centrée ²¹ sur 130 Hz. On remarque un pic pour les deux capteurs correspondant approximativement à cette valeur (144-152 Hz pour Xc). Plus précisément, il s'agit d'une bande de fréquences comprise entre 120 et 160 Hz pour Xc et entre 120 et 184 Hz pour Yc.

Tout porte à penser qu'il s'agit bien de la trace du phénomène de fissuration. Physiquement, en forte épaisseur, le pas entre chaque fissure, et donc la fréquence instantanée, oscille plus ou moins régulièrement autour d'une valeur moyenne en fonction des conditions de déroulage (orientation du plan de coupe, plan ligneux du bois, variation locales de l'épaisseur²²,...).

Cela signifie, en supposant la vitesse de coupe égale à la consigne, que la distance entre deux fissures consécutives est généralement comprise entre 2.7 et 4.2 mm pour un pas principal de 3.5 mm. Le rapport $Fi=d/p$ (pas de fissuration sur épaisseur déroulée) définit dans [THIBAUT_1988] est un peu faible (1.16) par rapport aux valeurs proposées par l'auteur (entre 1.3 et 1.7) mais restent cohérentes. L'auteur avait lui-même obtenu cette valeur pour des placages de 2 mm d'épaisseur en sapelli.

Ce raisonnement est conforté par le calcul de la DSP du signal du microphone dans les mêmes conditions (cf. Figure 85). On identifie à nouveau la bande signifiant l'ouverture des fissures dont le maximum est atteint pour 144 Hz (± 4 Hz). Cependant, comme pour les DSP des accéléromètres, cette tâche n'est pas triviale si l'on ne connaît pas d'avance la fréquence recherchée.

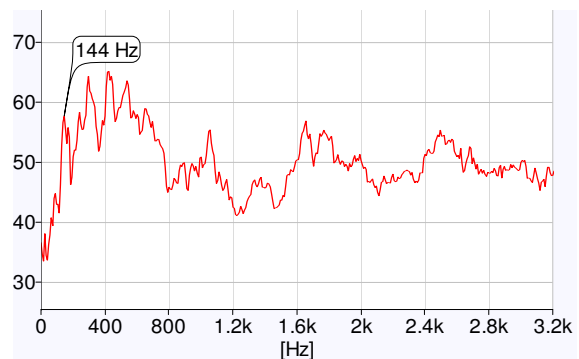


Figure 85 : DSP du signal du micro en dB (essai 35)

A la vue de ces spectres, on se doute des limites de cette technique. Pour peu que les fissures soient peu marquées où qu'elles apparaissent à une fréquence moyenne proche d'une fréquence de résonance de la structure ou d'une quelconque perturbation extérieure du signal du microphone, la détection de leur signature risque d'être très délicate. Il s'agit néanmoins d'une première identification formelle de la signature du mécanisme de fissuration en utilisant des mesures vibratoires et acoustiques.

²¹ L'incertitude sur la valeur réelle de la vitesse de coupe (8.6 % pour $V_c=0.5\text{m/s}$ et $Ri=121\text{mm}$) se répercute sur la valeur de la fréquence moyenne d'apparition des fissures.

²² Les variations d'épaisseur du placage sont faibles dans ce cas où l'épaisseur conséquente et l'absence de barre favorisent une stabilisation rapide de la coupe (moyenne $E_p=3.01\text{mm}$ et écart type $E_p=0.042\text{mm}$)

1.1.1.2 DSP : apport de l'usage de PTFE

La Figure 86 présente le rapport des amplitudes des spectres calculés à partir des mesures vibratoires et acoustiques des essais 35 et 3. L'essai 3 a fourni les DSP de référence : déroulage de PTFE dans de bonnes conditions ($V_c=0.5\text{m/s}$, $E_p=1\text{mm}$, $\delta=1^\circ$, outil rodé). Le rapport des spectres correspondants constitue un outil simple qui exprime, du point de vue fréquentiel, les dissemblances de deux signaux. En utilisant l'enregistrement d'un déroulage de PTFE, on limite la signature des fréquences de résonance de l'ensemble sans réduire celle de la fissuration.

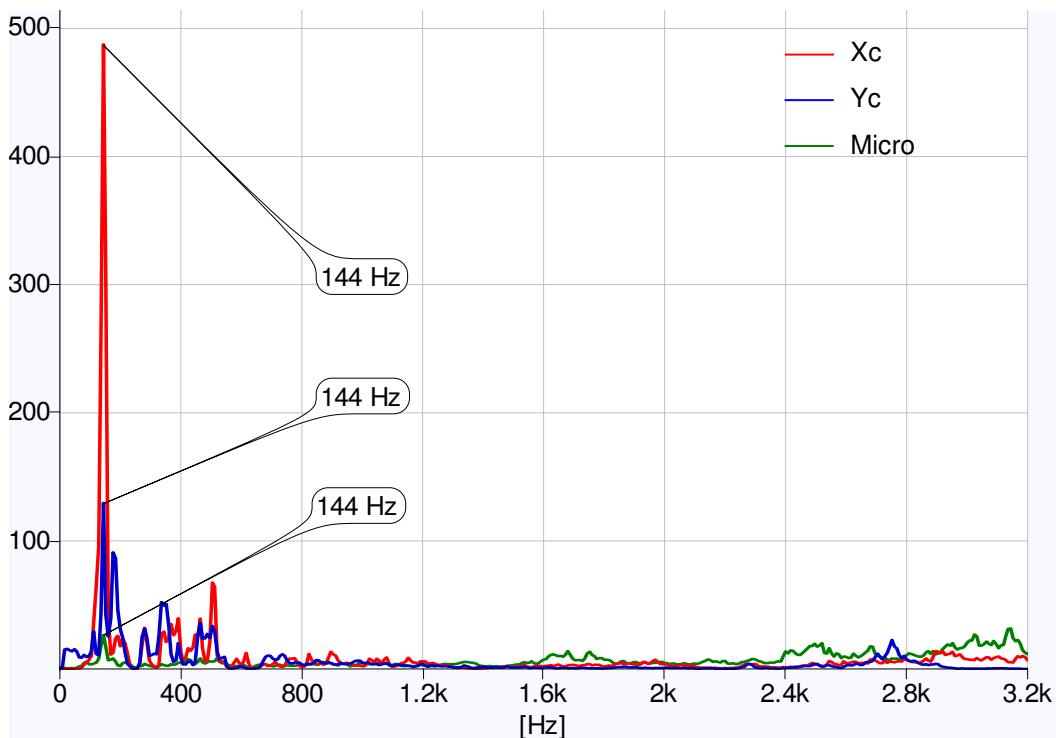


Figure 86 : Rapport des amplitudes des DSP des accéléromètres Xc et Yc et du micro pour les essais 35 et 3 (peuplier essai 35/PTFE essai 3)

Les trois rapports des DSP présentent justement un pic prépondérant pour la fréquence de 144 Hz ($\pm 4\text{Hz}$). Le fait que les trois capteurs s'accordent sur cette fréquence particulière qui se trouve être le sommet d'une bande plus large, nous permet de conclure qu'il s'agit bien de trace du phénomène de fissuration.

L'accéléromètre Xc est particulièrement sensible à l'ouverture des fissures puisqu'elle s'accompagne d'une cyclicité affirmée des efforts dans cette direction. Le second accéléromètre montre également un riche potentiel puisque comme pour Xc, le pic mesuré à 144 Hz est le plus marqué de la bande d'analyse en terme d'amplitude. Enfin, les relevés du microphone sont aussi exploitables mais la faible amplitude relative du pic et la présence de nombreuses autres composantes fréquentielles laisse entrevoir la sensibilité de ce capteur aux phénomènes périphériques.

Les mêmes calculs conduits sur les signaux non filtrés des efforts FXc et FYc fournissent des résultats aussi flagrants (cf. Figure 87). En effet, les fréquences moyennes de fissuration n'excèdent pas les caractéristiques limites des cellules piézoélectriques. Ils sont donc capables de mesurer la période d'oscillation des efforts associée à l'ouverture de fissures.

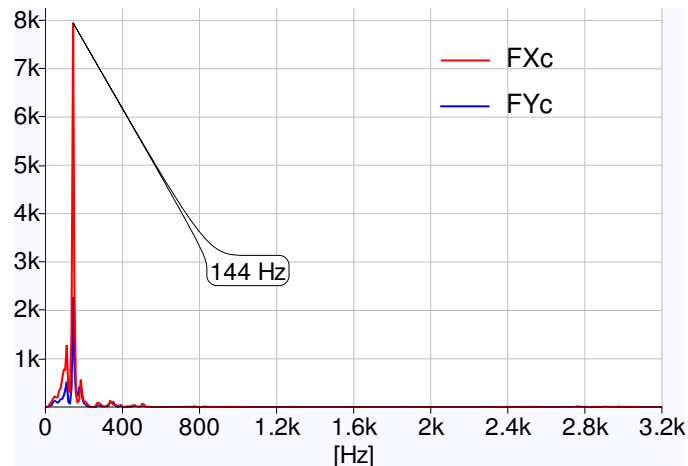


Figure 87 : Rapport des amplitudes des DSP des efforts de coupe FXc et FYc pour les essais 35 et 3 (peuplier essai 35-PTFE essai 3)

La possibilité de visualiser aussi clairement la signature des fissures à l'aide d'un matériau de référence comme le PTFE est très encourageante mais difficilement transférable dans le monde industriel. Il serait intéressant de chercher des méthodes de visualisation aussi efficace mais plus directes. Pour ce faire, les différents outils de traitement du signal dans le domaine fréquentiel, dont l'intérêt a été soulevé dans la partie III.7, ont été testés.

1.1.1.3 Analyse en bandes d'octave des signaux du microphone

Le microphone est par nature plus sensible à l'environnement de travail que les accéléromètres c'est pourquoi la plupart des mesures ont été accomplies de nuit. Il présente néanmoins l'avantage d'être nettement moins affecté par les fréquences de résonance de la machine ce qui suggère déjà une piste pour l'éviction de ces fréquences perturbatrices.

Un rapide parcours des méthodes les plus simples et les plus couramment usitées dans l'usinage du bois mais surtout des métaux nous a conduit à en retenir deux : l'analyse en bandes d'octave et le calcul des DSP déjà présenté.

La Figure 88 est le résultat d'une analyse en douzième d'octave du signal enregistré par le microphone au cours de l'essai 35. Pour une analyse plus classique en tiers d'octave, la largeur des bandes a tendance à noyer l'information dans le bruit de fond du signal (mais l'emploi d'un signal de référence améliore nettement son pouvoir discriminant cf. Figure 88).

Une zone comprise entre les bandes de fréquences centrales 129.6 Hz et 172.8 Hz pointées sur le graphique correspond à la signature de la fissuration. En particulier, son maximum est obtenu pour la bande de fréquence centrale 145.4 Hz (68 dB). La différence d'énergie entre cette bande et le niveau du bruit de fond²³ dans la zone fréquentielle correspondante est très

²³ L'emploi d'un signal de référence présenté ci-après donne accès à la valeur de cette différence.

conséquente (15 dB pour la bande centrée sur 145.4 Hz). Rappelons en effet, qu’une augmentation de 3 dB témoigne d’un doublement de la grandeur associée, ici une pression.

Cette représentation permet d’appuyer le fait qu’il n’y a pas une fréquence fissuration mais bien toute une série puisque les bandes excitées des trois capteurs sont très proches (en tenant compte des résolutions spécifiques).

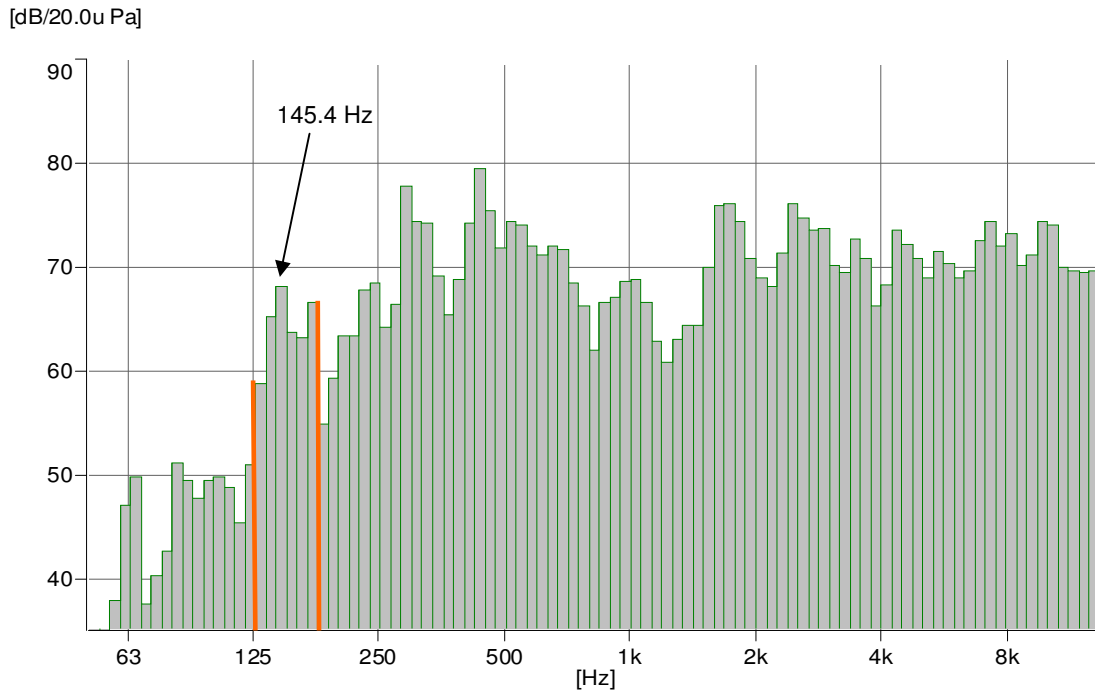


Figure 88 : Analyse en douzième d’octave du signal du microphone (essai 35)
(moyenne exponentielle sur 1 s, $\tau=0.5s$, sans pondération)

L’emploi d’un signal de référence est également judicieux en particulier pour l’analyse en bandes d’octave pour peu qu’une information générale sur la fréquence d’apparition des fissures soit suffisante. La Figure 89 présente le rapport des analyses en tiers d’octave du signal du micro pour les essais 35 et 3. La fréquence de fissuration moyenne se manifeste par deux bandes prépondérantes (de fréquences centrales 125 et 160 Hz).

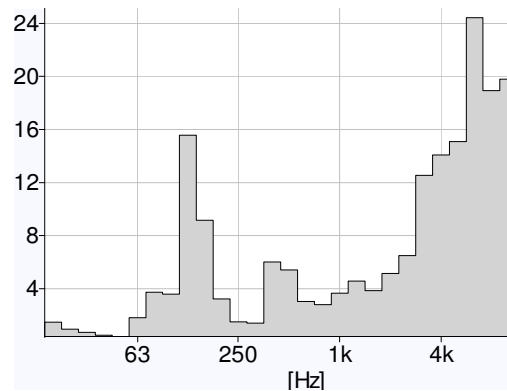


Figure 89 : Rapport des analyses en tiers d’octave en dB des essais 35 et 3
(moyenne exponentielle sur 1s, $\tau=0.5s$, sans pondération)

La Figure 89 révèle aussi que la coupe de PTFE n’excite que faiblement le domaine des hautes fréquences comparativement au bois.

L'état de l'art nous a montré une autre technique assez astucieuse pour évacuer les fréquences indésirables lorsque plusieurs capteurs sont sensibles au même phénomène : la fonction de cohérence.

1.1.1.4 Cohérence

[LI et al_1997] mesurent une cohérence proche de 1 pour la fréquence de vibration entre les signaux des directions d'avance et de coupe en tournage des métaux. Cette approche est prometteuse puisque qu'elle fournit un indicateur normé simplement qui pourrait permettre d'identifier la fréquence d'apparition des fissures sans la connaître à l'avance.

Les Figure 90 et Figure 91 représentent l'évolution de la fonction de cohérence entre les différents capteurs respectivement pour les essais 11 (hêtre) et 35 (peuplier) qui ont été réalisés avec des réglages et des conditions de coupe identiques.

Dans le cas du hêtre, relativement dense, les sollicitations mécaniques générées par l'ouverture des fissures permettent de faire émerger une large bande dominante pour les trois fonctions comprise entre 104 et 208 Hz (± 4 Hz), mais qui ne dépasse 0.9 que pour le couple (Xc, micro) entre 152 et 168 Hz. Ce dernier présente un maximum pour 160 Hz tandis que les deux autres l'atteignent pour 192 Hz. L'intervalle identifié contient bien la fréquence de 173 Hz, obtenue des mesures de fissuration moyenne des placages pour l'essai 11, mais sa largeur suggère une forte sensibilité des signaux aux fréquences de résonances proches de l'ensemble.

En particulier, 192 Hz est la fréquence associée au premier mode mis à jour dans les deux directions par l'opération de sonnage. Pour la fonction de cohérence obtenue des signaux des deux accéléromètres, un certain nombre de pics (536, 2560, 2752) expriment aussi la proximité de fréquences de résonance mesurées suivant X et Y. L'utilisation du microphone semble plus judicieuse dans ce cas puisqu'à défaut d'éliminer toutes les fréquences de résonance, elle en évince une grande part.

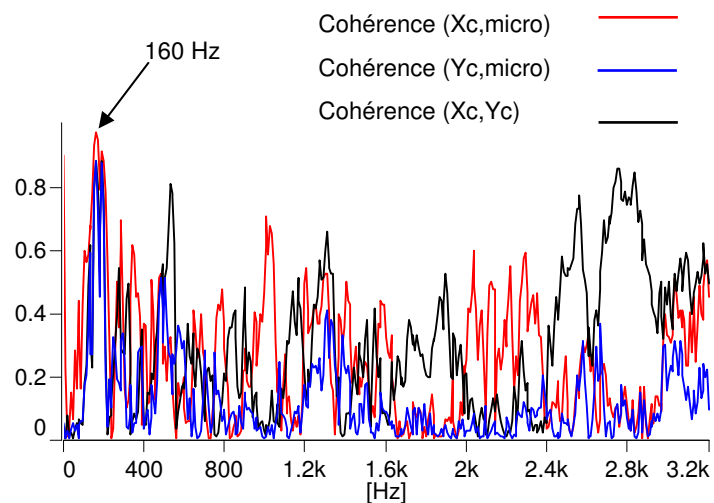


Figure 90 : Fonctions de cohérence entre les accéléromètres Xc, Yc, et le microphone pour l'essai 11 (hêtre, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=0.5\text{m/s}$, $\delta=0^\circ$, sans barre, outil rodé)

Pour l'essai 35, les résultats sont plus flous. La faible densité du peuplier ne permet pas de libérer suffisamment d'énergie lors de l'ouverture des fissures. La bande fréquentielle correspondant à la fissuration est identifiable, mais loin d'être dominante.

La fonction de cohérence est intéressante mais moins performante qu'on aurait pu l'espérer. En conséquence, nous ne pousserons pas davantage son analyse.

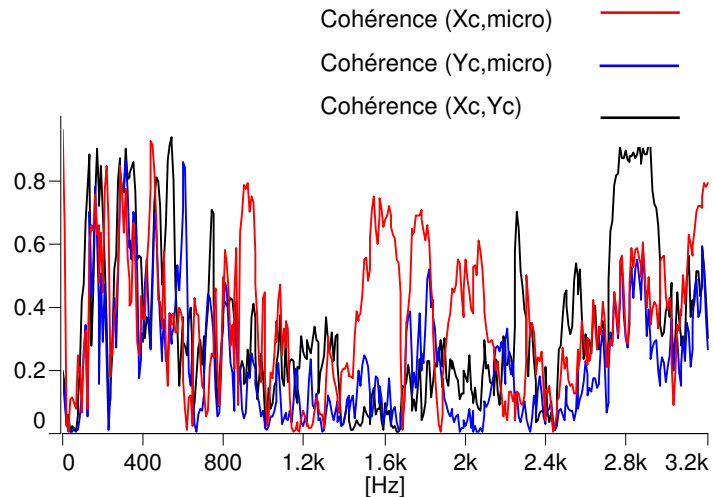


Figure 91: Fonctions de cohérence entre les accéléromètres Xc, Yc, et le microphone pour l'essai 35 (peuplier, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=0.5\text{m/s}$, $\delta=0^\circ$, sans barre, outil rodé)

1.1.1.5 Analyse d'enveloppe

Cette technique permet d'isoler la composante modulante d'un signal. L'observation des signaux dans le domaine temporel nous laisse penser que le phénomène de fissuration, lorsqu'il est bien marqué, et la fréquence de rotation du billon, modulent les signaux.

La Figure 92 présente l'autospectre de l'enveloppe du signal Yc conduite sur toute la bande fréquentielle pour l'essai 35.

La fréquence modulante principale et ses harmoniques (pointillés bleus sur le graphique) correspondent à la fissuration du placage (fondamental pour $f=150\text{ Hz}$). On retrouve aussi la trace de la fréquence de rotation du billon à l'origine ($\approx 1\text{ Hz}$ et de très grande amplitude non représentée sur la Figure 92), mais la résolution en fréquence est faible. Pour s'en convaincre, il suffit d'analyser un essai réalisé à des vitesses plus élevées comme l'essai 10 sur une durée de 2 s au moins (résolution en fréquence de 0.5 Hz).

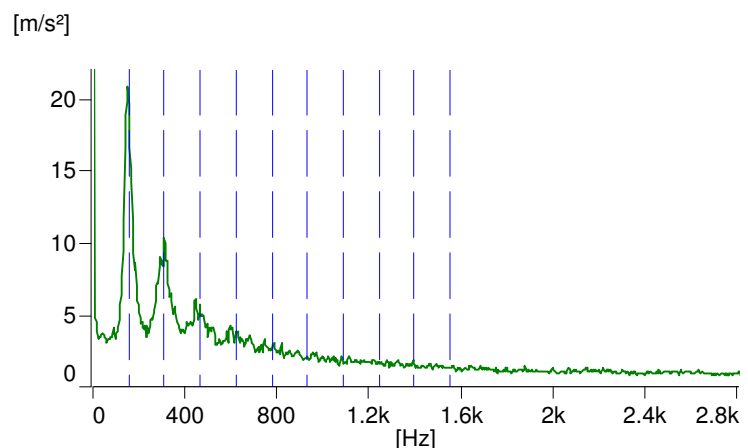


Figure 92 : Autospectre de l'enveloppe du signal de Yc (bande d'analyse 25.6 kHz, fréquence centrale 12.8 kHz, $T=250\text{ms}$, $N=3200$) pour l'essai 35

(harmoniques de la fréquence modulante principale en pointillés bleus).

L'autospectre présente un pic marqué pour 2 Hz, fréquence de rotation approximative du billon. La fréquence de résonance principale (540 Hz) est surtout sensible sur les spectres des efforts.

Cette technique est donc bien adaptée à la détection des fréquences de fissuration. En revanche, elle perd en lisibilité dès que le phénomène de fissuration est peu marqué ou aléatoire. On s'apercevrait que le signal du microphone est modulé par d'autres phénomènes qui deviennent prépondérants tandis que ceux des accéléromètres ne présentent plus qu'un faible pic difficilement identifiable. Il s'agit malgré tout de l'outil le plus à même de détecter l'ouverture des fissures lorsque celles-ci sont bien marquées et qu'on ne dispose pas d'un signal de référence.

1.1.1.6 Analyse Cepstrale

Un cepstre est le résultat du spectre du logarithme du spectre. Il permet d'identifier les périodicités du spectre, synonymes d'harmoniques fortes. Même dans le cas de l'essai 35 qui offre les conditions de détection de l'ouverture des fissures très favorables, l'information est difficile à visualiser, noyée dans le bruit de fond du signal du cepstre des DSP. Par contre, en calculant le cepstre de l'autospectre résultant de la détection d'enveloppe, une bande émerge dont le sommet est le fondamental de la fréquence visualisée sur la Figure 92.

Il est donc également possible d'utiliser le cepstre des signaux des accéléromètres à partir du spectre de la détection d'enveloppe (microphone et cellules piézo-électriques trop sensible aux perturbations), mais son pouvoir discriminant est rapidement limité lorsque le phénomène de fissuration est moins prononcé. N'apportant pas plus à l'identification des fissures que l'autospectre de l'enveloppe du signal, son usage ne sera pas davantage approfondi.

1.1.1.7 Choix d'une procédure

Dans des conditions très favorables (épaisseur forte, absence de barre de pression et vitesse de coupe faible), la plupart des outils présentés offrent la possibilité de détecter l'ouverture des fissures de déroulage mais leurs performances sont inégales. En utilisation directe, l'analyse de l'enveloppe du signal présente les meilleures dispositions. Néanmoins, les pouvoirs discriminants des DSP des signaux des trois capteurs, ou de l'analyse en bandes d'octave (douzième ou tiers) du signal du microphone, sont très nettement améliorés lorsqu'un signal de référence est utilisé.

Une solution simple pour se passer du PTFE pourrait consister à utiliser l'enregistrement d'un déroulage dans de bonnes conditions du point de vue de la fissuration. Un taux de pression relativement élevé pour des conditions de coupe identiques remplit ces conditions. Par contre, au regard des variations d'épaisseur, cet enregistrement serait mal choisi.

Tous les essais du plan complet réalisés avec barre de pression ont permis de produire des placages exempts de fissures. La Figure 93 illustre cette démarche pour l'essai 35 et son référent (avec barre). Le pic émergent, mais surtout la bande de fréquence excitée, correspond une nouvelle fois à la fréquence d'apparition des fissures pour les trois capteurs. Le signal est même plus « propre » que lorsque le signal référent provient du déroulage du PTFE.

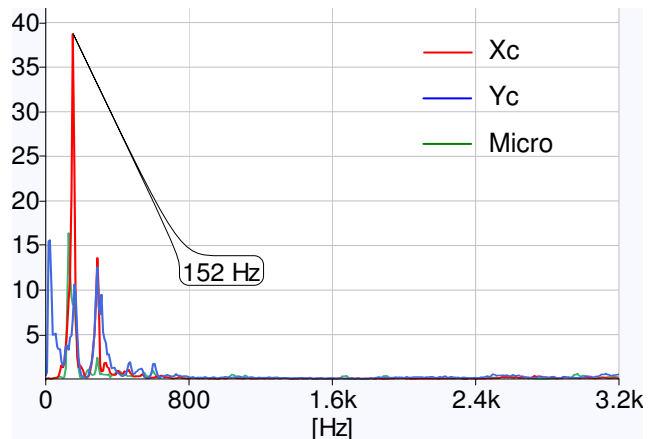


Figure 93 : Rapport des amplitudes des DSP de Xc, Yc et du microphone pour les essais 35 et 47 (peuplier, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=0.5\text{m/s}$, $\delta=0^\circ$, outil rodé, taux de compression respectifs de 0 et 15.67 %)

En effet, nous avons déjà remarqué que la sollicitation introduite par la coupe très régulière du PTFE excitait une bande fréquentielle beaucoup plus réduite que celle associée au mécanisme de formation d'un placage (où les hétérogénéités de structure et de densité du bois sont autant de composantes excitatrices).

Cette technique de « double mesure sur bois » est donc très efficace et aisée à mettre en place. Pour le cas particulier de l'essai 35 où le mécanisme de fissuration est bien établi, elle l'est presque « trop » puisque les amplitudes du premier harmonique (288 Hz) des deux accéléromètres sont très conséquentes. Le cas général étant nettement moins favorable, il n'est pas utile de chercher à évacuer (ou utiliser) ces harmoniques.

Le rapport des spectres offre une information sur la fréquence moyenne d'apparition des fissures dont la précision est relative à la fenêtre d'observation (fenêtre de calcul de la FFT). L'incertitude sur la vitesse réelle de coupe est relativement handicapante pour la mesure de la distance moyenne entre les fissures. Néanmoins, dans cette première phase de validation du principe de la méthode, nous nous en satisferons puisque les mesures de référence visuelles présentent une forte variabilité en grande partie due au phénomène lui-même. De plus, les essais de déroulage avec ou sans la barre de pression ont été réalisés dans des conditions quasiment identiques (vitesse et rayon en particulier). On peut donc supposer que l'erreur éventuelle est reproductible.

Il nous reste à évaluer les performances de cet outil en fonction des capteurs employés et des différentes configurations expérimentales rencontrées, pour définir ses possibilités d'utilisations concrètes dans le monde industriel. Plusieurs enregistrements issus du plan complet et des essais complémentaires plus spécifiquement dédiés au suivi du phénomène de fissuration ont été traités suivant cette démarche. La résolution en fréquence sera fixée à 2 Hz ($T=500$ ms). Cette approche, plus fine, permet d'éviter la confusion des fréquences de

fissuration avec celles de résonance de la structure (parfois proches), tout en facilitant la compréhension des phénomènes mis en jeux.

1.1.2 Sensibilité de la méthode de mesure

1.1.2.1 Epaisseur déroulée

Le phénomène de fissuration est, nous l'avons vu, bien présent pour les placages de 1 mm d'épaisseur déroulés sans barre de pression seulement dans le cas du hêtre. Les fissures restent néanmoins peu profondes et ne mettent pas en péril la manutention du placage, au moins à l'état vert. A titre de comparaison, les fabricants américains de panneaux de contreplaqués ou de LVL de Douglas, voués à des applications en structure, tolèrent des fissures nettement plus profondes.

La fréquence moyenne de fissuration des placages de 1 mm d'épaisseur est comprise entre 718 et 1111 fissures par mètre pour une moyenne de 888 d'après les mesures visuelles décrites en (V.1.2.1). En supposant la vitesse de coupe égale à la consigne, les fréquences excitées sont donc comprises entre 359 et 555 Hz et probablement proches de 444 Hz.

La figure suivante résulte du rapport des DSP de deux essais de déroulage de hêtre (12 et 24, $E_p=1$ mm, respectivement avec ou sans barre de pression). Il est très encourageant de constater la possibilité de détecter la fréquence de fissuration moyenne lorsque le phénomène est si faiblement marqué. Aucune autre technique décrite dans le paragraphe précédent n'aurait permis d'atteindre ce résultat.

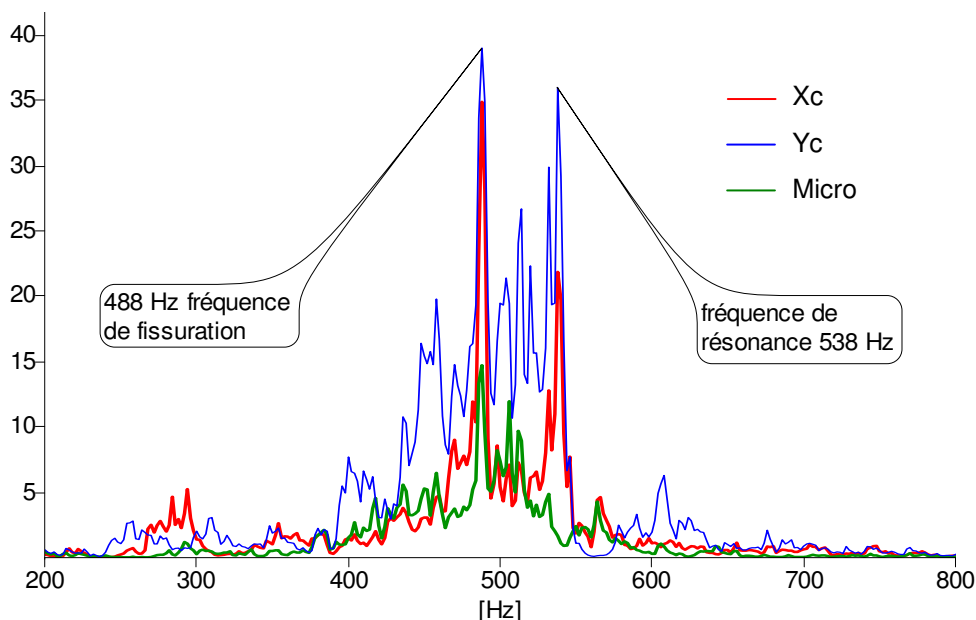


Figure 94 : Rapport des amplitudes des DSP de Xc, Yc et du microphone pour les essais 12 et 24 (hêtre, $E_p=1$ mm, $V_c=0.5$ m/s, $\delta=0^\circ$, outil rodé, taux de compression respectifs de 0 et 5.66 %)

Une nouvelle fois, Xc se révèle comme le capteur le mieux adapté à cette procédure. Le microphone est également capable de fournir une information sans équivoque. Le signal issu

de Yc est en revanche plus bruité (en particulier les basses fréquences non représentées sur la Figure 94). Il s'agit d'un inconvénient récurrent avec ce capteur. Le contact entre la face de dépouille et le billon perturbe la lecture des signaux surtout si l'énergie développée par les phénomènes observés est faible comparativement à celle générée par le contact outil/billon. En effet, l'usage de la barre s'accompagne d'un régime de sur-épaisseur qui diminue sensiblement le niveau du signal de référence (sur toute la bande, cf VI.1.2.5) et favorise ainsi l'émergence de nombreux pics.

Dans le cas du peuplier, où le phénomène de fissuration est difficile à identifier visuellement (sur certaines portions du placage seulement), un « pic » est mesurable à partir des signaux de Xc, Yc et du micro dont les amplitudes sont respectivement 40, 5 et 8 fois plus faible que pour l'essai correspondant menés sur du hêtre. Nous ne pouvons donc pas attribuer cette signature au phénomène de fissuration avec certitude.

1.1.2.2 Vitesse de coupe

Les vitesses de coupe usuelles dans l'industrie du déroulage du hêtre et du peuplier sont respectivement de l'ordre de 1.5 et de 3 à 5 m/s. L'approche temporelle des mesures nous a montré la grande sensibilité des différents capteurs à la vitesse. Il faut donc s'assurer de la validité de la méthode dans des conditions de déroulage usuelles. La Figure 95 présente le résultat du rapport des DSP pour les trois capteurs lors d'un déroulage de hêtre en 3 mm d'épaisseur pour une vitesse de coupe linéaire de 2 m/s, avec ou sans barre de pression.

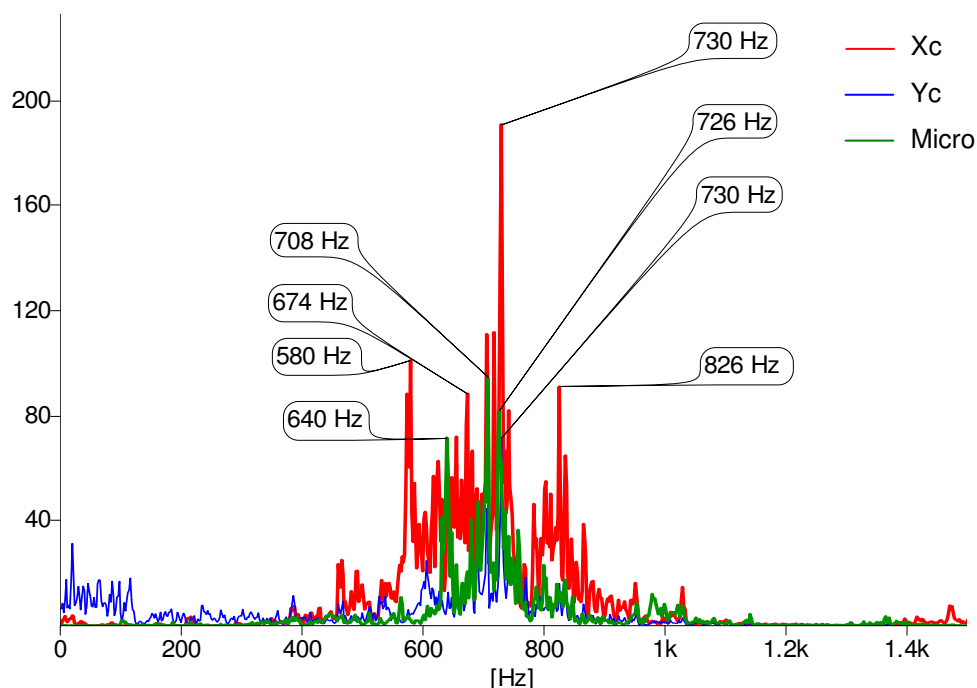


Figure 95 : Rapport des amplitudes des DSP de Xc, Yc et du microphone pour les essais 9 et 21 (hêtre, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=2\text{m/s}$, $\delta=0^\circ$, outil rodé, taux de compression respectifs de 0 et 15.67 %)

La bande de fréquence excitée est nettement plus large que dans les cas précédents. En effet, les mesures du nombre moyen de fissures par mètre de placage sont comprises entre 294 et 358 pour les placages de hêtre déroulés en 3 mm d'épaisseur (294 Hz pour l'essai 9). L'écart type de ces résultats, qui caractérise la dispersion des mesures mais pas les valeurs des extremums, est compris entre 16 et 29 fissures par mètre (29 pour l'essai 9) soit 10% au maximum. Lorsque la vitesse de coupe est élevée, on amplifie automatiquement la dispersion des raies fréquentielles générées par l'ouverture des fissures. Ainsi, toujours en supposant la vitesse de coupe égale à la consigne, les fréquences susceptibles d'apparaître sont comprises entre 588 et 716 Hz avec un écart type de 58 Hz pour les cas les plus défavorables.

Une bande prédominante est mesurable entre 700 et 738 Hz ce qui correspond assez mal au cas de l'essai 9 (588 Hz). Le fait que les trois capteurs s'accordent sur cet intervalle laisse penser qu'il s'agit bien de la fréquence de fissuration principale de cet essai et que « l'erreur » provient du caractère local de la mesure du placage (longueur mesurée d'un mètre en général soit 4 à 5 fois moins longue que celle analysée par le calcul des DSP). De plus, des bandes fréquentielles latérales sont aussi fortement excitées en particulier pour le micro et davantage encore pour Xc. Nous avons tout lieu de penser que ces fréquences sont effectivement apparues lors de la fabrication du placage puisqu'elles sont comprises dans l'intervalle déduit de la mesure des placages déroulés pour cette épaisseur (en tenant compte de la dispersion des mesures). Des analyses temps-fréquence permettront de le montrer.

La résolution plus fine utilisée ici (2Hz) n'est sans doute pas nécessaire dans un contexte industriel mais elle permet de mieux appréhender la signature des fissures. Les distances entre deux fissures consécutives oscillent autour d'une valeur moyenne mais de manière discrète. Autrement dit, il faudrait une longueur de placage infiniment longue pour retrouver un spectre continu. Il est donc logique de retrouver un certain nombre de raies plus ou moins excitées en fonction du nombre de fissures correspondantes et probablement aussi de leurs natures²⁴. Ce phénomène, qu'on pourrait qualifier de « discrétisation des fréquences de fissuration » est sans aucun doute déjà présent à faible vitesse mais masqué par la proximité des raies excitées et la faible résolution fréquentielle employée. On perçoit une limite fondamentale des représentations spectrales : la dualité des résolutions temporelles et fréquentielles.

Le peuplier, dans les mêmes conditions, présente une bande fréquentielle beaucoup plus étroite (entre 568 et 610 Hz), ce qui appuie notre raisonnement puisque le phénomène de fissuration est lui même nettement plus régulier (presque périodique).

²⁴ Pour progresser sur ce point, des modèles de signatures vibratoires de l'ouverture des fissures en fonction de leur géométrie seraient utiles. La mise en relation des faciès d'ouverture des fissures, capturées à l'aide d'une caméra rapide par exemple, avec leur signature dans le domaine temporel constitue une piste prometteuse pour y parvenir.

La méthode reste donc valable pour des vitesses relativement élevées mais son utilisation risque d'être plus lourde à moins de choisir une résolution fréquentielle assez faible. Par contre, en faible épaisseur, la clarté des mesures est sensiblement altérée.

La Figure 96 présente les rapports des DSP pour essais de déroulage ($E_p=1\text{mm}$, $V_c=2\text{m/s}$) issus de Xc et du microphone. La bande fréquentielle excitée est tout d'abord particulièrement large (>400Hz surtout pour Xc). Elle correspond probablement à la signature de la fissuration puisque d'après les mesures tirées des placages associés elle devrait être comprise entre 1436 et 2222 Hz (toujours si la vitesse de coupe est égale à la consigne). Cependant, il est difficile d'être affirmatif. À dépouille égale, les fréquences sollicitées et leurs niveaux sont proches (rapport de 2 des amplitudes) qu'il s'agisse du hêtre ou du peuplier d'après les relevés issus de Xc. La présence de fissures n'avait pourtant pas pu être détectée avec certitude pour les placages minces de peuplier à faible vitesse de coupe (rapport de 40 pour Xc et 8 pour le micro). Deux raisons peuvent expliquer cette apparente contradiction :

- La bande fréquentielle émergente résulte de l'excitation de la structure par le phénomène de fissuration mais ne représente pas la fréquence d'apparition des fissures.
- Le mécanisme de fissuration est favorisé par l'augmentation de la vitesse de coupe.

D'après [MOVASSAGHI_1985] évoquée en II.4.3.2.4, une croissance de la vitesse de coupe s'accompagne d'une augmentation du risque de fissuration des placages. Autrement dit, le phénomène qui n'était que localisé sur certaines zones du placage peut s'étendre à toute sa longueur si la vitesse de déroulage est suffisamment augmentée.

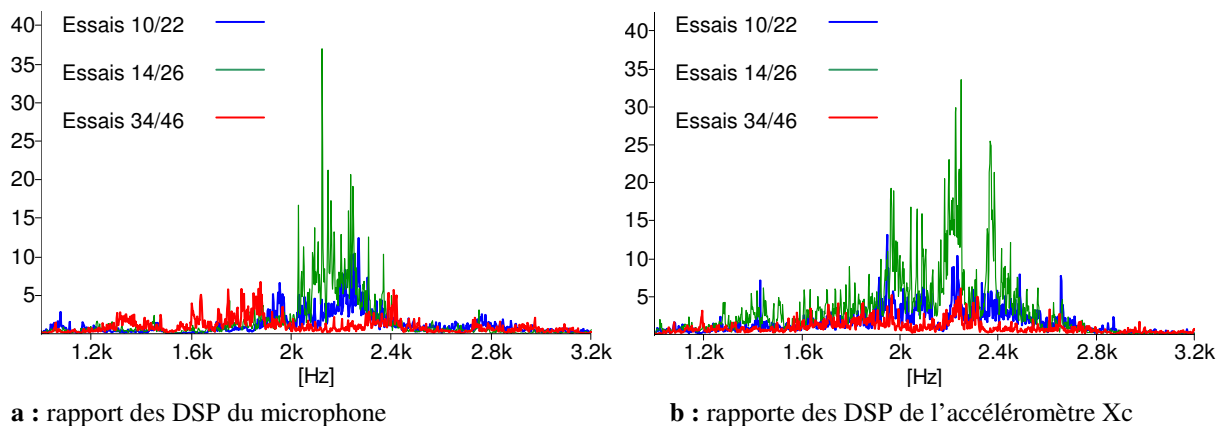


Figure 96 : Rapport des DSP du microphone et de Xc pour $E_p=1\text{mm}$ et $V_c= 2\text{m/s}$ (essai 10 : hêtre, $\delta=0^\circ$; essai 14 : hêtre, $\delta=1^\circ$; essai 34 : peuplier, $\delta=0^\circ$; référence : 22, 26, 46, essai correspondant avec barre de pression)

La réalité est probablement le fruit de l'action combinée des deux raisons avancées. En effet, pour le hêtre, il existe tout de même une correspondance troublante entre les fréquences attendues de fissuration et les bandes excitées de sommet 1954, 2068 ou 2100 et 2270 Hz (respectivement pour le micro et pour Xc). Cependant, l'opération de sonnage nous a révélé la présence de fréquences de résonances précisément dans ces zones. Ainsi, lorsque l'angle de dépouille est positif (favorisant l'excitation de la structure d'après les résultats de V.3.1.1.4),

une large bande émerge pour les signaux du microphone comprise entre 2036 et 2320 Hz tandis que 3 nouvelles bandes distinctes sont visibles sur les relevés issus de Xc. Le microphone étant a priori moins sensible aux fréquences de résonance de la machine, on peut penser qu'il s'agit bien de la trace de la fissuration mais il est difficile d'être aussi affirmatif pour l'accéléromètre. Précisons cependant qu'en employant un signal de référence à haute énergie (essais correspondant mais en 3 mm d'épaisseur, avec ou sans barre), les bandes excitées restent prépondérantes.

En conclusion, on peut considérer la méthode comme valide en forte épaisseur même lorsque la vitesse de coupe est importante. Par contre, nous émettons encore des réserves en faible épaisseur puisque ne nous pouvons pas apporter la preuve formelle qu'il s'agit bien des fréquences d'apparition des fissures malgré de fortes présomptions. En tout état de cause, ces pics correspondent bien à une conséquence du mécanisme de fissuration puisqu'ils émergent en sa présence.

1.1.2.3 Barre de pression

Du point de vue du fabricant, la méthode présenterait un intérêt majeur si elle permettait de régler le taux de pression en cours d'usinage. La Figure 97 présente le résultat des rapports des DSP de l'accéléromètre Xc pour des déroulages de peuplier en 3 mm d'épaisseur à différents taux de compression.

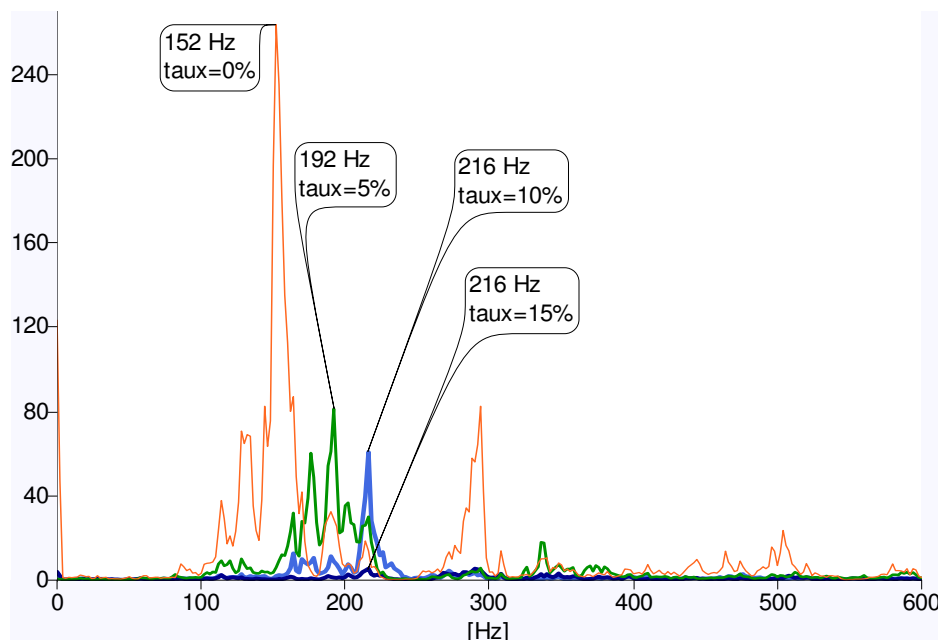


Figure 97 : Rapport des DSP de Xc pour différents taux de compression de la barre lors de déroulages de peuplier en 3 mm d'épaisseur (essais 35²⁵, 126, 127, 128, référence essai 129 taux de compression = 20%)

²⁵ L'essai 35 est rigoureusement la même que l'essai 126 à la valeur du rayon de déroulage près. L'enregistrement de l'essai 126 a été dégradé comme nous l'avons déjà mentionné.

Les résultats sont très concluants pour Xc mais également de bonne qualité pour le micro (pic mesuré plus étalé). En revanche, Yc ou Yb (Xb non utilisé pour ces acquisitions mais très probablement peu sensible), semblent moins bien adaptés puisque l'amplitude du pic, lorsqu'il correspond bien à la fissure, est nettement plus faible. On retrouve l'effet perturbateur de la sur-épaisseur attribuable à l'action de la barre.

L'amplitude du pic caractérisant la fréquence moyenne d'ouverture des fissures est inversement proportionnelle au taux de compression. De plus, la très faible amplitude du pic obtenu pour un taux de compression de 15% caractérise bien le fait que les fissures classiques de déroulage sont absentes de ce placage (et de son référent dont le taux de compression est 20%). Cela rejoint la remarque de la partie précédente : l'optimum de pression se trouve au delà de 10% (et probablement en deçà de 15%).

En outre, on note une augmentation de la fréquence moyenne d'apparition des fissures avec le taux de compression ce qui correspond bien aux observations expérimentales (bien que ce point particulier n'ait pas été rigoureusement prouvé dans la littérature). Cette tendance se rapproche de celle observée pour des placages d'épaisseur variable, où fréquence et profondeur des fissures sont inversement proportionnelles.

Il serait très intéressant de déterminer s'il existe une relation entre amplitude des pics et profondeur des fissures. Nous n'avons malheureusement pas pu obtenir cette information des placages déroulés. Ce point constitue une priorité pour les recherches futures puisque ces applications potentielles sont riches pour les fabricants.

Nous avons donc toutes les raisons de penser qu'il serait possible d'ajuster en cours de fonctionnement le taux de pression de la barre à partir d'un simple accéléromètre. Mais avant cela, il faudra vérifier la validité de la méthode sur une dérouleuse de type industriel. L'influence de la faible largeur des disques favorise probablement la propagation des fissures ce qui risque de modifier leur signature et éventuellement l'efficacité de la méthode.

Le microphone est également un capteur performant pour cette application puisqu'il est peu ou pas sensible aux fréquences de résonance de la structure. A forte vitesse de coupe, il est souvent plus préformant que l'accéléromètre dans la direction de coupe. En revanche, son transfert direct dans un contexte de travail souvent bruyant risque de pénaliser ses bonnes aptitudes. En particulier, les divers machines présentes sur les sites de production appartenant à la ligne de déroulage ou non, telles que les massicots ou les buses de sortie d'air comprimé (fréquemment employés pour débarrasser la zone de coupe des fibres arrachées), génèrent des niveaux de pression incomparablement plus élevés que la coupe (nous en avons fait l'expérience lors de mesures exploratoires conduites chez les fabricants).

1.1.3 Influence des paramètres de coupe sur la fréquence moyenne de fissuration des placages

Cette méthode a été utilisée (résolution en fréquence fixée à ± 8 Hz) pour tenter d'éclaircir les contributions de certains paramètres vis-à-vis du phénomène de fissuration :

- La vitesse de coupe :

La figure suivante présente les résultats des mesures pour les essais 112 et 130 à 137 réalisés à différentes vitesses de coupe linéaires (hêtre, $Ep=2$ mm et sans barre de pression pour favoriser l'ouverture des fissures). Les séries représentent, soit les fréquences du maximum et des fourchettes hautes et basses des bandes fréquentielles de fissuration, soit le nombre de fissures par mètre correspondant, en supposant la vitesse égale à la consigne.

La dispersion des mesures induite par l'augmentation de la vitesse est très significative sur ces relevés. Par contre, elle se traduit par une réduction de l'incertitude de mesure due à la résolution fréquentielle (représentée uniquement pour le nombre de fissures associé au maximum de la bande fréquentielle excitée puisqu'elle est identique pour les trois courbes).

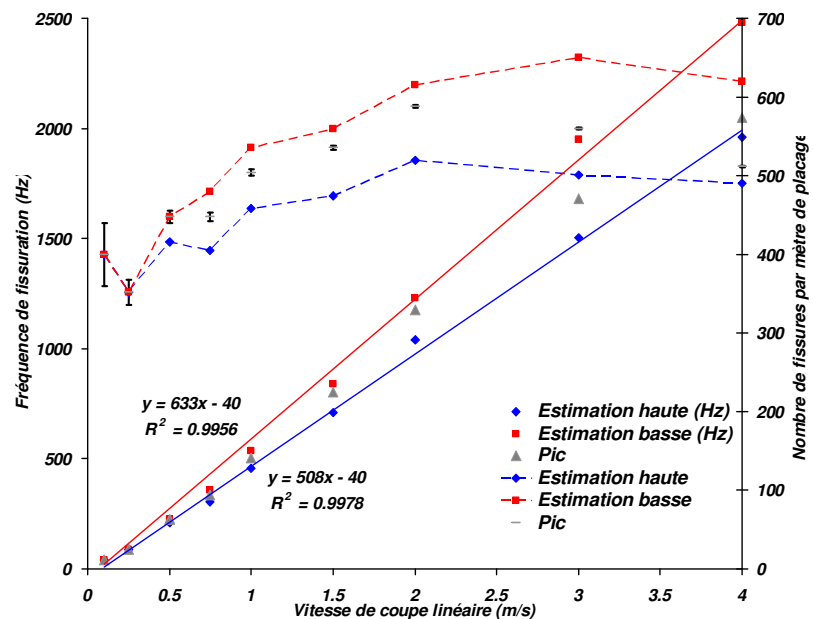


Figure 98 : Evolution de la bande fréquentielle de fissuration en fonction de la vitesse de coupe (signal Xc, essais 112 et 130 à 137 : Hêtre, $Ep=2$ mm, $\delta=0^\circ$, sans barre de pression, outil rodé).

A une vitesse d'un mètre par seconde, la fréquence de fissuration est légèrement inférieure à 500 Hz quel que soit le descripteur. La fourchette d'estimation basse de la fréquence, de pente proche de 500, conduit donc à un nombre de fissure par mètre constant (environ 500) quelle que soit la vitesse. Par contre, l'estimation haute, de pente de 633, montre clairement une augmentation du nombre de fissures par mètre avec la vitesse. Cette tendance est très explicite sur l'évolution du nombre de fissures par mètre de placage en fonction de la vitesse ou seule la fourchette d'estimation haute permet de conclure (compte tenu de l'incertitude de mesure à faible vitesse).

On comprend mieux l'existence de résultats contradictoires dans la littérature. La distinction des deux bornes de l'estimation permet de prouver que la fréquence d'apparition des fissures augmente avec la vitesse de coupe dans ce contexte expérimental (ce qui confirme les

résultats des mesures visuelles pour le peuplier en V.1.2.1). Comme d'autres auteurs l'ont suggéré, l'augmentation de la vitesse de coupe peut s'apparenter à une densification du bois. Elle se manifeste ici, par une augmentation du nombre moyen de fissures par mètre.

Enfin, on peut remarquer que cette tendance est principalement sensible pour les vitesses les plus faibles. Il pourrait être intéressant de déterminer s'il existe un lien entre ces résultats et l'influence de la vitesse sur les efforts de coupe telle qu'elle a été décrite par [MARCHAL_1989] et [DECES-PETIT_1996] (cf. Figure 31).

Pour généraliser ces observations et mieux comprendre les phénomènes physiques qui les suggèrent, il faudrait effectuer de plus amples investigations (essence et épaisseur en particulier) en utilisant cette approche puisque nous connaissons l'effet perturbateur induit par la grande variabilité du bois.

➤ Angle de dépouille

Le Tableau 23 répertorie les fréquences de fissuration mesurées en utilisant le rapport des DSP. Il a servi de base pour définir la matrice des corrélations. Aucun des trois paramètres retenus n'est significativement corrélé à la valeur de l'angle de dépouille. Toutefois, l'incertitude sur les mesures est parfois forte et la plage de variation du paramètre étudié réduite. On peut penser que même s'il existe un lien entre angle de dépouille et fréquence de fissuration (a priori positif), il est faible.

Essence	Vitesse (m/s)	Angle de dépouille (°)	Estimation basse(Hz)	Pic (maximum en Hz)	Estimation haute (Hz)
Peuplier ($E_p=3\text{mm}$)	0.5	-1	130	146	164
Peuplier ($E_p=3\text{mm}$)	0.5	0	142	152	166
Peuplier ($E_p=3\text{mm}$)	0.5	1	128	154	156
Peuplier ($E_p=3\text{mm}$)	2	-1	562	568	592
Peuplier ($E_p=3\text{mm}$)	2	0	568	568	610
Peuplier ($E_p=3\text{mm}$)	2	1	566	594	602
Hêtre ($E_p=3\text{mm}$)	0.5	-1	156	166	194
Hêtre ($E_p=3\text{mm}$)	0.5	0	152	170	194
Hêtre ($E_p=3\text{mm}$)	0.5	1	158	164	190
Hêtre ($E_p=3\text{mm}$)	2	-1	604	708	756
Hêtre ($E_p=3\text{mm}$)	2	0	640	708	758
Hêtre ($E_p=3\text{mm}$)	2	1	636	756	782
Hêtre ($E_p=1\text{mm}$)	0.5	-1	468	482	494
Hêtre ($E_p=1\text{mm}$)	0.5	0	470	488	538
Hêtre ($E_p=1\text{mm}$)	0.5	1	466	480	492
Hêtre ($E_p=1\text{mm}$)	2	-1	1664	2316	2570
Hêtre ($E_p=1\text{mm}$)	2	0	1900	2212	2490
Hêtre ($E_p=1\text{mm}$)	2	1	1972	2226	2336

Tableau 23 : Mesures des fréquences de fissuration par rapports des DSP du signal Xc (sans barre, outil rodé)

1.2 Paramètres de coupe

L'analyse du contenu spectral des mesures permet de visualiser de quelle manière l'énergie du signal est répartie dans le domaine des fréquences. Les spectres qui sont présentés (sauf mention contraire) ont été calculés sur la bande fréquentielle la plus large (0-25.6kHz) à partir d'une fenêtre d'observation de 250 ms ($N=6400$). Ils sont représentatifs des situations décrites et vont offrir un complément indispensable aux analyses temporelles présentées.

1.2.1 Vitesse de coupe

C'est le facteur prépondérant du plan complet (essai 9 à 104) d'après les résultats de V.3.1.1.1. Les spectres de la Figure 99, obtenus lors de déroulage de hêtre ($E_p=2\text{mm}$, $\delta=0^\circ$, sans barre, outil rodé), montrent effectivement une hausse très sensible du niveau de pression sonore et des vibrations avec la vitesse (rapport 20 à 40 pour Y_c et de 10 à 20 pour X_c entre 0.1 à 1m/s). Hormis la trace de fissuration, cette croissance est homogène (bien visible sur une échelle logarithmique) et ne semble pas privilégier de fréquences de résonance particulières d'après les mesures vibratoires.

On peut donc envisager la prise en compte du facteur vitesse dans un système algorithmique d'aide à la décision des opérateurs par un coefficient correctif proportionnel au niveau vibratoire moyen. Mais avant de rechercher un modèle convenable, il faut s'assurer, par une analyse temps-fréquence, de la stabilité du niveau vibratoire à mesure que le rayon de déroulage diminue et que les moteurs accélèrent (ce qui est certainement faux pour le microphone).

NB : Les caractéristiques du microphone sont bien visibles sur ces spectres (inexploitable au-delà de 15 kHz). Les spectres du micro suivants présenteront uniquement la partie linéaire de sa réponse en fréquence (± 0.5 dB de 8 Hz à 12.5 kHz).

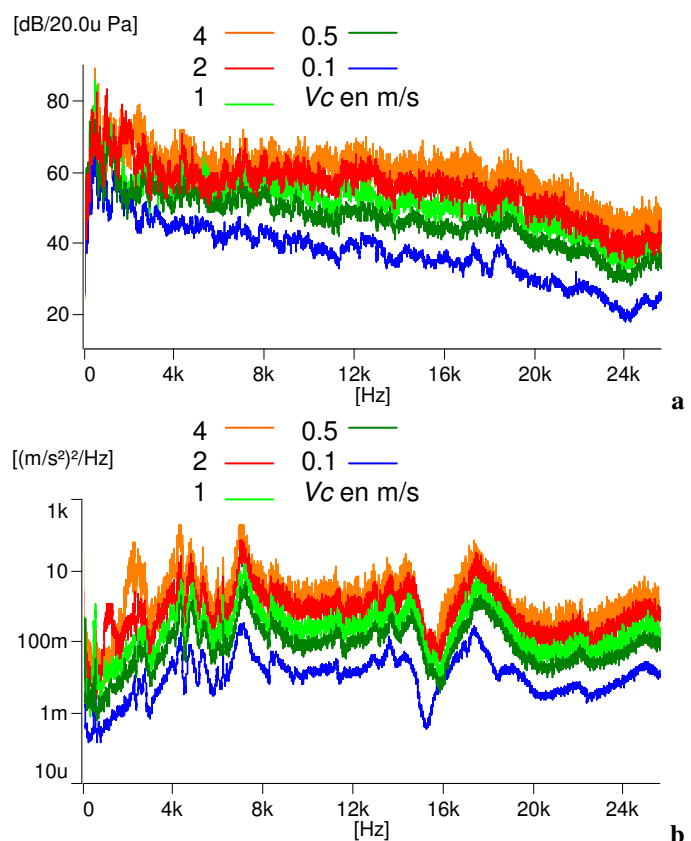


Figure 99 : Evolution du SPL du micro (a) et de la DSP de Y_c (b) en fonction de la vitesse linéaire de coupe (essais 130, 131, 133, 135, 137, $E_p=2\text{mm}$, sans barre)

1.2.2 Epaisseur

La comparaison des spectres des signaux de Xc (DSP) et du microphone (SPL) pour deux essais distincts par le seul facteur épaisseur confirme les résultats de l'analyse temporelle. Excepté la signature de la bande fréquentielle causée par l'ouverture des fissures, les niveaux sont faiblement augmentés (et de manière homogène) sur toute la bande fréquentielle avec l'épaisseur (de 1 à 3 mm).

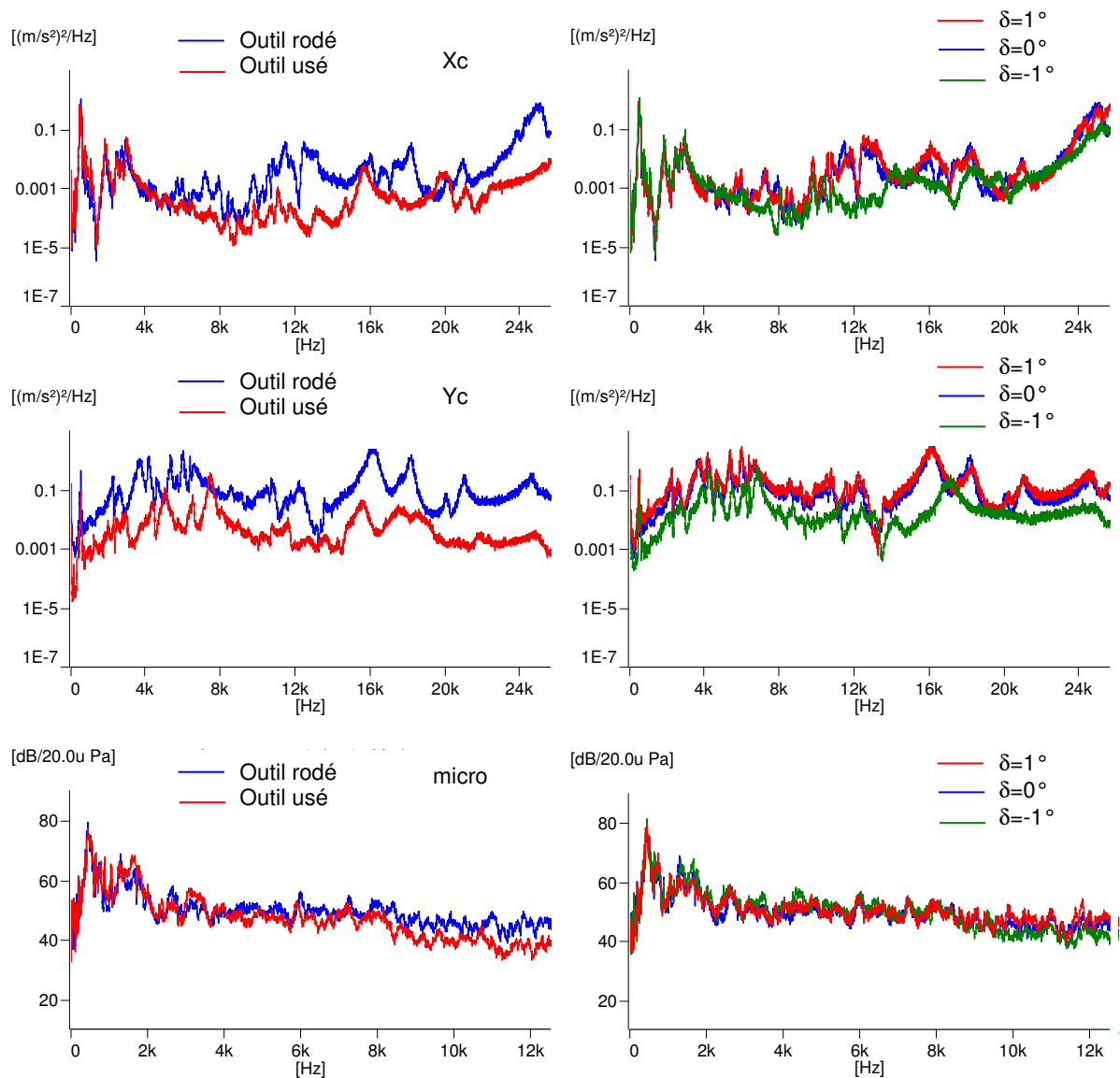
Dans la direction d'avance, la valeur de l'angle de dépouille doit être adaptée à l'épaisseur déroulée pour maintenir un effort FYc légèrement positif. En passant de 1 à 3 mm d'épaisseur, les opérateurs sur dérouleuse réduisent la valeur de l'angle de dépouille. L'observation des spectres de Yc révèle effectivement une hausse répartie sur la bande de fréquence (rapport de 6 à plus de 10 entre les DSP du signal issu de Yc pour les essais 35 et 36). Ce mécanisme est assimilable à une augmentation de la valeur de l'angle de dépouille dont nous allons examiner les conséquences et non à un effet direct de l'épaisseur déroulée.

1.2.3 Dépouille et usure

La Figure 100 présente les spectres des relevés des trois capteurs en fonction de l'usure de l'outil et de la valeur de l'angle de dépouille.

Le microphone est très peu sensible à l'un ou l'autre de ces paramètres sur sa bande passante ce qui conforte les résultats des analyses temporelles. Nous n'excluons cependant pas la possibilité de caractériser leur influence (en particulier celle de l'usure de l'outil) par des mesures acoustiques en se focalisant sur certaines bandes spectrales ou en élargissant le domaine d'étude aux fréquences ultrasonores.

En accord avec l'analyse de corrélations, usure et angle de dépouille peuvent présenter des conséquences très semblables sur les vibrations mesurées sur la face de dépouille. Ces spectres permettent de vérifier qu'il s'agit bien d'un phénomène de talonnage de l'outil puisque la baisse du niveau vibratoire est surtout sensible pour des angles de dépouille négatifs avec un outil rodé. La faible différence de niveau mesurable entre les spectres de Yc obtenus pour des angles de dépouille positifs ou nuls (probablement masquée dans l'analyse des corrélations par l'usure) conforte ce raisonnement. L'effet du talonnage de l'outil induit par l'usure de l'outil est bien connu des opérateurs. Ils augmentent généralement la valeur de l'angle de dépouille lorsque l'usure progresse.



a : DSP de Xc et Yc et SPL du micro (essais 12 et 60) **b** : DSP de Xc, Yc et SPL du micro (essais 12, 16 et 20)

Figure 100 : Influence de l'usure de l'outil (a) et de la valeur de l'angle de dépouille (b) sur les DSP des accéléromètres Xc et Yc et le SPL du microphone pour des déroulages de hêtre

Le décalage positif des fréquences de résonance pour un angle de dépouille négatif est une autre conséquence visible du talonnage. Il matérialise le surcroît de rigidité induit par le contact face de dépouille/billon. Cette remarque reste vraie pour le cas de l'usure.

Contrairement au cas du hêtre où l'outil a été démonté entre les modalités « outil rodé » et « outil usé » pour être réaffûté, les essais conduits à partir du peuplier présentent rigoureusement les mêmes conditions d'encastrement. Les spectres suivants (configurations identiques à celles la Figure 100) permettent de confirmer le décalage positif des fréquences de résonance suivant Yc provoqué par l'usure de l'outil. La baisse du niveau vibratoire, consécutive au talonnage sur les DSP « outil usé » et « dépouille négative » de Yc, est répartie de manière assez régulière mais semble s'accroître au delà de 20 kHz, en particulier pour le

hêtre (lissage des spectres) ce qui n'apparaissait pas clairement suite à l'analyse des corrélations.

Il est donc concevable de décrire l'évolution de l'usure de l'outil à l'aide d'un accéléromètre fixé sur la face de dépouille (large bande comme nous l'avons fait ou plus spécifiquement sensible aux hautes fréquences comme le suggèrent ces relevés) mais une valeur négative de l'angle de dépouille risque de réduire le pouvoir discriminant de la mesure.

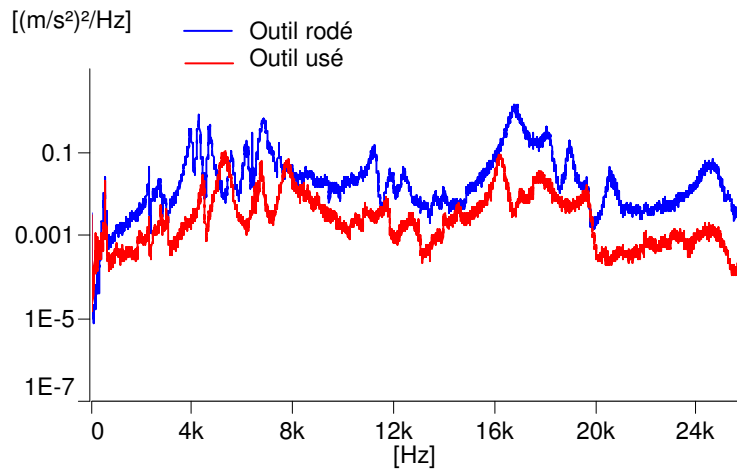


Figure 101 : Influence de l'usure de l'outil sur les DSP de Yc (essais 36 et 84, peuplier)

Les spectres des signaux issus de l'accéléromètre dans la direction de coupe permettent de préciser les résultats de la partie précédente. Tout semble prouver qu'il existe bien une action combinée du talonnage de l'outil et d'un changement de régime de coupe occasionné par l'usure de l'outil. Les spectres suivant présentent les DSP du signal Xc obtenus à partir de peuplier pour des configurations identiques à celles de la Figure 100.

Une valeur négative de l'angle de dépouille ne modifie pas fondamentalement l'allure des spectres dans cette direction contrairement au cas du hêtre. En effet, la signature du talonnage est logiquement plus marquée pour le hêtre (module d'élasticité radial nettement supérieur à celui du peuplier). Cette dernière se manifeste par une diminution de l'amplitude des spectres sur une bande de fréquences variable suivant les essais (comprise entre 10 et 20 kHz). Elle semble s'accompagner, comme dans la direction Y, d'un léger décalage des fréquences de résonance vers les grandes valeurs.

Parallèlement, l'usure se traduit par une perturbation assez semblable des spectres pour les deux essences. Au-delà d'une dizaine de kilohertz, le niveau des mesures baisse sensiblement et les fréquences excitées sont méconnaissables. Bien que l'outil ait été démonté entre les essais « outil rodé » et « outil usé » pour le hêtre, il est peu probable que cette opération soit à l'origine des telles perturbations.

En effet, le phénomène est semblable pour les mesures à partir de peuplier ci-contre qui n'a pas subi cette opération. De plus cette direction est a priori peu sensible au démontage contrairement à la direction Y où les mesures sont pourtant moins dissemblables. On peut donc penser que ces spectres illustrent la modification des mécanismes en cours dans la zone de coupe. Il ne s'agit probablement pas de l'expression directe de contraintes de compression intenses en amont de l'arête (ce genre de phénomène est plutôt mesurable dans le domaine des Emissions Acoustiques, i.e. au-delà de 100 kHz), mais plutôt de leurs conséquences sur la rigidité globale de l'ensemble. D'après les spectres Figure 102, il serait judicieux de suivre l'évolution de la bande comprise entre 12 et 16 kHz voir même au-delà puisqu'elles sont très réactives à l'usure.

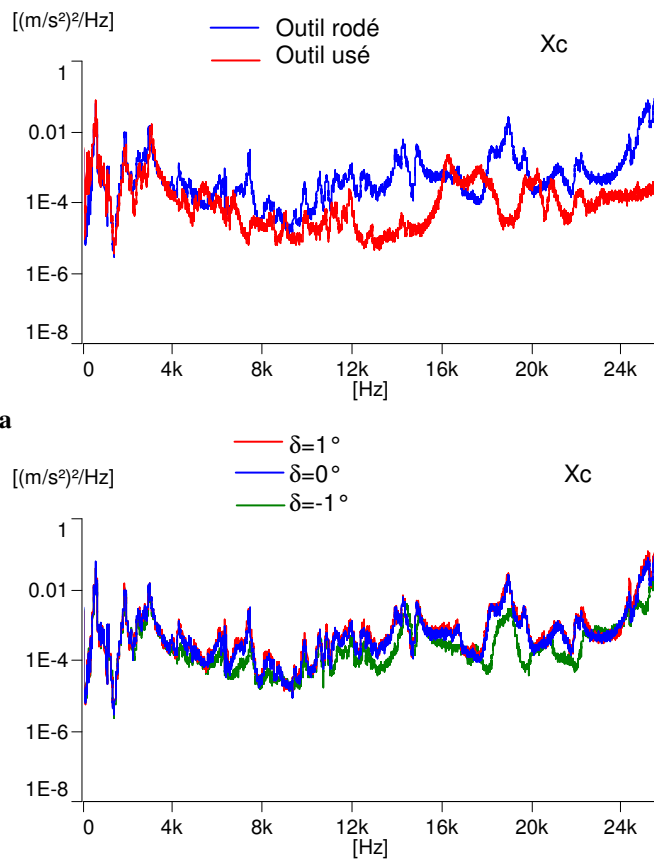


Figure 102 : Influence de l'usure de l'outil (a) et de la valeur de l'angle de dépouille (b) sur les DSP de Xc
(a : essais 36 et 84 ; b : 36, 40 et 44)

Les quelques essais réalisés ne permettent que d'initier une approche du suivi de l'usure par des mesures vibratoires. Ces remarques constituent une base de réflexion pour de futures investigations et doivent être considérées dans leur contexte (usure très sévère du couteau, et variations d'épaisseur introduites par les refus de coupe faibles). On peut cependant retenir que les accéléromètres montrent un potentiel intéressant pour le suivi de l'usure de l'outil.

1.2.4 Essence et densité

La Figure 103 représente les DSP des signaux des accéléromètres pour les trois matériaux déroulés dans les mêmes conditions de coupe. L'analyse des corrélations conduite dans le domaine temporel a montré une relation significative et positive entre la densité, en première approximation et le niveau vibratoire (exprimé par le RMS). Les spectres obtenus suite aux essais de déroulage de PTFE apportent des éléments de réponse supplémentaires.

Le niveau vibratoire, nettement plus faible pour le PTFE, matérialise le rôle d'amortisseur joué par le disque faiblement compressible (en particulier suivant Y_c) mais aussi l'incidence fondamentale de la structure du matériau (en particulier pour X_c). En effet, les bois, pourtant peu denses comparativement au PTFE, génèrent des niveaux vibratoires nettement supérieurs sur toute la bande d'analyse. Le seul facteur densité ne suffit pas à décrire les vibrations générées par la coupe. Les conditions de frottement sur les faces de l'outil et la microstructure du matériau (hétérogénéité de densité, présence de rayons ligneux, taille des vaisseaux) ont une incidence certainement non négligeable sur ces relevés.

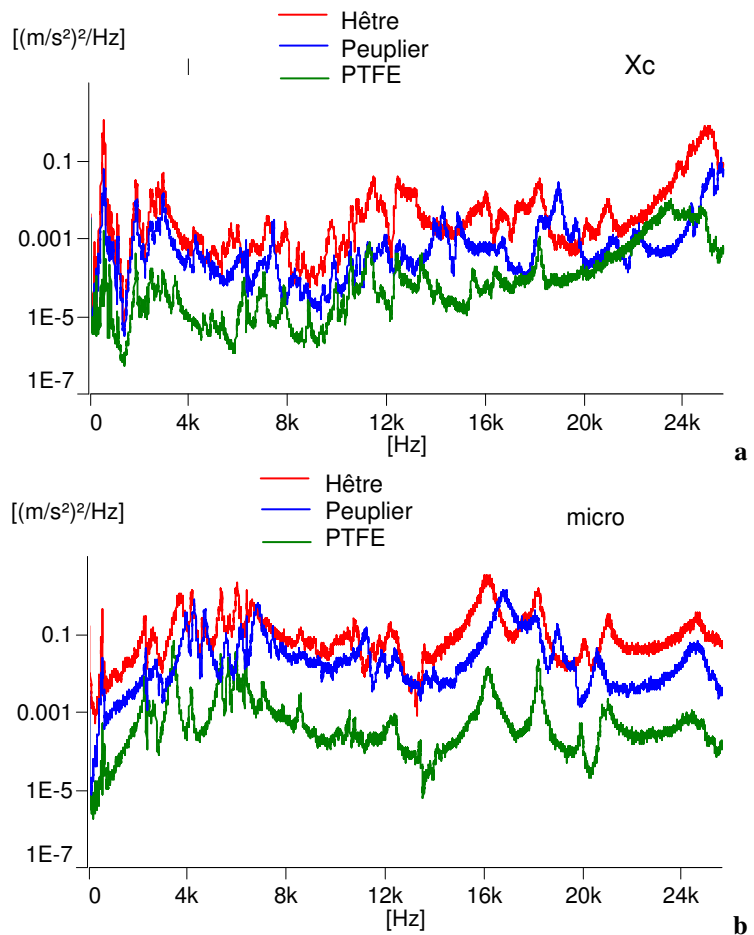


Figure 103 : DSP des signaux de X_c (a) et de Y_c (b) pour les essais 1 (PTFE), 12 (Hêtre) et 36 (Peuplier)
($N=6400$ et $T= 250ms$ $E_p=1mm$, $V_c=0.5m/s$, $\delta=0^\circ$, outil rodé).

Le mécanisme de formation du copeau étant principalement dû au cisaillement, ces hétérogénéités sont autant de micro excitations qui se répercutent sur tout le contenu fréquentiel des mesures à la manière d'un bruit blanc.

NB : Les décalages des fréquences observés entre les différents matériaux sont probablement dus en grande partie au démontage des outils (pour affûtage avant les mesures outil rodé). Le système de bridage actuel de l'outil ne permet pas de garantir la conservation de la fonction de transfert du système sur tout le domaine spectral.

1.2.5 Barre de pression

L'analyse des corrélations des niveaux RMS des vibrations et du SPL du microphone avait révélé une baisse significative engendrée par l'action de la barre de pression. Les relevés Figure 104 permettent de préciser comment est distribuée cette action sur le contenu fréquentiel des mesures. Dans le domaine des fréquences plutôt basses (<4 kHz), la différence de niveau est surtout concrétisée par la disparition des fréquences de fissuration.

Au-delà, la baisse assez homogène en échelle logarithmique (rapport de 10 au moins) n'est pas une conséquence de l'ouverture des fissures comme on aurait pu le penser. En effet, pour les essais 126 à 129 (taux de pression de 5 à 20%), elle se poursuit même lorsque la fissuration n'est plus sensible.

En comprimant le copeau sur la face d'attaque et en favorisant la sur-épaisseur du billon (qui accroît la surface de contact billon/face de dépouille), la barre de pression limite les vibrations dans la zone de coupe. Ce mécanisme est très semblable à celui provoqué par des angles de dépouille négatifs sur les vibrations mesurées sur la face de dépouille. L'usure de l'outil, en favorisant la sur-épaisseur, ne fait qu'amplifier cette tendance.

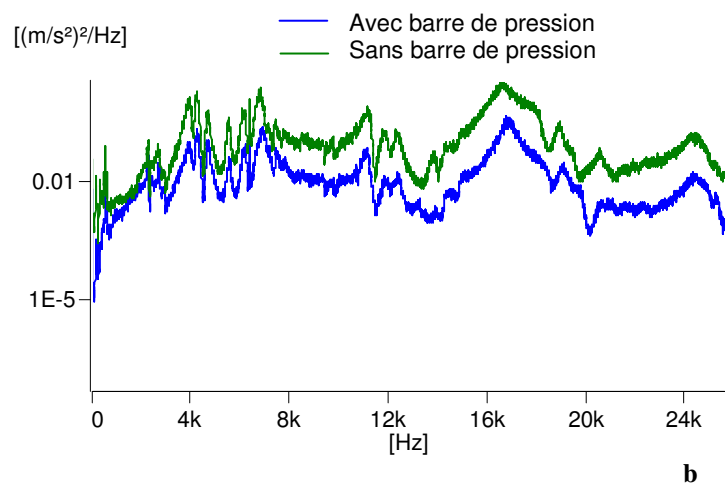
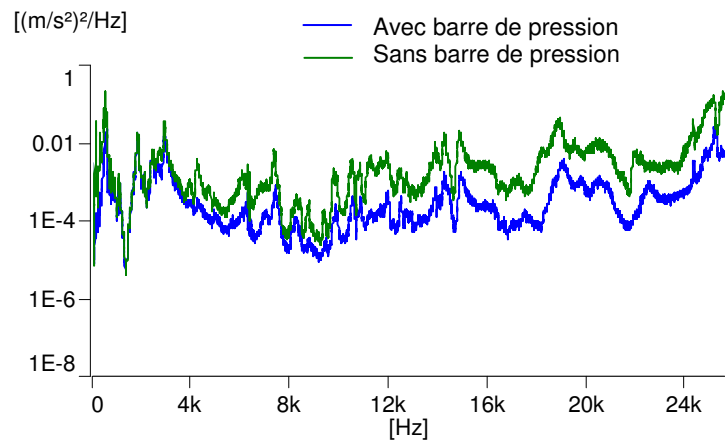


Figure 104 : DSP des signaux de X_c (a), de Y_c (b) pour les essais 35 (sans barre) et 39 (avec barre)
($N=6400$ et $T= 250ms$, $E_p=3mm$, $V_c=0.5m/s$, $\delta=0^\circ$, outil rodé).

Une première esquisse de l'évolution des contributions des paramètres clefs du déroulage à partir de mesures acoustiques et vibratoires a été réalisée. L'usure de l'outil et le mécanisme de fissuration sont les seuls paramètres qui modifient fondamentalement la nature des spectres résultants des capteurs (et pas seulement leur amplitude). Le suivi de leur évolution dans le temps serait certainement riche d'enseignements.

L'analyse temps-fréquence n'a pas pu être réalisée pour le cas de l'usure ou les démontages successifs nécessaire à la mesure du recul de l'arête de coupe rendent l'interprétation des spectres peu fiable. En revanche, le cas de la fissuration a été traité par la méthode des spectrogrammes (waterfall). Les résultats sont présentés dans le paragraphe suivant. Le cas de la vitesse de coupe a également subi ce traitement afin de déterminer les conséquences respectives des deux modes de déroulages possibles (vitesse linéaire constante ou vitesse de rotation constante).

Enfin, tous les indicateurs employés pour décrire les variations d'épaisseur dans la partie V montrent le rôle essentiel de la barre de pression dans la genèse des transitoires. L'analyse conduite dans le domaine du temps ne nous a pas permis de détecter ces phénomènes de manière satisfaisante. On peut penser que ces transitoires modulent les signaux. Dans ce cas, une approche temps-fréquence peut nous permettre de les identifier.

2 Spectrogramme

L'étude des différents outils d'analyses temps-fréquence a montré la simplicité et la bonne aptitude des spectrogrammes au suivi des phénomènes relativement lents. D'un point de vue pratique, les spectrogrammes ont été obtenus en stockant dans un « buffer », les spectres obtenus sur une fenêtre d'observation fixe ($T=125$ ms en général) avec un taux de recouvrement nul.

2.1 Fissuration et arrachements

La Figure 105 présente le spectrogramme obtenu à partir de X_c pour l'essai 11 (hêtre très fissuré, $V_c=0.5$ m/s) sur un peu plus d'un tour de billon (fin de déroulage).

Cette représentation permet d'illustrer les remarques du paragraphe VI.1.1.2.2 concernant la « discrétisation des fréquences de fissuration ». La signature de l'ouverture, localisée entre 128 et 192 Hz (± 4 Hz), évolue effectivement au cours d'un même tour. La possibilité de visualiser les différentes fréquences excitées est liée au compromis nécessaire entre résolution temporelle et résolution fréquentielle. Les fréquences les plus basses (128 Hz) apparaissent avec une périodicité d'un tour bien marquée. Cette fréquence est nettement plus faible que la moyenne obtenue pour l'essai 11 (173 Hz d'après les mesures temporelles et 170 Hz d'après le rapport des DSP). Le placage produit est classé dans la catégorie (b), de type rugueux. Il présente des arrachements très marqués sur quelques centimètres par tour dont la fréquence a été mesurée à 257 ondulations par mètre (cf. V.1.2.1). En considérant la vitesse comme égale à 0.5 m/s, la fréquence d'apparition théorique de ce défaut est 128.5 Hz qui correspond précisément aux fréquences les plus basses mesurées. La périodicité d'apparition des arrachements, (principalement liée à l'orientation du plan de coupe pour $\theta < 0^\circ$ même si ce phénomène a également été observé dans une zone où le fil était perturbé par la proximité d'un nœud), permet d'identifier sans mal les pics mesurés pour la fréquence de 128 Hz comme la signature de ce défaut (cf. Figure 106).

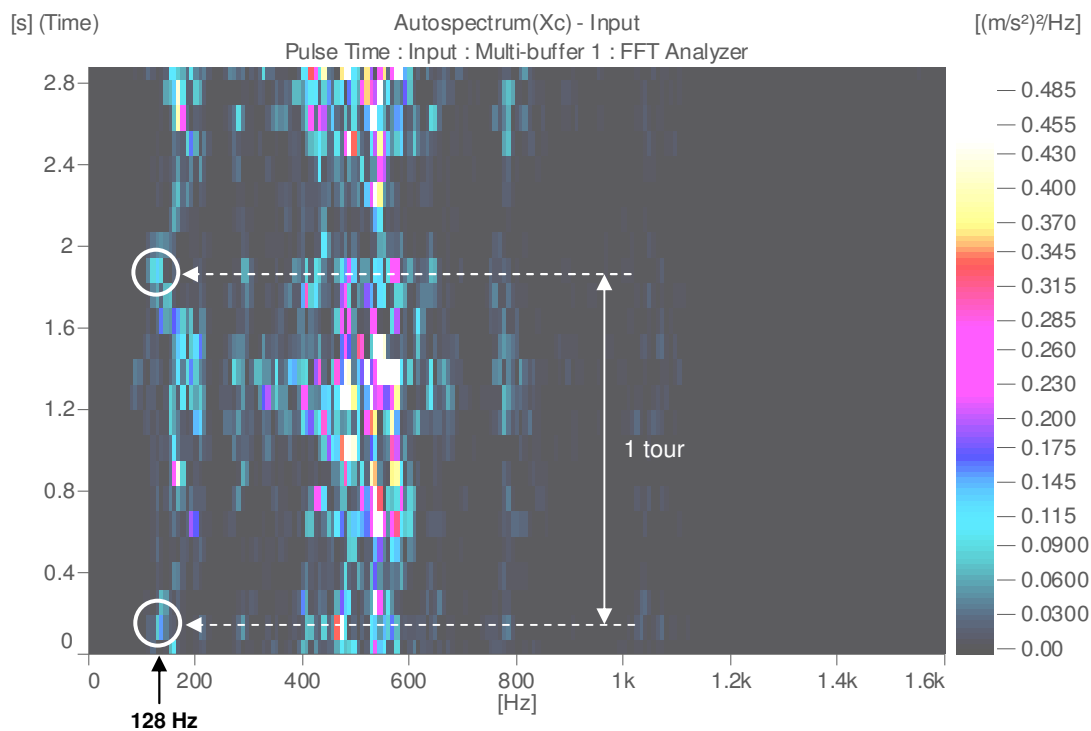


Figure 105 : Spectrogramme des DSP de l'accéléromètre Xc lors du déroulage 11 (T= 125 ms, N=200 ; essai 11 : hêtre, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=0.5\text{m/s}$, outil rodé, sans barre)

Les DSP des cellules dynamométriques, de Yc ou du micro conduisent aux mêmes conclusions (en particulier FXc) mais le phénomène est plus difficilement identifiable.

Considérée comme une variation de l'épaisseur du placage, la possibilité de mesurer leur période d'apparition ouvre de nouvelles perspectives : les variations d'épaisseur qualifiées de rapides.

La grande rigidité de la microdérouleuse a permis de soigner les mesures mais a rendu difficile la genèse de ce type de variations d'épaisseur. Il serait judicieux de renouveler l'expérience sur une dérouleuse de taille classique plus à même de produire ce type de défauts.

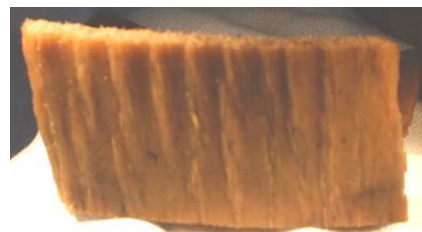


Figure 106 : Arrachements détectés par l'accéléromètre Xc (catégorie (b) de placages)

2.2 Rôle de la barre de pression

2.2.1 Premier tour

Le premier tour de déroulage est très caractéristique de l'action de la barre puisque les contraintes de compression qu'elle exerce sur le placage varient avec son épaisseur. La Figure 107 présente le spectrogramme des DSP de l'accéléromètre Xc au cours de l'essai 23 (réalisé en utilisant la barre de pression) pendant 2.5s soit un peu plus longtemps que la durée du

premier tour (2s environ). Une rampe de fréquence se distingue pour les basses fréquences. Elle se détache tout d'abord de la fréquence de résonance de 536 Hz au bout de 650 ms (5^{ème} calcul) sous la forme d'un pic à 432 Hz. La rampe poursuit sa progression de manière pratiquement linéaire (tendance confirmée par les résultats présentés en VII.2.3) vers les fréquences faibles pendant 725 ms (spectre obtenu pour $t=1.375$ s) où le pic principal est mesuré pour une fréquence de 144 Hz.

Durant cette phase, la barre n'agit pas et l'épaisseur croît de manière linéaire. Conformément aux observations pour des placages d'épaisseur variable, la fréquence d'apparition des fissures diminue et leur profondeur augmente (cf. V.1.2.2). On retrouve ces caractéristiques sur la rampe de fréquence (bien que l'augmentation de l'amplitude des pics soit plutôt irrégulière). Ensuite, la barre commence à agir.

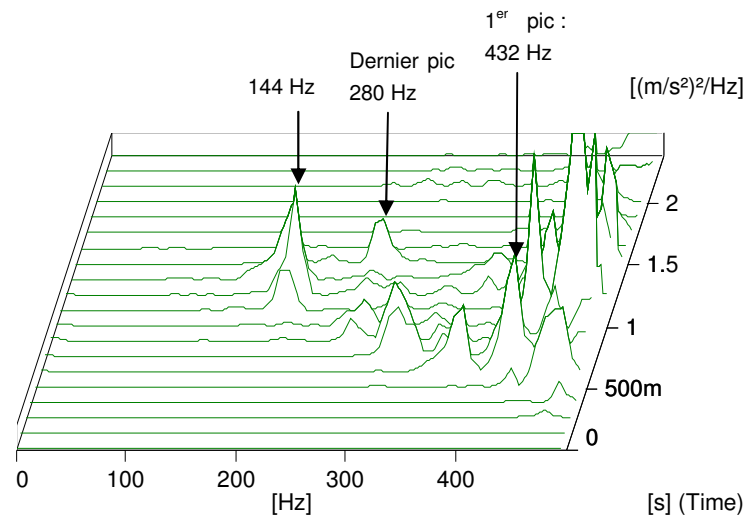


Figure 107 : Waterfall (DSP) de X_c pour le premier tour de l'essai 23 ($T=125$ ms, $N=200$; essai 23 : hêtre, $E_p=3$ mm, $V_c=0.5$ m/s, taux de compression= 15.67%, outil rodé)

Le spectre suivant présente un pic pour une fréquence nettement supérieure (280 Hz). Enfin, plus aucun pic n'émerge dans la bande de fréquence ce qui signe une action correcte de la barre du point de vue de la fissuration.

Les mesures vibratoires offrent donc la possibilité de suivre en temps réel l'évolution du mécanisme de fissuration en cours d'usinage (en particulier dans le direction de coupe). Les relevés du microphone sont par contre moins performants dans ce cas où nous n'avons pas utilisé de signal de référence.

Au delà de la connaissance des fréquences de fissuration moyennes des placages, il est envisageable de décrire la répartition des fissures le long du placage déroulé. La précision de la mesure est inversement liée au temps d'observation et donc très sensible à la vitesse de coupe. Pour s'affranchir de la dualité des résolutions temporelles et fréquentielles de ce type d'analyses, il faut revenir au domaine temporel et rechercher la signature des fissures directement sur les signaux dans le temps. La dernière partie du mémoire sera consacrée à cette tâche.

2.2.2 Barre de pression et variations d'épaisseur

La Figure 108 représente le spectrogramme des DSP de l'accéléromètre Xc au cours de l'essai 23 (réalisé en utilisant la barre de pression). Les huit premières secondes, correspondant à un peu plus de quatre tours, sont traitées.

D'une manière générale, le niveau vibratoire est maximum pour le premier tour, sur l'ensemble des bandes de fréquences, conformément aux observations précédentes conduites dans les domaines temporels et fréquentiels. La rampe de fréquence associée à l'évolution du mécanisme de fissuration y est également identifiable (cerclée sur la Figure 108).

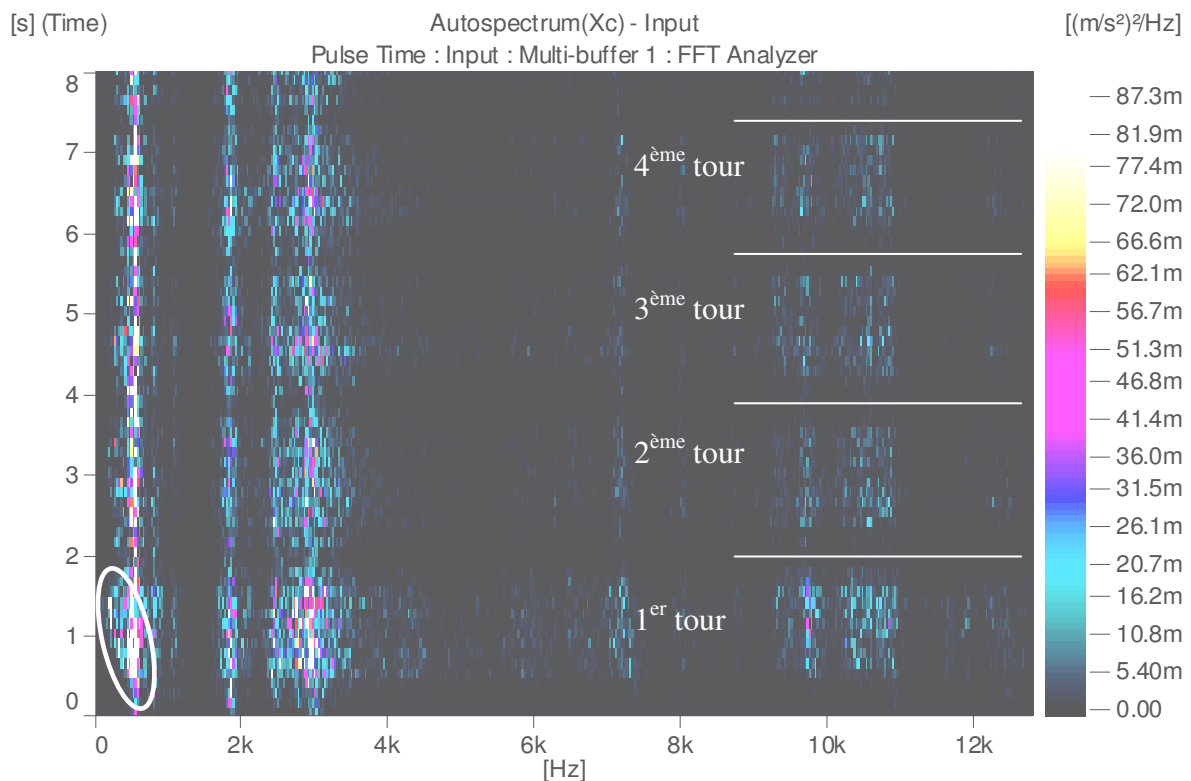


Figure 108 : Spectrogramme des DSP de l'accéléromètre Xc lors du déroulage 23

(T=125 ms, N=1600 ; essai 23 : hêtre, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=0.5\text{m/s}$, taux de compression= 15.67%, outil rodé)

Les différents tours sont aisément identifiables sur le graphique (également pour Yc, le microphone et les capteurs d'efforts), ce qui confirme une modulation des amplitudes suivant la fréquence de rotation du billon mise en évidence par l'analyse de l'enveloppe du signal.

On pourrait penser qu'il s'agit de la trace de la lente convergence vers l'épaisseur nominale, mais son incidence sur la modulation n'est pas prépondérante. En effet, même pour les essais où la convergence est rapide (en l'absence de barre en particulier), ce phénomène est très marqué pour le hêtre, un peu plus faiblement pour le peuplier et pas du tout pour le PTFE. Cette modulation reflète avant tout une sensibilité déjà constatée des mesures acoustiques et vibratoires à l'orientation du plan de coupe et à la nature du matériau déroulé (densité,

orientation du plan de coupe et plan ligneux). Les variations de l'épaisseur sont plus secondaires, mais leur effet sur la modulation n'est pas négligeable en présence de la barre.

La Figure 109 représente les niveaux énergétiques des accéléromètres Xc, Yc et Yb dans des bandes fréquentielles spécifiques (indiquées en légende) en fonction du temps ainsi que le profil d'épaisseur du placage produit. Ces bandes correspondent à des fréquences de résonance excitées tout d'abord par l'ouverture des fissures (1^{er} tour) puis par la sur-épaisseur du billon provoquée par l'action de la barre. Nous les avons choisis précisément pour leur « faculté » à être excités lorsque la machine est sollicitée.

Les évolutions des accéléromètres sont « en phase » avec celles de l'épaisseur. Pour les capteurs fixés sur l'outil, l'amplitude des signaux décroît fortement après le premier tour (fin de la fissuration), puis plus lentement dans les tours suivants. Ce comportement est le symétrique de celui du profil d'épaisseur. Le signal de l'accéléromètre vissé sur la barre évolue en phase avec les variations d'épaisseur.

Malgré la bonne corrélation qui lie le niveau de pression sonore du microphone aux efforts FYb, il semble assez peu sensible au phénomène de sur-épaisseur. La trace des différents tours est nettement moins bien marquée que pour les signaux des accéléromètres de la figure suivante.

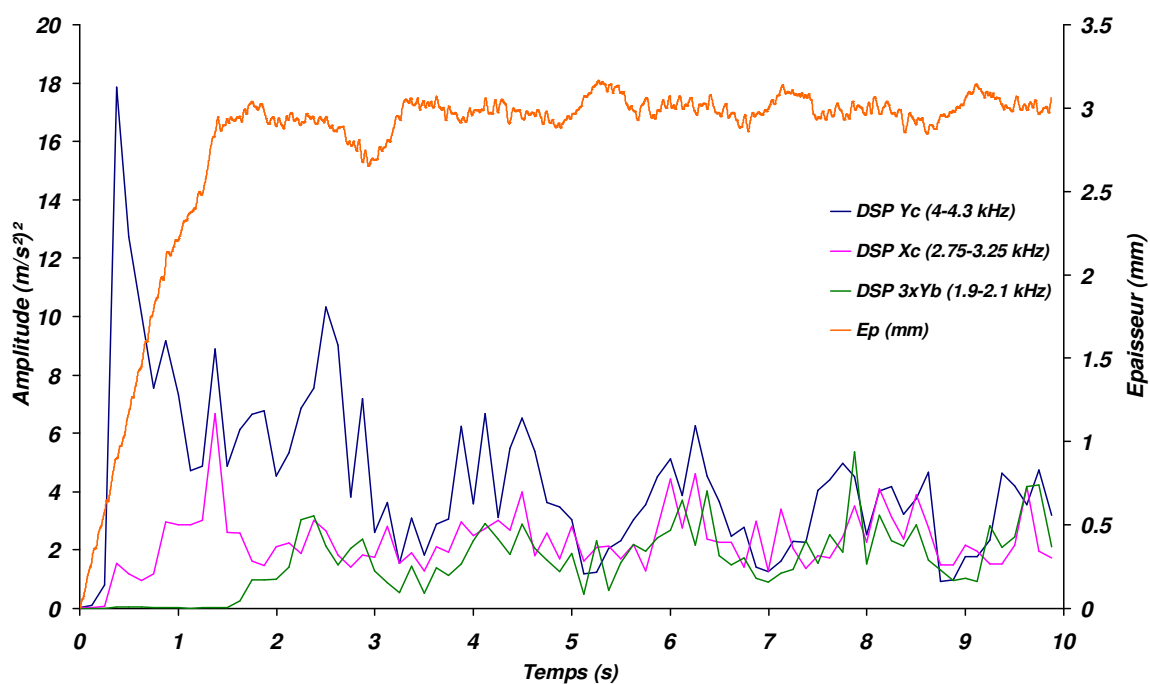


Figure 109 : Evolution des DSP des signaux des accéléromètres Xc, Yc et Yb calculés sur des bandes fréquentielles spécifiques et de l'épaisseur du placage déroulé en fonction du temps pour l'essai 23 (hêtre, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=0.5\text{m/s}$, taux de compression= 15.67%, outil rodé)

Les résultats de ces mesures sont spécifiques de la machine (choix des bandes d'analyse), mais la démarche est beaucoup plus générale et présente un certain potentiel. Les mesures

vibratoires ont montré leurs limites vis-à-vis du suivi de l'épaisseur, en particulier en l'absence de barre de pression. Par contre, elles semblent plus à même de décrire l'évolution de la surépaisseur du billon ce qui constitue un premier pas encourageant.

2.2.3 Influence de la vitesse de coupe

Les analyses menées dans le domaine temporel et spectral ont montré le rôle essentiel joué par la vitesse de coupe. Une réduction des niveaux vibratoires a été observée pour les essais réalisés à vitesse de rotation constante.

Les spectrogrammes de la Figure 110 ont été obtenus à partir d'essais de déroulage longs à vitesse linéaire constante ($V_c=1$ m/s) ou à vitesse de rotation constante ($V_c=60$ Tr/min).

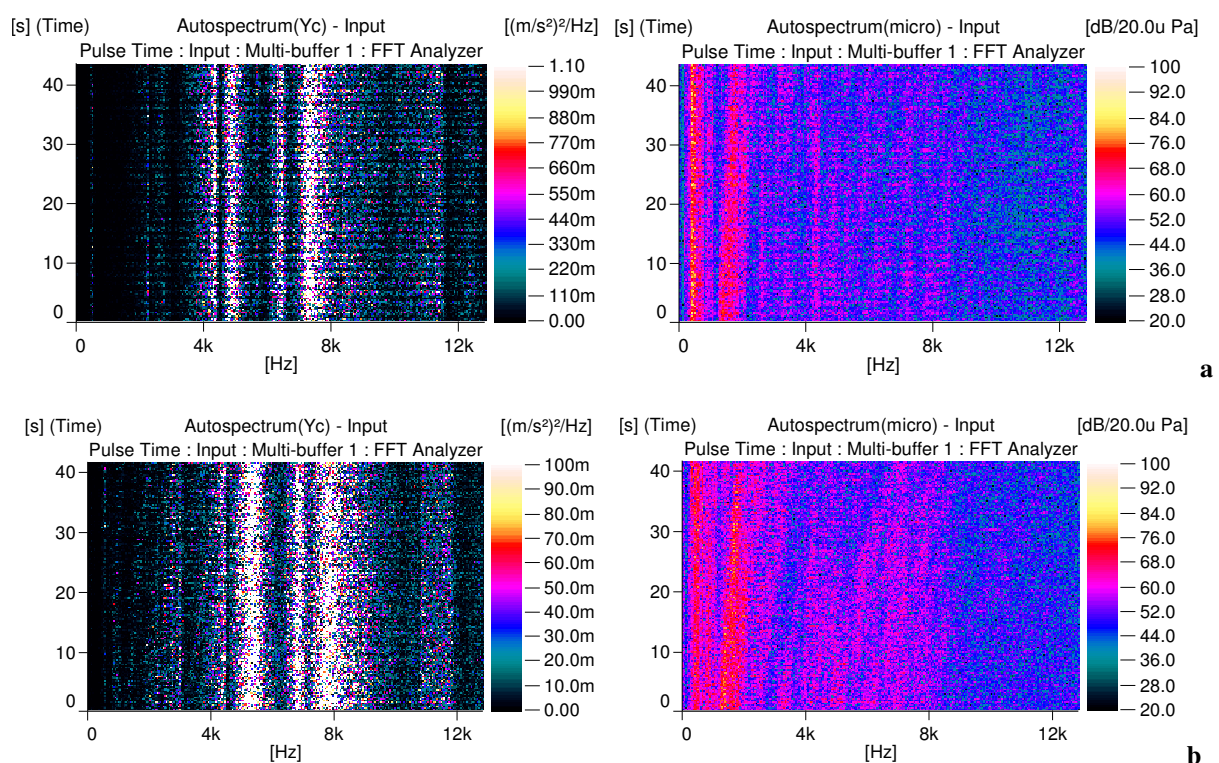


Figure 110 : Spectrogrammes des DSP de Yc et du SPL du microphone pour la déroulage d'un disque complet à vitesse linéaire constante (a) ou à vitesse de rotation constante (b)

($T=125$ ms, $N=1600$; hêtre, $E_p=1$ mm, (a) $V_c=1$ m/s et (b) $V_c=60$ Tr/min, $\delta=1^\circ$, sans barre, outil rodé)

Les spectres provenant du signal de l'accéléromètre dans la direction d'avance sont très stables uniquement pour l'essai conduit à vitesse linéaire constante. Dans ce cas, on distingue nettement la trace des différents tours (plus d'une trentaine), ce qui souligne les rôles majeurs de l'orientation du plan de coupe et de la vitesse effective de coupe sur les relevés vibratoires. La convergence vers l'épaisseur nominale est très rapide. Les faibles variations d'épaisseur ne peuvent causer la modulation de l'amplitude des signaux suivant la fréquence de rotation du billon ce qui confirme les remarques du paragraphe précédent.

En revanche, les mesures du niveau de pression sonore sont largement influencées par l'accélération des moteurs (cas a) mais également par la diminution de la vitesse linéaire de coupe (cas b) comme le soulignent les rampes de fréquences vers les valeurs positives présentes sur les spectrogrammes.

Nous pouvons retenir de ces analyses que les capteurs vibratoires recèlent beaucoup d'atouts pour le développement d'un système de contrôle en ligne du procédé. L'application la plus directe semble la mesure de la fréquence moyenne de fissuration des placages par un rapport des spectres, mais les possibilités de suivi de l'usure de l'outil, d'arrachements du placage ou de la sur-épaisseur du billon générée par la barre sont autant de pistes prometteuse à explorer plus finement. Les capteurs dans la direction de coupe (Xc et FXc) sont très sensibles aux arrachements et à la fissuration. A l'inverse, l'usure de l'outil et le régime de surépaisseur semblent plutôt influencer les mesures dans la direction d'avance²⁶.

Le microphone est sensible au mécanisme de fissuration, mais il est rarement plus efficace que Xc et souvent même supplanté. De plus, les perturbations extérieures inévitables dans un contexte industriel risquent de sérieusement affecter ses capacités. Il faut cependant reconnaître que les outils de traitement acoustiques employés sont également très simples. Une étude plus poussée, à partir d'une sonde intensimétrique par exemple et combinée à l'usage de techniques plus élaborées, apporterait certainement des éléments supplémentaires.

Le tableau suivant propose une caractérisation assez grossière des aptitudes des différents capteurs utilisés aux phénomènes les plus essentiels dans le but de construire un système d'aide à la décision des opérateurs.

	Xc	Yc	micro	Xb	Yb
Fissuration	+++	+	++	?/0 ¹	+
Arrachements	+++	+	+	0	0
Variation d'épaisseur²	+	++	+	0	+
Usure	++	+++	0	+	+

Tableau 24 : Aptitude des capteurs utilisés à décrire les phénomènes recherchés au cours des essais réalisés

(+++= très sensible ; ++= sensible ; += faiblement sensible ; 0= pas du tout sensible)

¹ mesure non effectuée mais probablement peu sensible

² Abus de langage, puisque nos conclusions concernent plutôt la sur-épaisseur du billon

²⁶ Yc est très sensible au mécanisme de fissuration de part sa position et son orientation mais l'emploi d'un signal de référence obtenu en utilisant la barre de pression sied assez mal à ce capteur.

Ces conclusions constituent une première référence pour orienter le choix des capteurs à utiliser mais elles doivent être considérées dans leur contexte expérimental. En particulier, la longueur du couteau peut très probablement modifier la hiérarchisation proposée sans parler de l'usage d'autres techniques de traitements des signaux plus évoluées.

PARTIE VII : Approche temporelle du déroulage : analyse locale du mécanisme de fissuration

Les analyses conduites dans le domaine spectral ont montré la possibilité de détecter la fréquence de fissuration moyenne des placages. En revanche, l'accès à la position de chaque fissure sur le placage n'est pas envisageable dans des conditions normales de production du fait de la dualité des résolutions temporelles et fréquentielles. Pour établir la carte de la position des fissures du placage, nous avons cherché à les détecter directement sur les signaux temporels issus des capteurs, dans un premier temps en l'absence de barre de pression (essais 108 à 125). Mais pour valider la démarche, une mesure objective de la position des fissures est nécessaire. C'est dans cet optique que le densimètre et le Martinomètre brièvement décrits en IV.4. ont été employés. Ces appareillages sont encore au stade initial de leur développement. Nous en sommes les premiers utilisateurs.

Les résultats et les outils qui vont suivre sont le fruit d'une démarche récente et en cours d'évolution. Les moyens et les méthodes nécessitent d'être optimisés, et notre approche se veut critique, mais les principes de bases proposés présentent un potentiel intéressant pour les chercheurs et les fabricants de placage.

1 Analyse des mesures de qualité du placage

L'observation d'un échantillonnage restreint de placage (cf V.1.2.2) a permis de vérifier le rôle très favorable joué par l'épaisseur du placage sur la profondeur et la distance moyenne inter-fissures. Les équipements utilisés présentent deux stratégies de mesure de l'épaisseur d'un placage sur une grande longueur.

1.1 Variations d'épaisseur

1.1.1 Mesurées par le Martinomètre

L'action des ressorts permet une bonne adhérence du placage sur la roue d'entraînement (cf. Figure 60) mais s'accompagne d'une erreur systématique. Les couches superficielles du bois sont légèrement écrasées au contact du roulement (0.1 à 0.15 mm), phénomène traduit par les ordonnées aux origines non nulles des régressions linéaires (cf. Figure 111). Le retrait²⁷ au séchage n'intervient que sur la pente des droites de régression. Ainsi, en intégrant son effet

²⁷ Le séchage a été justifié par la mauvaise qualité des signaux issus des lasers lors des mesures de placages à l'état vert.

calculé à partir des coefficients tirés de [GUITARD_1994] (0.0025 pour le peuplier et 0.0022 pour le hêtre par % d'humidité), la pente de la droite devient égale à 1.0025 pour le peuplier : on ajoute le coefficient d'allongement à la valeur de la pente (R^2 et ordonnées à l'origine conservés).

Dans le cas du hêtre, la pente devient supérieure à 1. En effet, le placage de 3.3 mm d'épaisseur appartenant à la catégorie (b) de placages, de type rugueux sur certaines parties. La grandeur mesurée surestime la véritable cote puisque la surface d'appui de la face inférieure du copeau passe par les sommets des arrachements.

En écartant cet essai, la pente de la régression passe à 1.0054, le coefficient de détermination reste inchangé mais l'ordonnée à l'origine augmente singulièrement : -0.074. Le bois de hêtre, plus dense et plus rigide en compression radiale, est très peu sensible au faible effort exercé par le ressort. L'erreur systématique commise est donc plus faible que pour le peuplier.

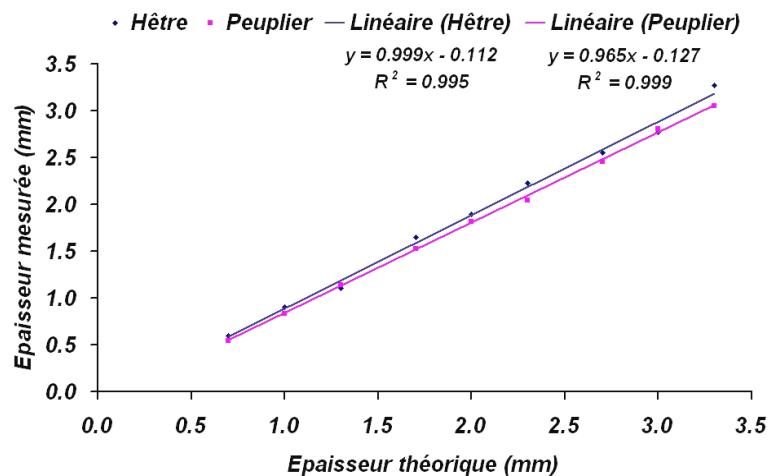


Figure 111 : Epaisseurs moyennes obtenues à partir du capteur de déplacement LVDT du Martinomètre (essais 108 à 125)

In fine, ces mesures d'épaisseur moyenne sont satisfaisantes étant donné les excellents coefficients de détermination des modèles (significatives à 0.1%) et l'échelle de mesure nécessaire relativement large (0.1mm).

Par contre, d'un point de vue local, les fissures perturbent la mesure de l'épaisseur. En choisissant un axe de faible diamètre pour les ouvrir et mieux les mesurer, ce qui constitue notre objectif premier, on altère la mesure locale des variations d'épaisseur puisque le roulement pénètre légèrement dans les fissures. On peut donc uniquement confirmer que les placages sont d'épaisseurs pratiquement constantes et égales aux épaisseurs nominales.

Le principe de la mesure des fissures en fléchissant le placage est très pertinent mais il s'accompagne d'un compromis nécessaire entre ouverture des fissures et pénétration du roulement dans les interstices. Il nous semblerait plus judicieux de dissocier les deux mesures, c'est-à-dire conserver l'idée de fléchir le placage, pour optimiser la visibilité des fissures du point de vue du laser, et anticiper la mesure d'épaisseur sur le guide. De cette manière, la surface du placage serait mesurée sur une surface plane (où les fissures sont fermées).

1.1.2 Mesurées par le densimètre

La Figure 112 présente le résultat de la mesure de hêtre et de peuplier à 15% d'humidité environ produits lors des essais 108 à 125. Cette opération est nécessaire puisque la mesure des profils de densité des placages est déduite de la relation qui lie intensité du faisceau des rayons X transmis, épaisseur, taux d'humidité et densité des placages (cf. Équation 23).

L'intégration du retrait radial théorique donne des pentes légèrement supérieures à 1, une nouvelle fois, sans changer les valeurs des ordonnées aux origines et celles des coefficients de détermination. L'exclusion du placage de hêtre de 3.3 mm d'épaisseur ne s'accompagne pas d'une modification significative des coefficients de la régression. Cela confirme l'aspect local de cette mesure (proche du milieu du placage).

Le passage du placage de hêtre en 2 mm d'épaisseur a été accompagné de forts parasites sur le signal du laser inférieur matérialisés par un écart type de la mesure six à dix fois supérieur aux autres configurations. Les valeurs des coefficients de détermination restent néanmoins significatifs à 0.1%.

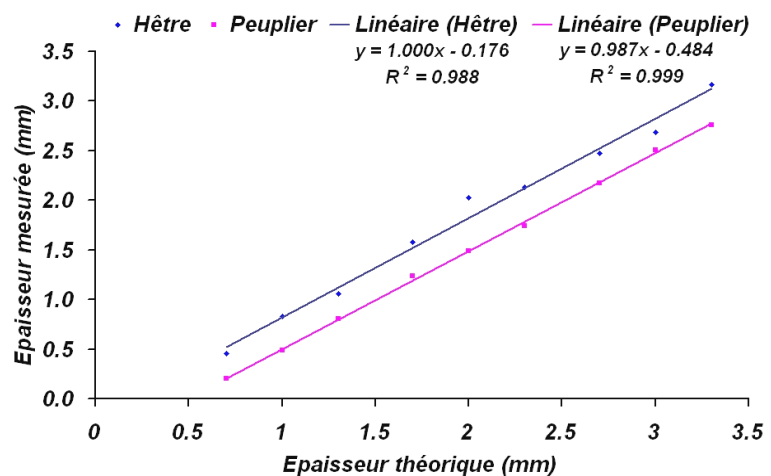


Figure 112 : Epaisseurs moyennes obtenues à partir des capteurs laser du densimètre (essais 108 à 125)

L'erreur systématique commise est par contre assez importante en particulier pour le peuplier : près de 5 dixièmes de mm. Les faisceaux des lasers ont tendance à traverser les couches superficielles du bois d'autant plus facilement que sa densité est faible et probablement aussi que sa couleur est claire.

Cela ne porte pas à préjudice pour la détection des fissures (effectuée également à partir d'un laser) mais perturbe singulièrement la mesure d'épaisseur. Les bonnes valeurs des coefficients de détermination (significatifs à 0.1%), permettent néanmoins de considérer ces modèles comme satisfaisants pour des mesures de valeurs moyennes. De plus, la qualité de la correspondance entre les deux méthodes est particulièrement élevée ($R^2=0.993$ pour le hêtre et 0.999 pour le peuplier).

Par contre, il semble risqué d'utiliser les composantes hautes fréquences des deux profils pour qualifier l'état des surfaces du placages. Comme nous l'avons déjà mentionné, la caractérisation de l'état de surface des bois verts reste difficilement accessible.

Tenant compte de ces remarques, deux stratégies de mesures sont envisageables :

➤ Conserver le densimètre en l'état et sécher les placages jusqu'à un taux d'hygrométrie proche de zéro.

➤ Remplacer les lasers par des capteurs à contact (LDVT) montés également tête-bêche afin de mesurer les deux profils.

La première option est directe, mais la sensibilité des lasers à la présence de fibres arrachées risque de ne pas disparaître totalement. La seconde nous semble préférable puisqu'elle est finalement plus précise.

Les deux équipements testés, en l'état actuel, ne permettent pas de mesurer avec précision les profils d'épaisseur des placages. Cela n'a pas perturbé l'analyse des échantillons sélectionnés, où l'épaisseur est pratiquement constante. Cependant, nous n'avons pas pu qualifier les placages d'épaisseur variable obtenus pour d'autres configurations expérimentales.

1.2 Mesures de la fissuration avec le Martinomètre

Le Martinomètre délivre une image du profil de la face fissurée du placage, entraîné en rotation à vitesse constante par l'arbre de sortie du moteur dans notre cas. Rappelons que la signature des fissures se trouve au niveau des vallées successives aux pics prépondérants (signature du passage du faisceau laser d'une lèvre à l'autre de la fissure).

1.2.1 Démarche de traitement des données

Pour détecter les vallées, plusieurs techniques ont été rapidement testées. La procédure retenue est finalement un compromis entre une règle de décision rigide et une observation au cas par cas des signaux :

1. Filtrage du signal (passe-bas, Butterworth, $f_c=200$ Hz, ordre 3). La composante haute fréquence, plus à même de décrire l'état de surface du placage, est évacuée.

2. Calcul de la dérivée du signal. L'opération de dérivation présente le double avantage de recentrer le signal sur zéro tout en profitant de la pente marquée du pic précédant la vallée. Le passage du faisceau du laser d'une lèvre à l'autre de la fissure s'accompagne d'oscillations importantes du signal d'autant plus que leurs limites ne sont pas toujours franches (lèvres non rectilignes, présence d'un paquet de fibres arrachés, interférences lorsque le laser traverse une fine couche cellulaire). La dérivée peut alors passer d'un maximum à un minimum local plusieurs fois en quelques millisecondes. Notons que le filtrage du profil a grandement limité ces parasites.

3. Détection des pics négatifs du signal dérivé. Un module disponible sous Labview, avec comme critère essentiel un niveau, est utilisé. Ce seuil, noté n_i , est défini pour chaque placage de manière empirique afin de se situer juste au dessus du bruit de fond du signal. Le suivi du nombre de pics distants de plus d'un millimètre a permis de guider ce choix. Cela

revient à considérer qu'en dessous de cette distance, deux pics consécutifs appartiennent à une même fissure. Lorsque n_i devient trop proche du bruit de fond, de nombreux pics proches sont détectés et non comptabilisés si bien que le nombre de « fissures potentielles » diminue (on ne présume pas de la signification réelle des pics). Pour le cas d'un placage de hêtre de 2.3 mm d'épaisseur, les longueurs des « fissures potentielles » en fonction de leur nombre sont représentées sur la Figure 113 pour les trois derniers seuils testés :

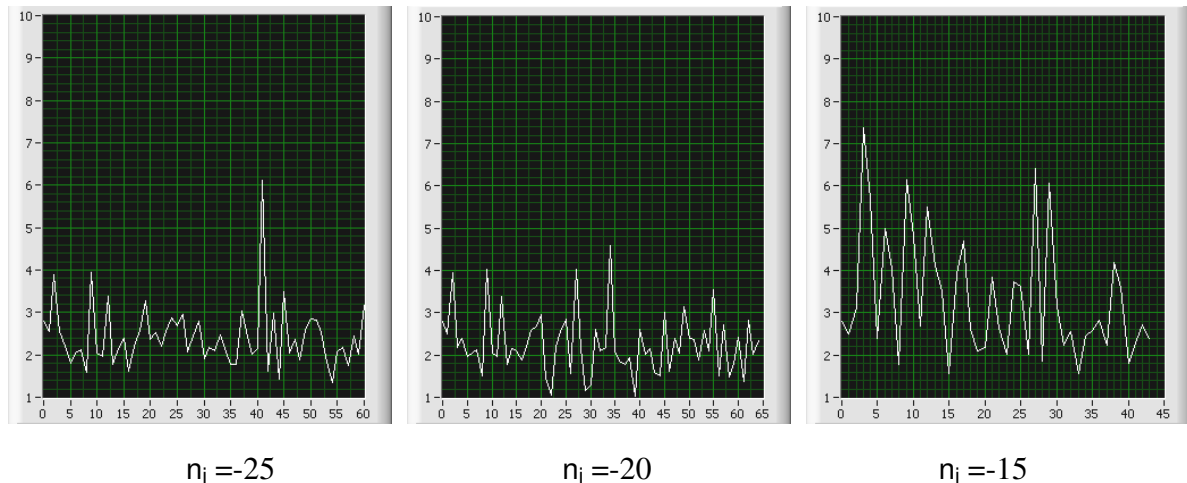


Figure 113 : Longueurs des fissures (en mm) en fonction du nombre de fissures détectées.

Exemple de détermination de η_i , seuil de détection des pics associés aux fissures d'un placage de hêtre ($E_p=2.3\text{mm}$, déroulé sans barre de pression) : Seuil retenu= -20

Dans cet exemple, le seuil retenu est donc -20. L'algorithme de détection de pic est alors appliqué. Nous avons cherché un compromis entre ce critère et un nombre minimum de « fissures potentielles » clairement plus courtes que la moyenne des autres observations (en particulier pour les fortes épaisseurs). Concrètement, cela se traduit par l'émergence de vallées sur les graphes précédents.

A ce stade, tous les pics d'amplitude inférieure au seuil défini sont stockés grâce au module de détection de pics mais beaucoup d'entre eux appartiennent à une même fissure. Un second critère a été appliqué pour rejeter ces mesures surabondantes.

4. Deux pics consécutifs ne peuvent être distants de moins de 40% de l'épaisseur. Cette valeur est largement inférieure aux observations de THIBAUT mentionnées en II.2.1.2.2.1.2 pour des essences homogènes (rapport entre pas de la fissuration et épaisseur du placage compris entre 1.3 et 1.7) mais permet un tri efficace. Enfin, le point finalement stocké est celui dont la dérivée est minimale. En effet, le passage brutal de faisceau laser d'une lèvre à l'autre de la fissure s'accompagne d'un pic significatif de la dérivée. Ce dernier constitue un minimum local pour une très grande majorité des situations.

La valeur retenue ne correspond pas au fond de la vallée en toute rigueur. L'erreur réellement commise est en général assez faible puisqu'elle ne dépend que de la différence de géométrie des lèvres supérieures de deux fissures consécutives. Localement, elle peut toutefois atteindre

0.8 mm dans les conditions les plus défavorables. Elle reste inférieure aux hétérogénéités de la fissure elle-même. La lèvre n'est pas toujours parfaitement rectiligne (oscillations ± 0.5 mm fréquentes). De plus, l'inclinaison locale du fil du bois influence fortement la propagation des fissures, dont les deux bords peuvent être décalés de plus d'1 mm, même pour un placage de 20 mm de largeur.

La figure suivante illustre le résultat de ce protocole de mesure pour un placage de hêtre fortement fissuré (cas très favorable à l'hétérogénéité des lèvres de fissures). L'amplitude des pics détectée a été arbitrairement fixée afin de faciliter la comparaison de leur position avec celle des vallées du profil de la face fissurée. L'incertitude de mesure est également représentée.

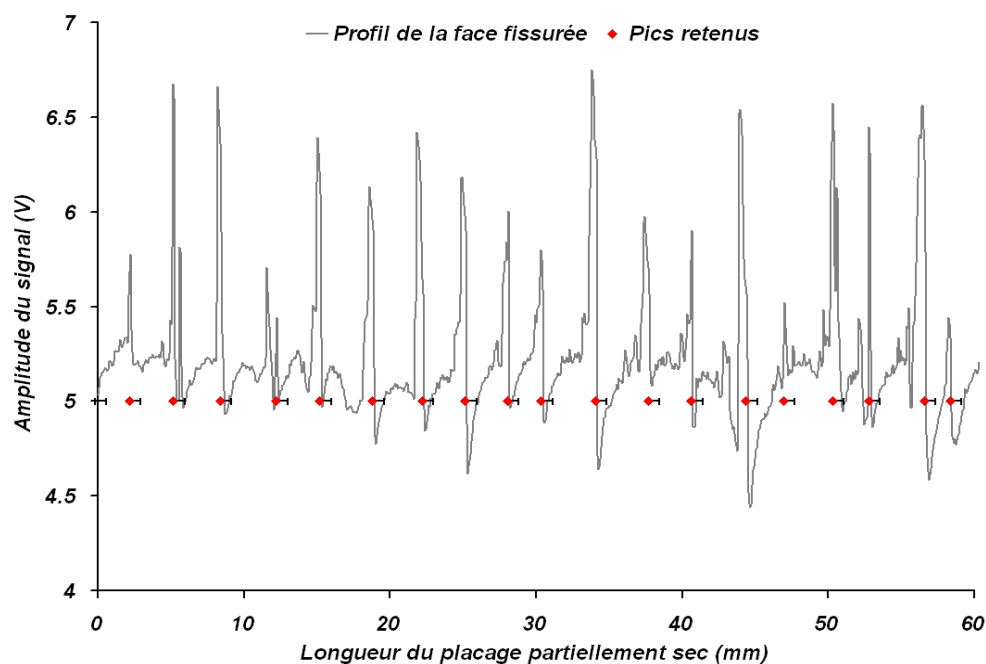


Figure 114 : Positions des pics relatifs aux fissures le long des 60 premiers millimètres d'un placage de hêtre partiellement sec (essai 115 : $E_p=3$ mm, déroulé sans barre de pression)

Il existe bien un décalage quasiment systématique entre la position du « pic retenu » et celle de l'ouverture de la fissure (vallée). Par contre, on peut noter une bonne qualité de la mesure de la répartition des fissures, matérialisée par la différence des distances entre deux pics successifs et entre les deux vallées correspondantes. Bien que ce cas soit l'un des moins bien adaptés à notre hypothèse en favorisant les hétérogénéités de signature des fissures, l'erreur réellement commise reste très souvent bien plus faible que l'incertitude de mesure.

Etant donné les indéterminations inhérentes à la mesure d'un profil et le peu de temps disponible dans cette phase expérimentale, cette démarche a été adoptée et appliquée à la série de placages concernés (108 à 125).

Enfin, les hétérogénéités du bois peuvent moduler localement le coefficient de retrait et compliquer la reconstruction du placage à l'état vert. Les profils de densité tirés du densimètre

permettent d'évaluer l'impact d'un retrait inhomogène sur la position des fissures. Avant d'en aborder les résultats, nous souhaitons proposer une démarche plus systématique pour la détection des fissures bien que pris par le temps, nous n'ayons pu l'appliquer aux placages produits.

Proposition d'un algorithme de sélection automatique des pics :

Les deux premiers points de la procédure sont identiques à la précédente, à savoir un filtrage passe bas suivi d'une dérivation.

La détermination du seuil peut se faire de manière totalement objective à partir de la distribution des longueurs entre les pics distants d'au moins $x\%$ de l'épaisseur (entre 10 et 80% en étant très large). Pour chaque x , le niveau du seuil (n_i) est abaissé par itérations successives (pas (p) sur l'ordonnée de la dérivée) jusqu'à ce que le nombre ($N_{L_{maxi}}$) de « fissures potentielles » les plus grandes ou leur longueur ($L_{max i}$) soit minimum. Cet optimum existe toujours et donne une image du bruit du signal pour un x particulier. Les pics sont détectés par un algorithme (module Labview ou un autre) dont le critère principal est un seuil sur une vallée (la pente n'est pas un facteur déterminant). L'organigramme suivant illustre cette démarche.

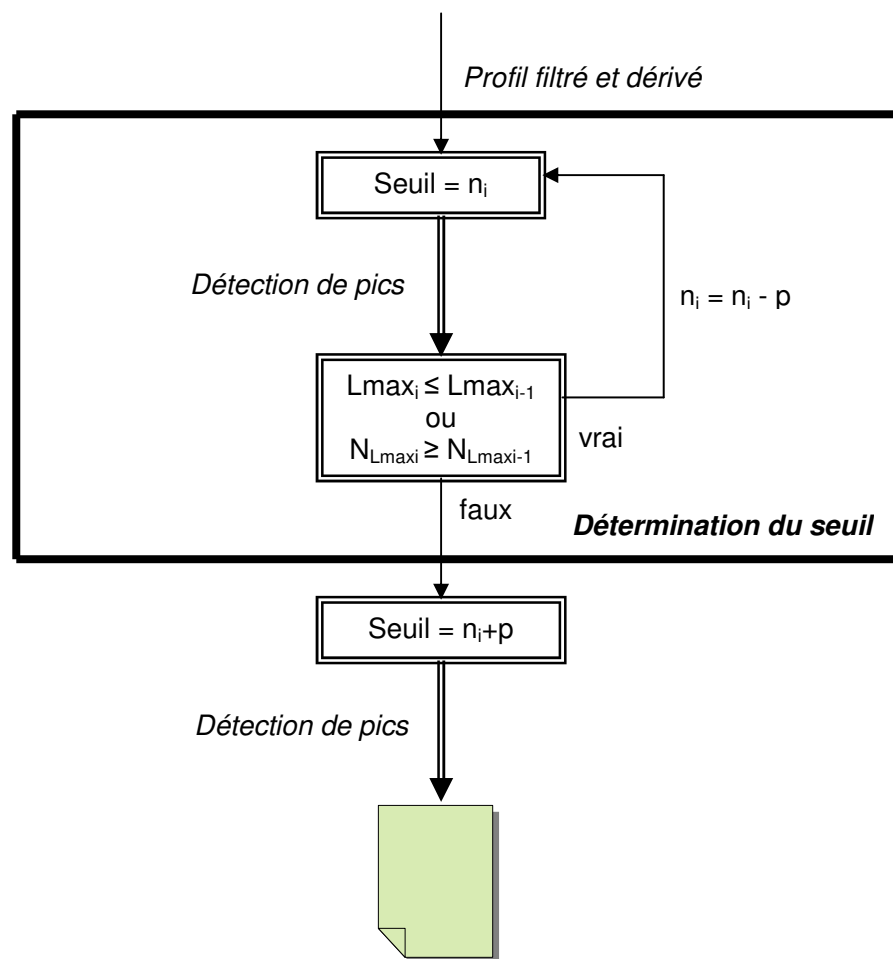


Figure 115 : Procédure de détection de pics associés à une fissure

Il suffit alors de faire parcourir à x son intervalle pour obtenir une série de distribution des fissures. Pour choisir sa valeur, nous proposons de minimiser le degré d'asymétrie de la distribution des pics réellement détectés. En effet, sur un grand nombre de mesures, si une ou plusieurs fréquences peuvent apparaître comme dominantes lorsque la fissure est quasiment périodique, il est raisonnable de penser que de part et d'autre, les occurrences sont comparables (les DSP des signaux le suggèrent). Par contre, si cette limite est trop faible, le coefficient d'asymétrie deviendra négatif, puisque beaucoup plus de pics liés au bruit de fond seront détectés. Symétriquement, si le pourcentage est trop élevé, ce sont les basses fréquences qui seront amputées causant une hausse du coefficient d'asymétrie.

Enfin, il suffit de reprendre le signal dérivé et de stocker l'abscisse consécutive pour laquelle la dérivée s'annule en changeant de signe (vallée du profil). Cette dernière étape permettrait de diminuer considérablement l'incertitude de la mesure.

1.2.2 Influence des hétérogénéités de densité sur la position des fissures avant séchage

Le Densimètre a été utilisé pour déterminer le profil de densité des échantillons partiellement séchés (environ 15% d'humidité). En toute rigueur, cet appareil fournit une mesure de la perte d'intensité du faisceau de rayons X qui est fonction de la composition atomique de la matière irradiée et donc en première approximation de la densité, du taux d'humidité et de l'épaisseur de l'échantillon analysé. Le taux d'humidité des placages a été considéré comme constant ce qui n'est pas parfaitement exact ($H\%_{moyenne}=15.05\%$; $H\%_{\text{écart type}}=2.44\%$ pour 24 placages mesurés par double pesée après séchage complet - certains essais ont été doublés). De plus, nous avons négligé la différence d'humidité entre les échantillons employés pour l'étalonnage de l'appareil et les placages ($H=12\%$) afin d'évacuer du calcul l'influence de l'humidité. Ne restent plus que les facteurs densité (noté ρ), intensité du faisceau de rayon X (noté X_{ray}) transmis et épaisseur (notée Ep) qui sont reliés suivant la formule suivante :

$$X_{ray} = \alpha \cdot \rho \cdot Ep + \beta$$

Équation 23 : Mesure de densité

où α et β sont deux constantes déduites des essais d'étalonnage

En extrayant le paramètre densité par l'intermédiaire d'une fonction logarithmique, on introduit une instabilité de la formulation lorsque l'épaisseur tend vers 0. Cette formulation convient néanmoins puisque comme nous allons le voir par la suite, le Martinomètre n'est capable de détecter des fissures que pour des placages dont l'épaisseur est supérieure ou égale à 1.3 mm dans la situation actuelle.

En tenant compte des mesures de la photodiode et des lasers, le profil de densité des placages déroulés a été estimé (moyennant les hypothèses choisies).

La Figure 116 montre les profils de la face fissurée d'un placage homogène (hêtre en 3 mm) tels qu'ils auraient été donnés par le Martinomètre à l'état saturé. Ils ont été reconstitués, soit à partir d'un coefficient unique déduit du raccourcissement du placage (0.0597 pour 15 % d'humidité à comparer à 0.057 fourni dans [GUITARD_1994]), soit en tenant compte des mesures de densité locales pour moduler ce coefficient [KOLLMAN_1984].

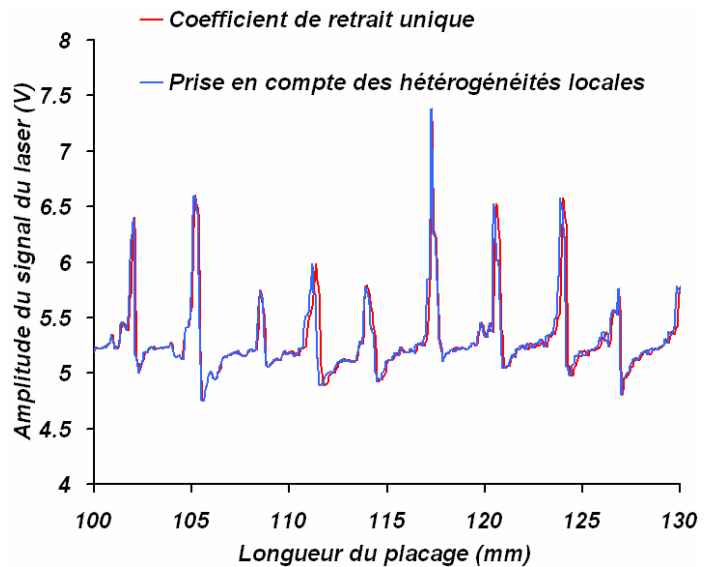


Figure 116 : Effet de la prise en compte de la densité locale pour le calcul du retrait d'un placage homogène (hêtre, essai 115)

Les différences n'apparaissent qu'à un niveau local (quelques dixièmes de mm) ce qui matérialise bien l'homogénéité des bois déroulés. La prise en compte du profil de densité réel du placage est assez lourde puisque les fréquences d'acquisition des deux systèmes sont désynchronisées (vitesses de défilement différentes). En conséquence, la solution la plus simple a été adoptée, c'est-à-dire un seul coefficient de retrait pour une densité moyenne appliqué à la valeur du taux d'humidité mesuré de chaque placage. Cette hypothèse s'accompagnera forcément de petits décalages des fissures par rapport à leur position d'origine sur le placage vert.

Il est clair que les hypothèses réductrices et les raccourcis empruntés vont limiter la précision de la mesure de la position réelle des fissures à partir du Martinomètre mais nous avons privilégié les solutions les plus simples et les plus rapides essentiellement pour des contraintes de temps. Rappelons néanmoins que l'objectif premier de ce chapitre est de mesurer la position réelle des fissures à partir d'un accéléromètre. Nous allons en aborder maintenant les principes.

2 Signature vibratoire de la fissuration

2.1 Visualisation

Une première observation à une échelle réduite des mesures vibratoires, acoustiques et des efforts a permis de comprendre et d'identifier le type de signatures associées aux fissures. Rappelons que le contexte est celui d'un déroulage à vitesse linéaire constante réalisé sans barre de pression.

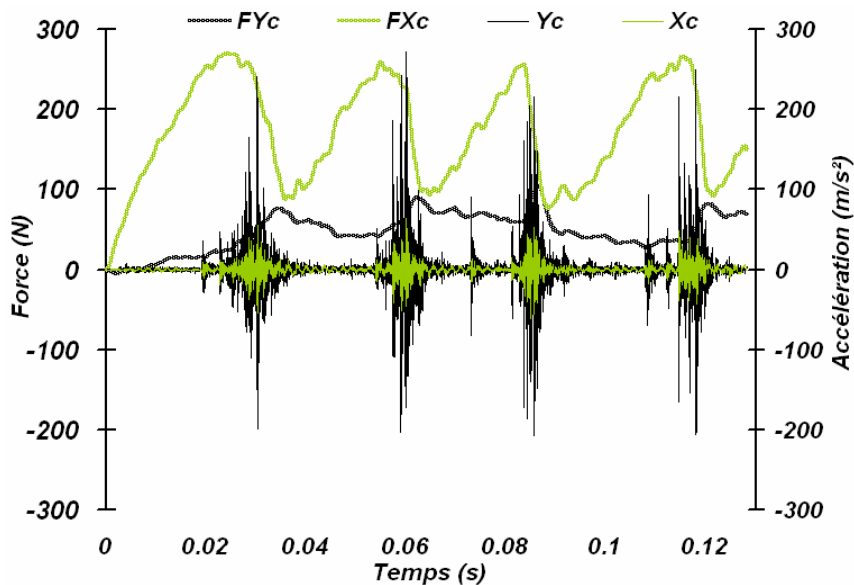


Figure 117 : Signature de la fissure sur les relevés vibratoires et dynamométriques* dans les directions X et Y (essai 114, hêtre, $V_c=0.1\text{m/s}$, $E_p=2.7\text{mm}$, sans barre de pression, outil rodé)

* : Les efforts ont été filtrés (Butterworth, $F_c=300\text{ Hz}$, ordre 3)

[KINOSHITA_1984] a observé une cyclicité de l'effort de coupe consécutive à l'ouverture des fissures. La Figure 117 présente les enregistrements des efforts et des vibrations dans les deux directions privilégiées du procédé. FX_c croît presque linéairement avec la surface du plan de cisaillement perpendiculaire à la face de coupe avant de s'effondrer lorsque la fissure s'ouvre. A cet instant, l'énergie requise pour générer le placage par cisaillement devient supérieure à celle permettant l'ouverture d'une fissure. FY_c , qui augmentait régulièrement (légère plongée de l'outil dans le bois), commence à diminuer seulement après l'ouverture de la fissure. En effet, l'outil doit dérouler un placage d'épaisseur presque nulle (cf. Figure 16), ce qui se traduit par un retour vers des conditions plus proches du refus de coupe. Cette évolution ne s'inverse que lorsque l'effort dans la direction de coupe a atteint un niveau conséquent (lié à la profondeur de passe effective). Les relevés sont parfaitement en accord avec les observations de la littérature, ce qui nous place dans les meilleures dispositions pour décrire l'évolution des mesures vibratoires et sonores (non représentées) lors de l'ouverture des fissures.

Les signaux X_c et Y_c présentent de fortes oscillations dont le maximum coïncide avec la forte baisse des efforts de coupe. Il s'agit de la signature de l'ouverture des fissures. Les niveaux atteints sur la face de dépouille sont plus élevés que dans la direction de coupe²⁸ puisque la position du capteur Y_c maximise sa sensibilité aux phénomènes vibratoires (proximité de la source et positionnement proche de la pointe de l'outil). Les profils de ces oscillations

²⁸ Rappelons que ce capteur n'est pas bien adapté à la méthode de « double mesure sur bois » (rapport des DSP) car les essais de référence retenus s'effectuent en présence de barre.

dépendent très probablement de la manière dont la fissure s'ouvre. De nombreux types, dont les plus récurrents sont présentés sur la Figure 118, ont pu être observés.

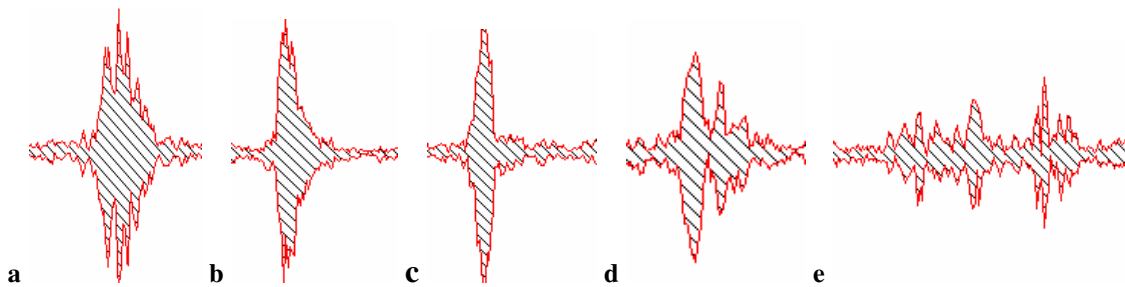


Figure 118 : Profils oscillatoires de l'ouverture de fissures selon X_c (peuplier, $E_p=3\text{mm}$, $V_c=0.5\text{m/s}$, sans barre)

Lorsque l'épaisseur est importante, une seule figure se détache en général (a, b, ou c), en particulier pour le peuplier, mais il peut arriver de rencontrer des signatures doubles voir multiples (d et e). b s'apparente à la réponse d'un système mécanique ayant subi un choc plus ou moins amorti, en général suivant une exponentielle décroissante. Dans ce contexte, où le régime de coupe est presque de type « interrompu », l'ouverture brutale de la fissure remplit ce rôle.

En première approche, l'objectif a été centré sur la détection des fissures et non la reconnaissance d'une forme particulière. Néanmoins, il serait certainement très intéressant de mieux comprendre les mécanismes à l'origine des différents faciès relevés.

2.2 Procédure de détection

La manière la plus simple de détecter la présence des pics consiste à compter le nombre de pics au-delà d'un seuil prédéfini comme l'ont fait [LEMASTER et al_1982] pour le cas des Emissions Acoustiques. Le problème de fond lié à la définition du seuil réduit gravement la polyvalence de cette approche. Nous avons donc pris le parti de travailler sur l'enveloppe du signal afin de l'épurer et de faciliter la détection des pics à l'aide d'un algorithme de construction classique.

2.2.1 Principe

Les oscillations mesurées par les accéléromètres et le microphone sont la manifestation de la libération d'énergie consécutive à l'ouverture des fissures. Le RMS est un indicateur très simple qui caractérise l'énergie d'un signal mais son calcul doit s'effectuer de manière locale pour fournir une enveloppe du signal exploitable par l'algorithme de détection de pics. La taille de la fenêtre de calcul du RMS adéquate est fonction de la durée et du nombre de pics par unité de temps. Autrement dit, elle dépend des paramètres qui conditionnent le mécanisme de fissuration lui-même, du point de vue des capteurs.

Dans ce contexte, les paramètres essentiels sont l'épaisseur et surtout la vitesse pour une essence donnée. Cela suppose la connaissance de la loi de vitesse du moteur avec précision ce qui n'est malheureusement pas le cas ici (en particulier puisque la vitesse est faible afin de limiter l'effet perturbateur des fréquences de résonance). Nous avons pu constater que l'erreur est malgré tout assez faible. En effet, l'écart entre la longueur usinée (produit de la durée de l'enregistrement par la vitesse) et la longueur déduite des mesures effectuées avec le Martinomètre (coefficient de retrait moyen proportionnel au taux d'humidité de chaque placage), n'excède pas 3.4% et sa moyenne est de 1.5%. Dans les études futures, il sera néanmoins essentiel de connaître la loi de vitesse du moteur pour mesurer la position des fissures avec certitude.

Plusieurs tailles de fenêtre ont été testées. Cela revient à chercher une résolution d'observation optimale du placage notée l . Le nombre de points contenus dans la fenêtre de calcul est déduit de l'équation suivante qui intègre le facteur vitesse de coupe :

$$nb = \frac{l \cdot f_e}{V_c} \text{ où } l : \text{longueur du placage de la fenêtre de calcul (m)}$$

f_e : fréquence d'échantillonnage

V_c : Vitesse de coupe linéaire (m/s)

Équation 24 : nombre de points retenus pour le calcul du RMS

Cette fenêtre se décale de proche en proche avec un recouvrement nul sur le placage et offre une image de l'enveloppe du signal. Afin de représenter au mieux ses spécificités, l'abscisse stockée par fenêtre est celle du maximum local. Cette procédure délivre un couple de valeurs (t_i, RMS_i) pour la « $i^{\text{ème}}$ » fenêtre.

La Figure 119 ci-contre représente le résultat du calcul du RMS local pour les 0.4 premières secondes d'un essai de déroulage de hêtre (115). Les pics détectés par l'algorithme sont également pointés. Ce dernier repose sur la technique dite du « gradient » qui consiste à comparer les pentes de part et d'autre d'un point sur une largeur définie. Tous les points (t_i, RMS_i) sont ainsi traités dans une fenêtre glissante de largeur $2 \cdot \Psi + 1$.

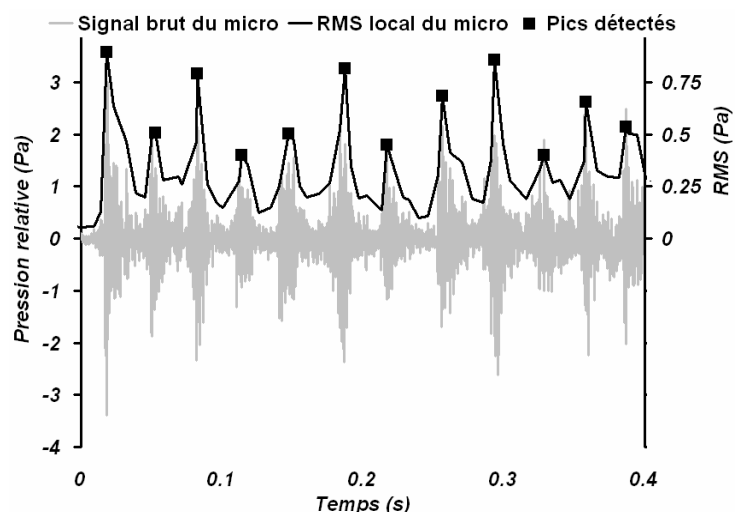


Figure 119 : Signal brut, RMS local et pics détectés pour le microphone (essai 115 : hêtre, $V_c=0.1\text{m/s}$, $Ep=2.7\text{mm}$, sans barre, outil rodé)

Cet exemple a nécessité la définition des paramètres l et Ψ qui sont liés. En effet, l'algorithme de détection de pics est optimal lorsque les points considérés pour le calcul des pentes n'appartiennent, qu'en petit nombre, au pic précédent ou au pic suivant. En fixant la résolution du moyennage, on détermine indirectement Ψ . Nous allons aborder la démarche qui a permis de déterminer des couples de variables acceptables.

2.2.2 Choix des paramètres

Lorsque l est très petite, le signal enveloppe issu du calcul du RMS présente de très nombreux pics (à la manière du signal brut). Dans le cas contraire, ils sont peu nombreux mais très larges. L'efficacité de l'algorithme de détection risque de chuter dans les deux cas de figure.

Nous avons fait le choix de lisser au maximum le signal brut c'est-à-dire de rechercher la fenêtre de calcul la plus large possible. De cette manière, le nombre de pics par fissure est minimum. Il suffit alors d'utiliser une valeur de Ψ faible pour repérer les pics (5 pour tous les calculs présentés).

Une autre option aurait pu consister au contraire à maximiser la résolution d'observation et donc le nombre de pics détectables. En fonction des objectifs, l'algorithme de détection pourrait alors conserver le pic principal par fissure (ce qui équivaut à la solution retenue) ou au contraire une série pour se rapprocher d'un type de signature de fissure particulier. Cette dernière démarche constitue selon nous, une étape ultérieure. Notre but est en effet de détecter, dans un premier temps, la position de chaque fissure sur le placage.

Pour guider le choix des valeurs de l , qui dépendent de l'épaisseur et de la vitesse pour une essence donnée, une interface, intégrant calcul du RMS local, détection des pics et affichage du résultat, a été développée. Un exemple d'application est présenté sur la figure suivante.

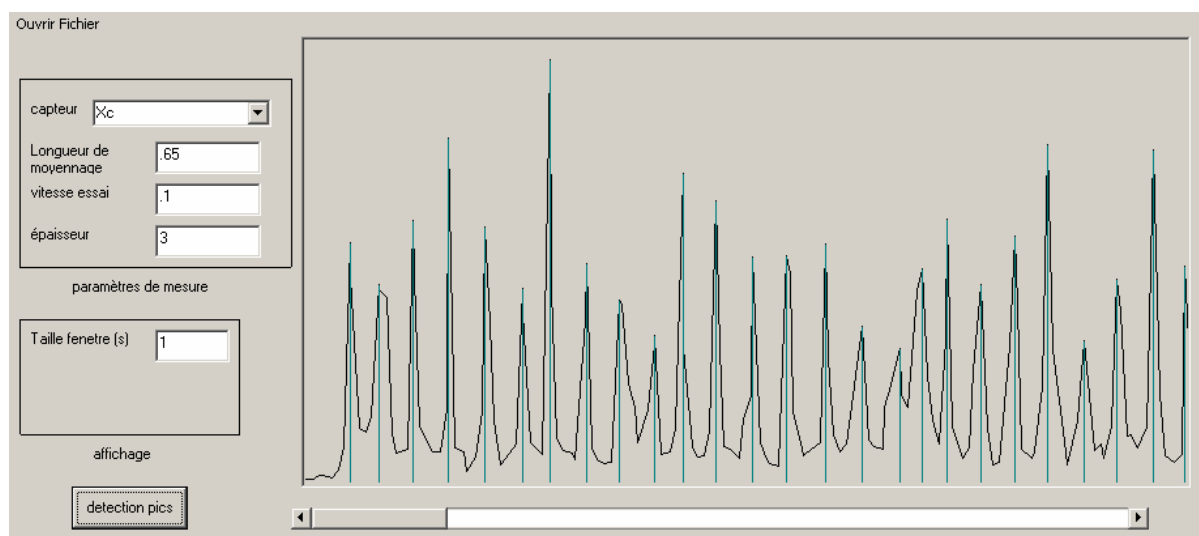


Figure 120 : Interface d'aide au choix des paramètres l et Ψ (5) de détection des fissures

— RMS local — Pics détectées par l'algorithme

Le petit nombre d'essais nous autorise une détermination d'un optimum pour l au cas par cas.

La Figure 121 représente les valeurs choisies pour l en fonction de l'épaisseur du placage déroulé pour les essais 108 à 125. Elles sont proportionnelles à l'épaisseur. Nous verrons que cela n'a rien de surprenant puisque les fréquences moyennes d'apparition des fissures sont elles-mêmes assez bien décrites par une relation linéaire à l'épaisseur du placage.

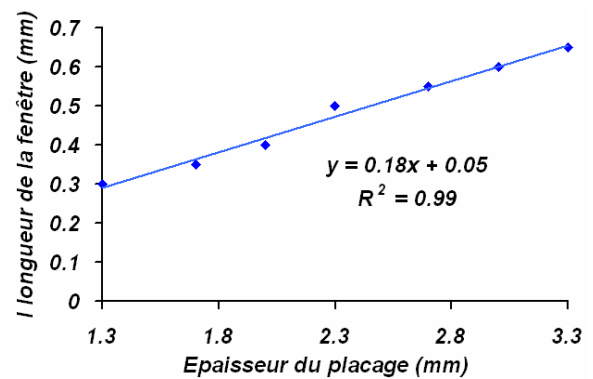


Figure 121 : Détermination d'un optimum pour l en fonction de l'épaisseur déroulée (essai 108-125).

Le couple (l, Ψ) déterminé, il ne reste plus qu'à appliquer la procédure aux signaux acoustiques et vibratoires. Les positions des pics détectés peuvent alors être comparés à ceux obtenus à partir des relevés du Martinomètre.

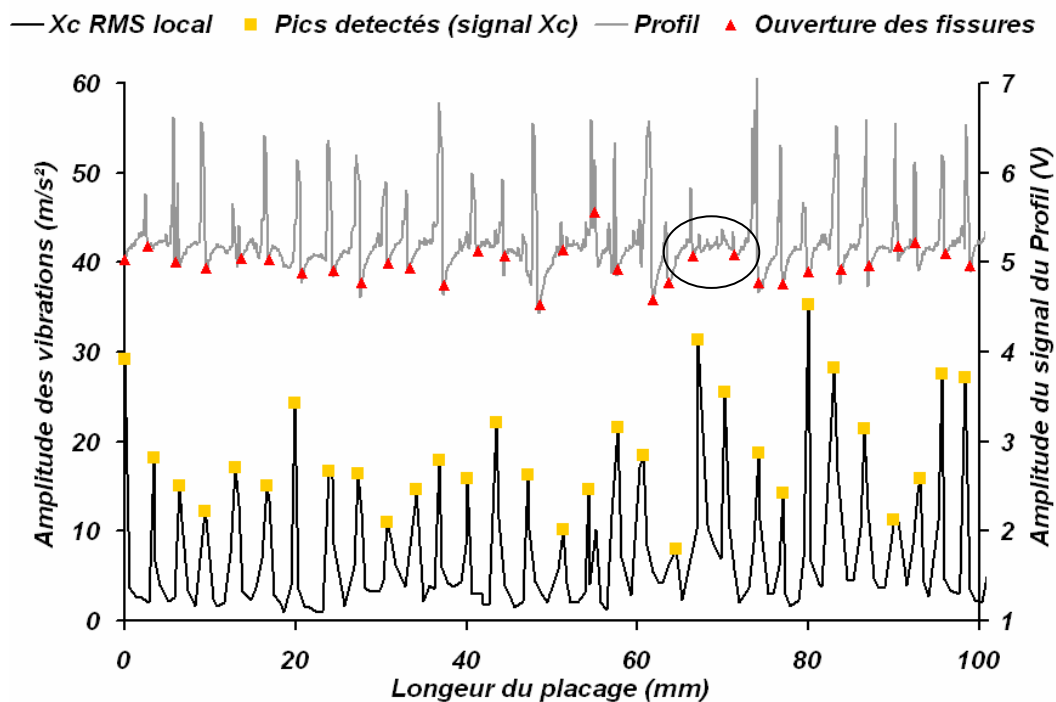


Figure 122 : Mesure de la position de chaque fissure à partir du profil relevé par le laser du Martinomètre et du signal lissé de Xc sur 100 mm d'un placage de hêtre de 3 mm d'épaisseur (essai 115).

Les deux méthodes sont satisfaisantes et correspondent très bien pour ce placage où les fissures sont bien marquées. On peut cependant remarquer que la démarche utilisée pour détecter les fissures à partir des mesures du Martinomètre peut être optimisée. De plus, la méthode de mesure elle-même risque de sous-estimer le nombre réel de fissures. La zone cerclée sur le graphique précédent est assez révélatrice des limites d'une mesure ponctuelle effectuée avec le laser. Dans ce cas précis, l'algorithme parvient à isoler un pic synonyme de l'ouverture d'une

fissure mais le profil est assez peu explicite. En effet, les fissures ne sont pas toujours parfaitement ouvertes et la présence de quelques fibres qui relient les deux lèvres de la fissure risque fort de rendre leur détection difficile. En revanche, en utilisant un profilomètre laser, les chances d’y parvenir sont nettement accrues.

Le lissage des signaux par le calcul du RMS local est très efficace et permet d’utiliser un algorithme de détection de pic très simple (pentes comme seul critère). Aucun critère sur le niveau du signal n’a été nécessaire jusqu’ici, ce qui confère à la démarche une bonne polyvalence.

La méthode est également performante pour l’accéléromètre Yc et même le microphone, en forte épaisseur au moins (cf. Figure 119). Le Tableau 25 présente les rapports des amplitudes moyennes des pics détectés pour chaque capteur sur le RMS moyen des signaux temporels associés. Ce rapport peut être considéré comme un indicateur du ratio signal sur bruit. Il est plus élevé pour le hêtre que pour le peuplier, ce qui correspond bien à l’effet de la densité en première approximation, déjà mis en évidence lors des analyses temporelles et fréquentielles. De plus, il augmente linéairement avec l’épaisseur déroulée comme l’intensité de la fissuration.

Ce ratio est également plus faible pour le microphone que pour les accéléromètres. En effet, le microphone s’est révélé capable de détecter l’ouverture des fissures dans le domaine spectral principalement en employant un signal de référence, ce qui n’est pas le cas ici. En revanche, la sensibilité naturelle de Yc, due à sa position pour l’essentiel, n’est pas affectée par l’utilisation d’un signal de référence obtenu pour un taux de compression de la barre non nul.

Epaisseur (mm)		1.3	1.7	2	2.3	2.7	3	3.3	r ²
hêtre	Xc	1.484	1.593	1.640	1.678	1.694	1.713	1.832	0.916
	Yc	1.585	1.636	1.653	1.711	1.751	1.779	1.906	0.932
	Microphone	1.259	1.295	1.326	1.363	1.420	1.430	1.512	0.973
peuplier	Xc	1.329	1.441	1.458	1.456	1.478	1.723	1.805	0.821
	Yc	1.384	1.525	1.528	1.531	1.572	1.808	1.874	0.850
	Microphone	1.207	1.248	1.238	1.250	1.179	1.338	1.379	0.459

Tableau 25 : Rapport de la moyenne de l’amplitude des pics sur le niveau RMS du signal associé pour Xc, Yc, et le micro en fonction de l’essence et de l’épaisseur déroulée.

Quoi qu’il en soit, les valeurs de ces ratios pour les trois capteurs confirment une bonne aptitude à la détection de l’ouverture des fissures et donc de la position de chacune d’entre elles. La démarche de détection des pics a été appliquée à l’échantillonnage de placages sélectionnés (essai 108-125) et comparée aux mesures déduites du Martinomètre.

2.3 Caractérisation des placages

La Figure 123 présente les distances moyennes inter-fissures tirées des mesures acoustique, vibratoires et du Martinomètre en fonction de l’essence et de l’épaisseur déroulée.

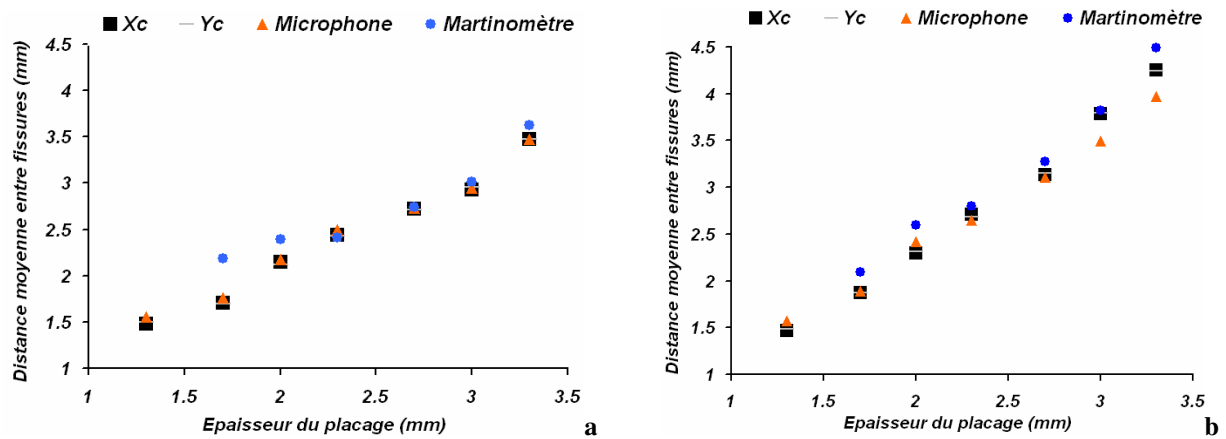


Figure 123 : Distance moyenne entre deux fissures consécutives mesurée à partir des signaux de Xc, de Yc, du micro ou du Martinomètre en fonction de l'épaisseur déroulée pour le cas du hêtre (a) et du peuplier (b)

Le Tableau 26 précise les coefficients des régressions linéaires associées à la figure précédente.

	<i>Hêtre</i>		<i>Peuplier</i>	
	Régression linéaire	r ²	Régression linéaire	r ²
<i>Xc</i>	$Y=0.963 t + 0.172$	0.982	$Y=1.397 t - 0.446$	0.990
<i>Yc</i>	$Y=0.966 t + 0.163$	0.983	$Y=1.391 t - 0.446$	0.990
<i>Microphone</i>	$Y=0.930 t + 0.282$	0.980	$Y=1.189 t - 0.040$	0.992
<i>Martinomètre</i>	$Y=0.824 t + 0.669$	0.901	$Y=1.416 t - 0.294$	0.975

Tableau 26 : Régression linéaires associées aux distances entre fissures par essence selon les moyens de mesure retenus (Xc, Yc ou micro et Martinomètre) pour les essais 108 à 125.

Les mesures issues du profil du laser du Martinomètre surestiment la distance moyenne entre les fissures comme on l'avait craint. Le phénomène est encore plus marqué en faible épaisseur. Ainsi, la mesure obtenue pour les placages de 1.3 mm d'épaisseur n'est pas représentée puisqu'elle n'a pas de sens physique. En revanche, les mesures des accéléromètres sont pratiquement confondues. Enfin, les résultats émanant du microphone sont un peu plus aléatoires mais restent exploitables.

Les fréquences moyennes de fissuration sont donc assez bien décrites par un modèle linéaire fonction de l'épaisseur. Les pentes des régressions suggèrent une croissance plus rapide de la distance inter-fissures avec l'épaisseur pour le peuplier ce qui correspond aux mesures des fréquences de fissuration moyennes obtenues à partir des placages ou des DSP. De plus, la différence de signe des ordonnées aux origines des deux essences matérialise bien le fait que la limite d'apparition des fissures en fonction de l'épaisseur est plus précoce pour le hêtre (effet densité). Ces résultats confirment les principales observations de la littérature.

3 Conclusion : Vers une mesure du taux de fissuration

Avant de juger des performances de cette approche, il faut la replacer dans son contexte (déroulages réalisés sans barre de pression et pour une vitesse de coupe très lente). Les résultats

restent néanmoins très encourageants. En suivant cette démarche, il est possible de mesurer, avec une précision définie par la largeur de la fenêtre de calcul, la position effective des fissures le long du placage. De plus, aucun seuillage n'a été utilisé pour ces essais où la fissuration est présente sur toute la longueur du placage. En revanche, dans le cas de fissures localisées sur certaines portions du copeau, il serait nécessaire de définir une limite inférieure (à partir du ratio amplitude des pics sur RMS total par exemple) puisque le simple algorithme de détection de pics utilisé risquerait d'identifier des fissures qui n'en sont pas.

Il faudrait également tester les performances de la démarche dans des conditions moins favorables (vitesse plus élevée et taux de compression non nul en particulier). Cette méthode constitue un premier pas vers un outil de mesure assez précis de la fissuration du placage utilisable directement sur les sites de production ou en laboratoire.

Conclusion générale et perspectives

Cette étude n'est qu'une première étape vers la mise au point d'une commande adaptative du déroulage. Elle a permis de mettre à jour certaines propriétés des signaux acoustiques et vibratoires dans le cas de bois homogènes et sans singularité spécifique, afin d'orienter les recherches futures.

1 Le suivi de la qualité du placage déroulé

1.1 La fissuration cyclique du placage

Le mécanisme d'ouverture des fissures de déroulage laisse une signature mesurable en utilisant un microphone ou un accéléromètre placé dans les directions d'avance ou de coupe ou encore. D'un point de vue pratique :

- Le calcul du Kurtosis des mesures vibratoires permet de détecter l'apparition de fissures. Un Kurtosis nettement supérieur à 3 signale la présence d'un phénomène non stationnaire qui correspond au mécanisme de fissuration pour cet échantillonnage. Afin d'évaluer ses capacités à être utilisé sur les sites de production, il est nécessaire de vérifier ses performances dans des conditions moins favorables dont en particulier sa sensibilité au taux de pression employé (nombre d'essais trop faibles dans notre cas pour conclure), à l'hétérogénéité de l'essence et aux singularités telles que les nœuds.

- L'analyse d'enveloppe, le calcul des DSP, l'analyse en bandes d'octave ou l'emploi de la fonction de cohérence permettent de mesurer la fréquence moyenne de fissuration. Néanmoins, leurs faibles sensibilités ne s'adaptent pas aux contraintes des fabricants de placages.

- Le rapport de deux DSP (signal en cours sur un enregistrement effectué dans de bonnes conditions de coupe du point de vue de la fissuration) permet de faire émerger la fréquence moyenne d'apparition des fissures. L'usage d'un taux de compression élevé pour générer un signal de référence est simple et efficace pour le microphone et surtout pour l'accéléromètre dans la direction de coupe mais assez défavorable si l'accéléromètre se situe sur la face de dépouille (phénomène de sur-épaisseur). Il suffit alors d'utiliser un système de détection de pics assez rudimentaire pour donner une information immédiate et simple à l'opérateur. Cette méthode est compatible avec le temps réel compte tenu des capacités des ordinateurs aujourd'hui.

- Une procédure de mesure de la position réelle de chaque fissure a été proposée à partir d'un calcul local du RMS des signaux du microphone, mais surtout des accéléromètres, combiné à un algorithme de détection de pics. Cet outil nécessite encore des améliorations

avant d'envisager un usage dans le monde industriel mais il constitue une base pour le développement d'un système simple et peu coûteux.

La méthode qui consiste à calculer le rapport des DSP s'est révélée efficace dans les conditions de l'étude. Elle a été employée pour apporter ou initier une réponse à des observations contradictoires de la littérature sur le mécanisme de fissuration des placages. En particulier :

- la vitesse de coupe a tendance à favoriser l'ouverture des fissures (plus nombreuses par mètre de placage).
- la valeur de l'angle de dépouille (comprise entre -1 et 1°) n'influence pas, de manière significative, l'apparition des fissures.
- Le taux de compression de la barre limite la fréquence d'ouverture des fissures d'autant plus clairement qu'il est intense.

Pour fournir une information complète au fabricant, il est aussi nécessaire de connaître la profondeur des fissures. Nous avons montré que la seule connaissance de la fréquence d'apparition des fissures ne permet pas d'établir ce lien, de façon fiable, en l'absence de barre, pour un placage d'épaisseur constante. Il serait bon de reconduire ces observations pour des placages produits avec différents taux de compression puisque les mesures vibratoires suggèrent une interaction entre profondeur et fréquence en fonction du taux de compression.

1.2 Variations d'épaisseur

Les capteurs employés semblent sensibles aux variations d'épaisseur rapides comme les arrachements mesurés sur des échantillons de hêtre déroulés à température ambiante. En revanche, même les variations d'épaisseur relativement importantes introduites par l'action de la barre de pression sont délicates à détecter. L'analyse temps-fréquence suggère la possibilité de suivre plutôt le phénomène de sur-épaisseur du billon.

2 Comportement vibratoire et paramètres de coupe

A partir des essais menés sur la microdérouleuse, nous avons pu expliciter les tendances les plus significatives liant les signaux vibratoires et acoustiques aux paramètres et aux réglages couramment employés :

- La valeur de l'angle de dépouille. Le niveau vibratoire d'un accéléromètre placé sur la face de dépouille augmente avec la valeur de l'angle de dépouille. Ce phénomène s'explique principalement par les interactions outil/disque. Ce dernier joue le rôle d'un amortisseur des vibrations. Cette caractéristique ouvre des possibilités intéressantes dans le suivi du procédé. Rappelons en effet que dans l'industrie, les opérateurs utilisent un angle de dépouille décroissant au cours du déroulage notamment pour limiter les vibrations lorsque le diamètre du

billon devient faible. Il serait utile d'étudier l'évolution du niveau vibratoire pour des angles de dépouille supérieurs à ceux que nous avons employés (1°) afin de mieux cerner la signature vibratoire de la valeur de cet angle.

➤ L'usure. Elle s'accompagne d'une baisse plus ou moins régulière du niveau vibratoire sur une large bande fréquentielle. Nous n'avons pas retrouvé la courbe caractéristique obtenue par [LIM_1995] dans l'usinage des métaux ou par [LEMASTER et al (b)_2000] pour le défonçage du bois. L'usure de l'arête de l'outil se caractérise par un élargissement de son rayon de bec assimilable à une diminution de la valeur effective de l'angle de dépouille. On retrouve clairement l'incidence du talonnage du couteau dû à l'usure de l'outil sur les mesures vibratoires dans la direction d'avance.

Les niveaux des vibrations dans la direction de coupe ne sont pas significativement influencés par la valeur de l'angle de dépouille mais diminuent également avec l'usure. Le changement de mécanisme de formation du copeau (apparition de l'effet Horner) est sans doute à l'origine de cette tendance.

➤ La barre de pression. Plus le taux de compression est intense et plus les niveaux des relevés acoustiques et vibratoires (en particulier de l'outil) diminuent et ce, même lorsque qu'aucune fissure n'est décelable sur le placage. Cette dernière remarque doit être considérée avec réserve puisqu'elle est le fruit d'un échantillonnage restreint de mesures.

➤ L'essence. Dans le contexte expérimental adopté, les effets de la densité, de l'orientation du plan de coupe et de « l'hétérogénéité » du matériau (principalement attribuable à la présence de gros rayons ligneux dans le cas du hêtre) concourent à la mesure de niveaux vibratoires et de pression sonore élevés et variables.

➤ La vitesse de coupe. C'est le facteur le plus influent qu'il s'agisse de mesures acoustiques ou vibratoires. Une vitesse de coupe élevée s'accompagne d'une forte dissipation d'énergie dans la zone de coupe. Lorsque la vitesse de coupe linéaire est constante, ce qui est le cas général dans l'industrie, le mécanisme de formation du copeau est stable toute chose égale par ailleurs. Il est envisageable d'intégrer son effet dans les modèles et les règles de décisions employés pour suivre l'évolution du procédé. En revanche, il semble bien compliqué de tenter une telle démarche sur les machines, souvent anciennes, qui ne permettent pas un tel régime de fonctionnement.

3 Perspectives

On se rend compte qu'il reste beaucoup à faire avant d'envisager de bâtir un asservissement ou même un retour d'informations utilisables par l'opérateur. En particulier, le ciblage des conditions expérimentales choisies a proscrit l'analyse de paramètres clés du procédé concernant :

➤ Les caractéristiques du bois (hétérogénéités de densité, teneur et répartition en eau dans le bois, présence de bois juvénile ou de bois de réaction,...).

➤ Les conditions de déroulage (température d'étuvage, homogénéité de la chauffe, interaction diamètre du billon et vitesse de coupe qui nécessitera probablement un ré-échantillonnage cyclostationnaire des mesures,...)

De plus, tous les résultats avancés doivent être validés par des essais conduits sur une machine de type industriel. En particulier, concernant :

➤ La fissuration. Son mécanisme, déjà fortement influencé par la nature du plan ligneux pour un disque, sera beaucoup plus délicat à mesurer sur un billon. L'ouverture des fissures risque d'être décalée dans le temps du point de vue des capteurs en fonction du fil du bois. Mais l'enjeu est de taille puisque, d'après les essais préliminaires conduits dans des conditions bien maîtrisées, la méthode qui consiste à calculer le rapport des DSP du signal d'un accéléromètre, placé dans la direction de coupe, permet d'envisager un ajustement du taux de compression de la barre en temps réel. Rappelons qu'aujourd'hui, la plupart des dérouleuses sont équipées d'axes numérisés.

Il semble également indispensable d'éclaircir l'influence d'un taux de compression exagérément élevé sur les niveaux des mesures puisque ce point pourrait annihiler la possibilité d'ajuster en ligne le taux de compression.

➤ Les variations d'épaisseur. Nos tentatives pour les mesurer à partir de données acoustiques et vibratoires ont partiellement échouées. Cela ne signifie pas que cette approche soit condamnée. En effet, en voulant soigner la mesure, le fait d'avoir utilisé un outil très court a peut-être exagérément réduit la signature des variations d'épaisseur. Le waterfall suivant a été obtenu lors du déroulage d'un billon d'okoumé (600 mm de longueur) à l'aide de la dérouleuse semi-industrielle du LABOMAP.

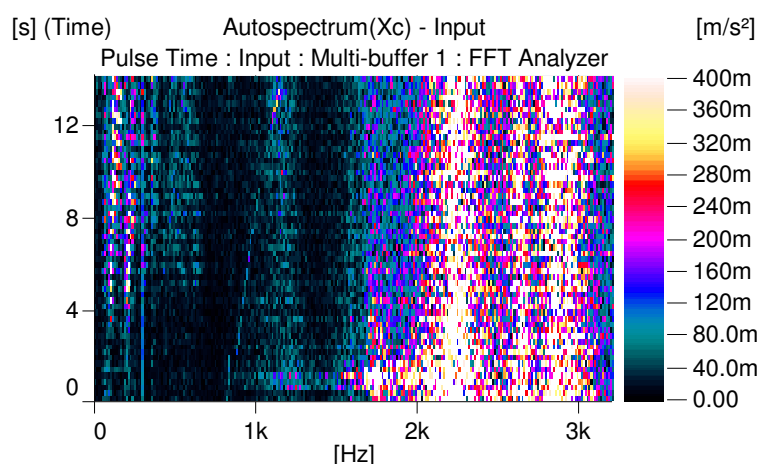


Figure 124 : Waterfall du signal d'un accéléromètre fixé sous le couteau d'une dérouleuse semi-industrielle

Les fortes vibrations basses fréquences qui émergent 4 secondes après le début de l'enregistrement sont la signature de variations d'épaisseur. L'utilisation d'une machine de type industrielle constitue donc la prochaine étape.

Références Bibliographiques

1. O.B.ABOUELATTA, J.MADL_2001, *Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations*, Journal of Materials Processing Technology 118 (1-3), pp. 269-277.
2. J.ANTONI, J.DANIERE, F.GUIELLET_2002, *Effective vibration analysis of IC engines using cyclostationarity. Part I - A methodology for condition monitoring*, Journal of Sound and Vibration 257 (5), pp. 815-837.
3. J.ANTONI, F.BONNARDOT, A.RAAD, M.EL BADAOUI_2004, *Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals*, Mechanical Systems and Signal Processing 18 (6), pp. 1285-1314.
4. J.ANTONI_2004, *Robust Separation of Vibration Components using the Short-Time Fourier Transform*, Electronic Proceedings of the 5th international symposium of Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, 11-13th October, CETIM, Senslis (France), 17 p.
5. J.ANTONI_2006, *The spectral kurtosis: Application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines*, Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2), pp. 308-331.
6. A.G.ATKINS_2005, *Toughness and cutting: a new way of simultaneously determining ductile fracture and strength*, Engineering fracture mechanics, 72, pp. 849-860.
7. E.BADEL, P.PERRE_2005, *L'eau dans le matériau bois : Conséquences sur une propriété technologique; le retrait*, Journée Scientifiques et Techniques 2005, <http://www.nancy.inra.fr/extranet/com/jst2005/savoir.htm>
8. S.BARDET, J.BEAUCHÊNE, B.THIBAUT_2003, *Influence of basic density and temperature on mechanical properties perpendicular to grain of ten wood tropical species*, Annals of Forest Sciences 60, pp. 49-59.
9. J.BEAUCHÊNE_1996, *Evolution du comportement du bois vert avec la température- Application à l'étude du déroulage de quelques bois guyanais*, Thèse de Doctorat de l'ENGREF, 155 p.
10. J.BEAUCHÊNE, B.THIBAUT_1996, *Influence de la température sur le comportement mécanique du bois vert : application à l'étuvage d'essences guyanaises*, 4^{ème} colloque Sciences et Industries du Bois, 11-13 septembre Nancy, pp 299-306.
11. P.BEER_1988, *Etude de l'influence des modifications de la surface d l'outil sur la qualité de la coupe par déroulage*, Thèse de Doctorat de l'ENSAM et du WTD SGGW Varsovie, Cluny, 95 p.
12. M.BELLANGER_2004, *Traitement numérique du signal : théorie et pratique*, 7^{ème} édition, DUNOD, ISBN : 2-10-048634-9, 482 p.
13. F.BERGER, F.LECLERCQ_2001, *Etude acoustique et vibratoire du déroulage de bois*, Projet de Fin d'Etude, ENSAM, Cluny, 49 p.
14. V.BONIN_2006, *Modélisation analytique de la formation du copeau durant le procédé de déroulage du bois de hêtre*, Thèse de Doctorat de l'ENSAM, Cluny, 284 p.
15. A.BOULENGER, C.PACHAUD_1995, *Surveillance des machines par analyse des vibrations : du dépistage au risque*, AFNOR, ISBN : 2-12-309012-3, 215 p.
16. J.C.BOULLLOUD_1972 : *Recherches sur le déroulage au Centre Technique Forestier Tropical (C.T.F.T)*. Revue Bois et tropiques. N°142.

17. C.BREGANT, C.JAEGLE_1997, *Détermination des paramètres d'étuvage pour le déroulage industriel du Douglas*, Projet de fin d'étude ENSAM, Cluny, 52 p.
18. J.C.BUTAUD_1994, *Conception d'une microdérouleuse instrumentée*, Mémoire de diplôme d'ingénieur CNAM, 71 p.
19. J.CHARLEY, G.BODOVILLE, G.DEGALLAIX_2001, *Analysis of braking noise and vibration measurements by time-frequency approaches*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 215 (12), pp. 1381-1400.
20. R.Y.CHIOU, Y.K.KWON, S.Y.LIANG_1999, *RMS characteristics of acceleration and force signals depending on tool wear in stable cutting*, American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division (10), pp. 621-627.
21. H.A.CORE, W.A.COTE, A.C.DAY_1979, *Wood. Structure and identification*, 2nd edition, Syracuse University Press, 182 p.
22. C.DAI, G.ETROUGHTON, B.J.WANG_2003, *Development of a new incising technology for plywood/LVL production: part I. Incising at the lathe and its effects on veneer quality and recovery*, Forest Product Journal, 53 (3), pp. 73-79.
23. C.DAI_2004, *Incising nosebar: a technology for plywood and Laminated Veneer Lumber (LVL) manufacturing*, Proceedings of the 1st International Symposium "Veneer Processing and Products", Dompierre-les-Ormes/Cluny-France, May 6-7, pp. 92-96.
24. C.DECÈS-PETIT_1996, *Etude des phases transitoires au cours du déroulage de bois*, Thèse de Doctorat de l'ENSAM, Cluny, 120 p.
25. D.DECLERCQ, A. QUINQUIS_1996, *Le filtrage des signaux*, HERMES, ISBN : 2-86601-551-7 code 555, 110 p.
26. T.DELIO, J.TLUSTY, S.SMITH_1992, *Use of audio signals for chatter detection and control*, Journal of engineering for industry, 114 (2), pp. 146-157.
27. LE.DENAUD, L.BLERON, R.MARCHAL, R.COLLET_2002. *Contribution to the vibro-acoustic analysis of wood peeling process in view to develop an on-line control process*, 3rd International Conference Wood Science and Engineering (ICWSE-3), November 20-22th, Brasov, Romania, pp. 113-122.
28. LE.DENAUD, A.TIXIER, L.BLERON, R.MARCHAL_2003. *Analyse vibratoire et acoustique d'une opération de déroulage*, Annales des 6^{èmes} Journées Scientifiques de la Forêt et du Bois, Epinal, 3-5 juin 2003, pp. 159-166.
29. S.DEVILLARD et D.POTIN_1996, *Conception d'un test mécanique de classement des placages*, Projet Interaction Matériau/Procédé, deuxième année de l'ENSAM, Cluny, 19 p.
30. D.E.DIMLA Sr, P.M.LISTER_2000, *On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (5), pp. 739-768.
31. D.E.DIMLA Sr_2000, *Sensors signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations_a review of methods*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 40 (8), pp. 1073-1098.
32. M.A.DJOUADI, P.BEER, R.MARCHAL, A.SOKOLOWSKA, M.LAMBERTIN, W.PRECHT, C.NOUVEAU_1999, *Antiabrasive coatings: application for wood processing*, Surface and Coatings Technology 116-119, pp. 508-516.
33. W.DONG, Y.H. JOE AU, A.MARDAPITTAS_1992, *Machine toll chatter monitoring by coherence analysis*, International Journal of Production Research 30 (8), pp.1901-1924.

34. J.P.DRON, BOLAERS.F, L.RASOLOFONDRAIBE_2002, *Improvement of the sensitivity of the scalar indicators (crest factor, kurtosis) using a de-noising method by spectral subtraction: Application to the detection of defects in ball bearings*, Journal of Sound and Vibration 270 (1-2), pp. 61-73.
35. D.DYER, R.M.STEWART_1978, *Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis*, Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, 100 (2), pp 229-235.
36. T.I.EL-WARDANY, D.GAO, M.A.ELBESTA_1996, *Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 36 (6), pp. 687-711.
37. O.FEIHL_1986, *Venner cutting manual*, Forintek Canada Corp, Special publication SP 510, ISBN 0-86488-507-1, 266 p.
38. O.FEIHL, M.V.CARROL_1969. *The Floating Bar, a new approach to veneer cutting*, Forest Product Journal 19 (10), pp. 28-32
39. J.FONDRONNIER, J.GUILLERM_1979, *Technologie du déroulage*, Cahier du Centre Technique du Bois, ISSN 0528-4937, 64 p.
40. N.C.FRANZ_1958, *An analysis of the wood cutting process*, Université du Michigan, 148 p.
41. K.R.FYFE, E.D.S.MUNK_1997, *Analysis of computed order tracking*, Mechanical Systems and Signal Processing 11 (2), pp. 187-202.
42. G.GELLE, M.COLAS, G.DELAUNAY_1999, *Blind sources separation applied to rotating machines monitoring by acoustical and vibrations analysis*, Mechanical System and Signal Processing 14(3), pp. 427-442.
43. C.C.GERHARDS_1982, *Effects of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects*, Wood and Fiber 14 (1), pp 4-36.
44. D.GUITARD_1987, *Mécanique du matériau bois et composites*, Cepadues-Edition, ISSN 0768.2271., 238 p.
45. D.GUITARD_1994, *Le bois matériau d'ingénierie, Chap. III : Comportement mécanique du bois*, ARBOLOR NANCY, pp. 91-122.
46. O.G.GUSTAFSSON, T.TALLIAN_1962, *Detection of damage in assembled rolling element bearings*, ASLE Transactions (5) pp. 197-209.
47. R.B.W.HENG, M.J.M.NOR_1998, *Statistical analysis of sound and vibration signals for monitoring rolling element bearing condition*, Applied Acoustics 53 (1-3), pp. 211-226.
48. R.B.HOADLEY_1962, *Dynamic Equilibrium in veneer cutting*, Forest Product Journal, 12 (3), pp. 116-123.
49. F.HONARVAR, H.R.MARTIN_1997, *New statistical moments for diagnostics of rolling element bearings*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME 119 (3), pp. 425-432.
50. L.HUANG, J.C.CHEN_2001, *A multiple regression model to predict in-process surface roughness in turning operation via accelerometer*, Journal of Industrial Technology 17 (2), 8 p.
51. P.ISKRA, C.TANAKA_2005, *The influence of wood fiber direction, feed rate, and cutting width on sound intensity during routing*, Holz as Roh – und Werkstoff 63 (3), pp. 167-172.
52. E.JANTUNEN, H.JOKINEN_1996, *Automated On-line Diagnosis of Cutting Tool Condition (Second version)*, International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing, 4 (3-4), pp. 273-287.

53. E.JANTUNEN_2002, *A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture (42), pp. 997-1010.
54. M.EL JAZOULI, O.NAJARI_2003, *Automatisation d'une micro dérouleuse de bois instrumentée*, Rapport de Projet de Fin d'étude d'ingénieur Art et Métiers Meknès, ENSAM, Cluny, 70 p.
55. R.KELLER_1994, *La constitution du bois, Chap. I : Comportement mécanique du bois*, ARBOLOR NANCY, pp. 13-51.
56. N.KINOSHITA_1983, *Analysis of the Veneer formation Process*, Lathe check formation process and cutting force in veneer cutting, J.J.W.R.S, 29 (12) pp. 871-876.
57. J.KOBAYASHI, E.S.BAKAR, T.TOCHIGI, H. FUKUI_1995, *Veneer Cutting with a Floating Bar V : a slanted-loading floating bar*, Mokuzai Gakkaishi 41 (10) : pp. 895-902.
58. F.KOLLMANN, W. COTE_1984, *Principles of wood Science and Technology*, Volume I : solid wood, reprint Springer-Verlag, 592 p.
59. J.KOPAC, S.SALI_2001_ *Tool wear monitoring during turning process*, Journal of Materials Processing Technology (113), pp. 312-316.
60. Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, UMR 5508_2002, *Mécanique de l'arbre et du bois*, Rapport d'activité 1999-2002, 34 p.
61. G.H.LIM_1995, *Tool-wear monitoring in machine turning*, Journal of Materials Processing Technology 51 (1-4), pp. 25-36.
62. R.L.LEMASTER, B.E.KLAMACKI, D.A.DORNFELD_1982, *Analysis of Acoustic Emission in Slow Speed Wood Cutting*, Wood science 15 (2), pp. 150-160.
63. R.L.LEMASTER, K.KATO_1991, *Generation of Acoustic Emission during chip formation*, présenté lors du 10^{ème} International Wood Machining Seminar, octobre, pp. 146-151.
64. R.L.LEMASTER, L.LU, S.JACKSON_2000 (a), *The use of process monitoring techniques on a CNC wood router – Part 1. Sensor selection*, Forest Product Journal 50(7/8), pp. 31-38.
65. R.L.LEMASTER, L.LU, S.JACKSON_2000 (b), *The use of process monitoring techniques on a CNC wood router – Part 2. Use of a vibration accelerometer to monitor tool wear and work piece quality*. Forest Product Journal. 50 (9), pp. 59-64.
66. L.LENEY_1960, *Mechanism of veneer formation at the cellular level*, Bulletin de recherche, Université du Missouri, 111 p.
67. X.Q.LI, Y.S.WONG, A.Y.C.NEE_1997, *Tool wear and chatter detection using the coherence function of two crossed accelerations*, International Journal of Machine Tools and Manufacture 37 (4), pp. 425-435.
68. M.C.LU, JR.E.KANNATEY-ASIBU_2004, *Flank wear and process characteristic effect on system dynamics in turning*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME 126 (1), pp. 131-140.
69. J.F.LUTZ_1974, *Techniques for Peeling, Slicing and Drying veneer*, FPL Madison Report n° 228.
70. W.M.McKENZIE_1961, *Fundamental Aspects of Wood cutting process*, Thèse de Doctorat, Université du Michigan.
71. W.M.McKENZIE, H.KARPOVICH_1968, *The frictional behaviour of wood*, Wood Science and Technology, (2), pp. 139-152.

72. R.MARCHAL_1989, *Valorisation par tranchage et déroulage des bois de chênes méditerranéens (Quercus ilex, Quercus pubescens, Quercus suber)*, Thèse de Doctorat de l'INPL, Nancy, 294 p.
73. R.MARCHAL, M.NEGRI, C.DECES-PETIT_1996, *La coupe du bois par déroulage : vers une commande adaptative*, Journée PRIMECA, Ecole Centrale de Nantes, pp. 23-30.
74. R.MARCHAL, F.MESSI N'DONGO_1998, *Peeling process : Contribution to the elaboration of a tool-monitoring model to develop an adaptive control*, 12 Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Drewna SGGW-Innowacyjność badań w przemyśle I nauce, Varsovie 17_18 novembre, pp. 347-358.
75. R.MARCHAL, C.DAI, B. Wang_2000, *La surveillance du déroulage par analyse acoustique et vibratoire : Résultats préliminaires*, 6^{ème} Séminaire PPF "Maîtrise globale du procédé d'enlèvement de matière et des techniques associées" – ENSAM Metz, 12 p.
76. J.MAX_1985, *Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques_ Tome I : Principes généraux et méthodes classiques*, 4^{ème} édition, MASSON, ISBN :2-225-80470-2, 354 p.
77. J.MOREL_1992, *Vibrations des machines et diagnostic de leur état mécanique*, Eyrolles EDF, ISBN : 2-212-01626-3, 404p.
78. F.MOTHE_1988, *Aptitude au déroulage du bois de Douglas, conséquences de l'hétérogénéité du bois sur la qualité des placages*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies du Languedoc, Institut National Polytechnique de Lorraine, 183 p.
79. F.MOTHE, R.MARCHAL_2001, *Influence of the nosebar settings on tool instabilities in the peeling process*, 15th International Wood Machining Seminar, août, pp. 309-328.
80. E.MOVASSAGHI_1985, *Influence des paramètres microdensimétriques du Bois, sur les efforts de coupe et la qualité des placages de Douglas et de Châtaigner obtenus par déroulage*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 181p.
81. Y.MURASE, S.HARADA_1995, *Acoustic Emission Characteristics in Wood Cutting I : Effect of the grain angles on the amplitude of the acoustic emission*, Mokusei Gakkaishi 41 (4), pp. 373-379.
82. K.NAGATOMI, K.YOSHIDA, K.BANSHOYA, Y.MURASE_1993, *Recognition of wood cutting conditions through cutting sounds I: Effect of tool system's stiffness and tool wear on the generation of sound in cutting parallel to the grain*, Mokusei Gakkaishi 39 (5), pp. 521-528.
83. K.NAGATOMI, K.YOSHIDA, K.BANSHOYA, Y.MURASE_1994, *Relationship between cutting Sound and Tool Wear in Machine Boring of Wood and Wood-based Materials*, Mokusei Gakkaishi 40 (4), pp. 434-439.
84. K.NAGATOMI, K.YOSHIDA, K.BANSHOYA, Y.MURASE_1995, *The effect of Inclination Angle of Grain on Cutting Sound in Wood Cutting*, 12th International Wood Machining Seminar, October 2-4th Kyoto (Japan), pp. 423-432.
85. K.NAGATOMI, K.YOSHIDA, K.BANSHOYA, Y.MURASE_1999, *Relation between veneer quality and peeling sound in the peeling of sugi*, 14th International Wood Machining Seminar, September, pp. 681-690.
86. G.NEPVEU_1994, *La constitution du bois, Chap. V : L'eau dans le bois de l'arbre sur pieds et dans le bois mis en œuvre*, ARBOLOR NANCY, pp. 184-199.
87. Norme : NF EN 1330_9_2000, Essais non destructifs, Terminologie, partie 9 : Termes utilisés en contrôle par Emission Acoustique, 28 p.
88. Norme : NF EN ISO 4287_1998-12, (E 05-015), État de surface : méthode du profil - Termes, définitions et paramètres d'état de surface, 56 p.

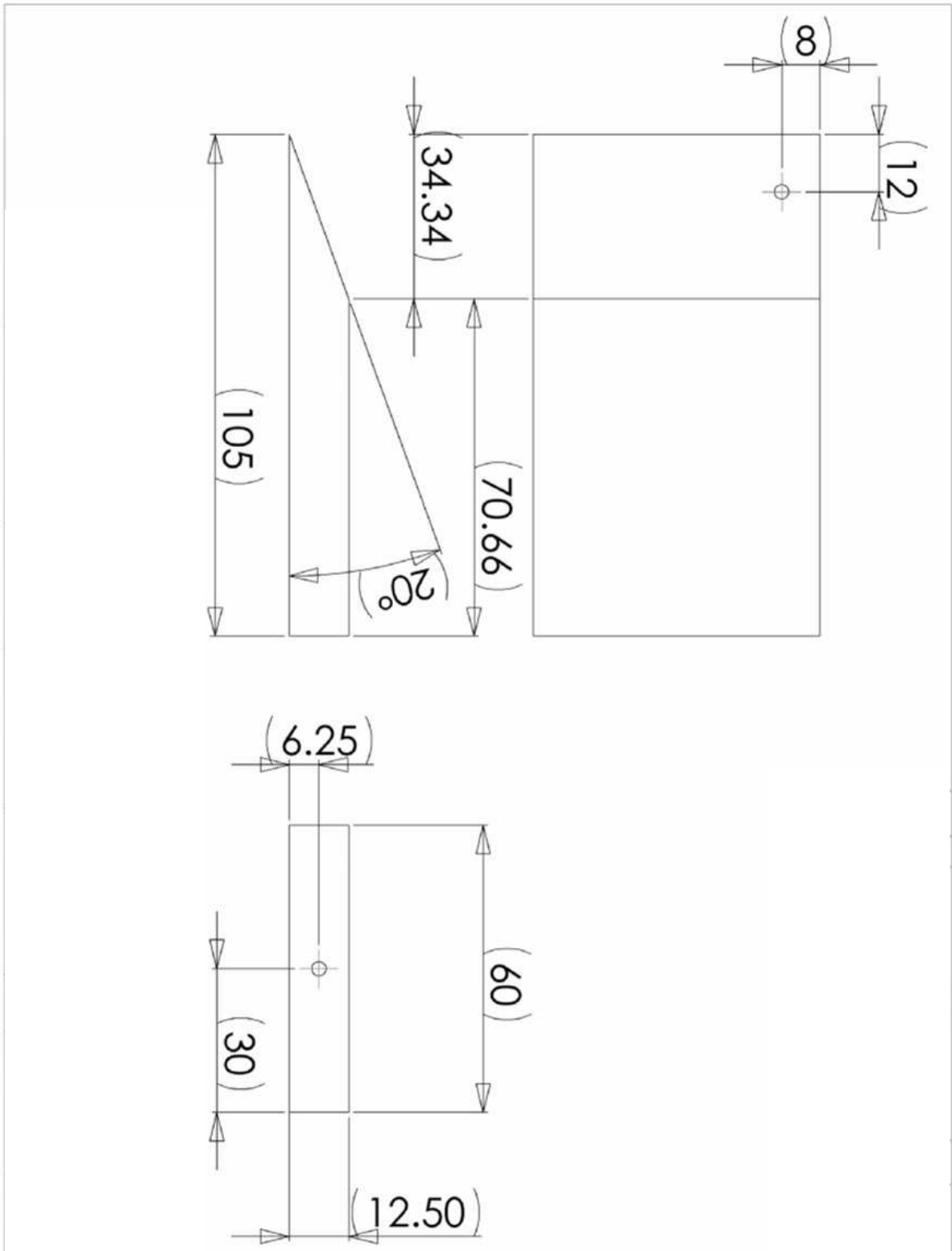
89. Norme : NF B 50-003_1985, Bois-vocabulaire (seconde liste), 8 p.
90. A.B.SADAT, R.SHIVAKUMAR_1987, *Detection of Tool Flank Wear using Acoustic Signature Analysis*, *Wear*, 115 (3), pp. 265-272.
91. C.SCHEFFER, P.S.HEYNS_2001, *Wear monitoring in turning operations using vibration and measurements.*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15 (6), pp.1185-1202.
92. M.SIDAHMED_1997, *Panorama des méthodes d'analyse et de diagnostic des machines tournantes*, *Revue Française de la mécanique*, (4) pp. 291-298.
93. T.TAKANO, K.FUJIMOTO_1999, *Development of surface defects in Softwood Veneer peeling*, 14th International Wood Machining Seminar, September, pp. 417-424.
94. N.TANDON, A.CHOUDHURY_1999, *A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearing*, *Tribology International*, 32, pp. 469-480.
95. J.L.TEBEC_1987, *Maintenance et contrôle qualité des machines tournantes par l'analyse du comportement vibratoire*, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 304 p.
96. B.THIBAUT_1988, *Le processus de coupe du bois par déroulage*, Thèse de Doctorat d'Etat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 386 p.
97. B.THIBAUT_1992, *Basic process in veneer cutting, summary of the main experimental results and proposed simplistic models*, IUFRO all division 5 conference, Nancy, 23-28th August, 579 p.
98. B.THIBAUT, J.BEAUCHÊNE_2001, *Some considerations about energetical balance between friction fracture and strains during veneer cutting at different temperature*, 15th International Wood Machining Seminar, août, pp. 305-308.
99. B.THIBAUT, J.BEAUCHÊNE_2004, *Links between Wood Machining Phenomena and Wood Mechanical Properties : The case of 0°/90° Orthogonal Cutting of Green Wood*, 2nd International Symposium on Wood Machining, pp. 149-160.
100. A.UMHEIER, L.SALMEN_1996, *Influence of strain rate and temperature on the radial compression behaviour of wet spruce*, *Journal of Engineering Materials and Technology*, *Transactions of the ASME*, 118 (3), pp. 289-294.
101. E.J.WELLER., H.M.SCHRIER, B.WEICHBRODT_1969, *What sound can be expected from a worn tool*, *ASME Journal of Engineering Industry* (91), pp. 525-534.
102. J.XI, C.DAI_1997, *Development of a sensor-fused intelligent system for veneer peeling process*, 13th International Wood Machining Seminar, juin, p 573-585.

ANNEXE I

1	Croquis cotés des outils.....	II
1.1	Couteau.....	II
1.2	Barre de pression.....	III
2	Déroulement des essais	IV

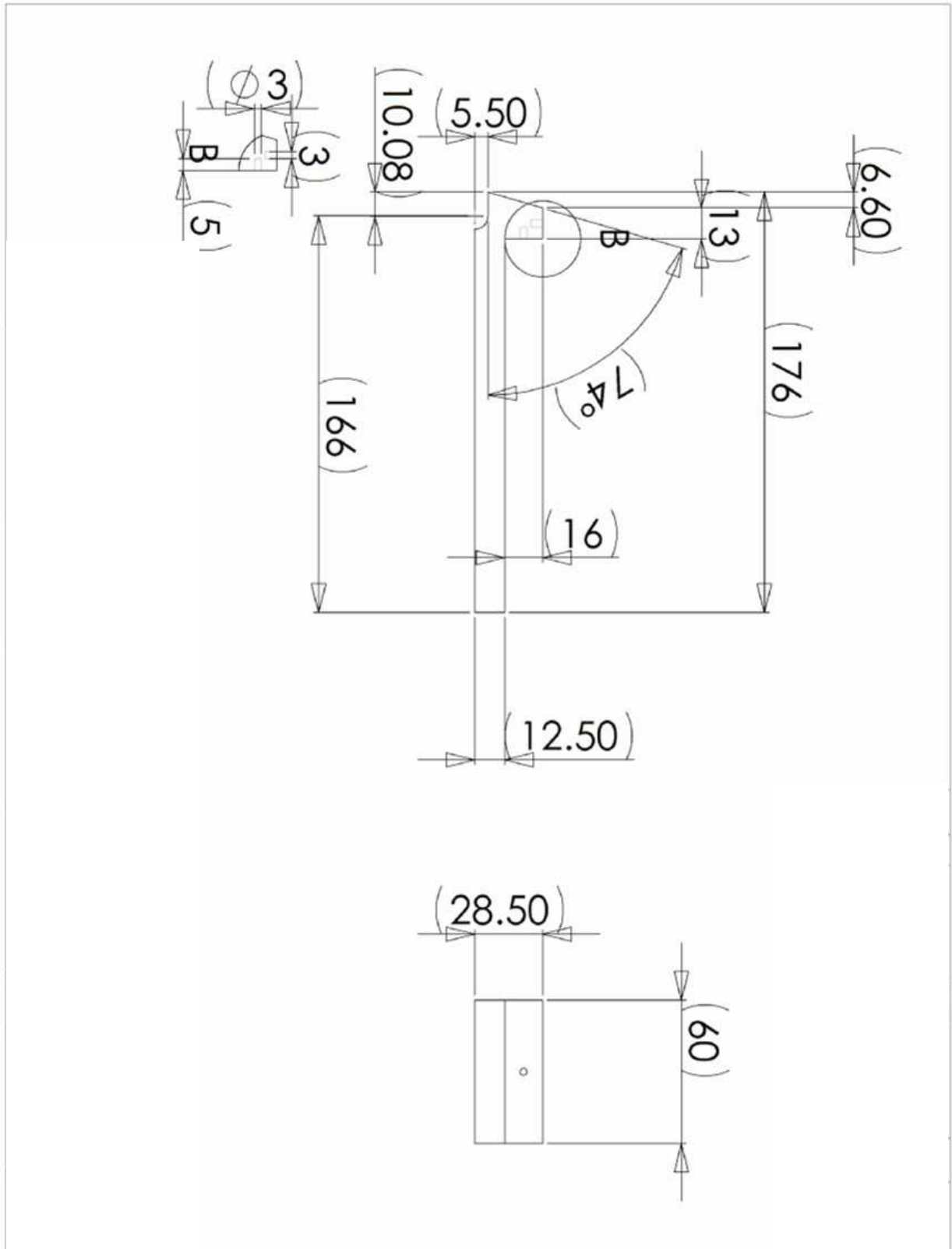
1 Croquis¹ cotés des outils

1.1 Couteau



¹ Toutes les cotes sont en millimètres.

1.2 Barre de pression



2 Déroulement des essais²

Numéro	essence	état de l'outil	angle de dépouille (°)	pression (%)	Ep (mm)	Vc (m/s) '(Tr/min)	billion-rondelle	Ri (mm)	Rf (mm)	nombre de tours
1	PTFE	rôdé	0	0	1	0.5	1	113	107	6
2	PTFE	rôdé	0	0	1	2	1	98	87	11
3	PTFE	rôdé	1	0	1	0.5	1	75	70	5
4	PTFE	rôdé	1	0	1	2	1	86	76	10
5	PTFE	usé	0	0	1	0.5	2	142	136	6
6	PTFE	usé	0	0	1	2	2	149	142	7
7	PTFE	usé	1	0	1	0.5	2	126	121	5
8	PTFE	usé	1	0	1	2	2	135	128	7
9	hêtre	rôdé	0	0	3	2	l-3	185	170	5
10	hêtre	rôdé	0	0	1	2	l-3	170	162	8
11	hêtre	rôdé	0	0	3	0.5	l-3	161	146	5
12	hêtre	rôdé	0	0	1	0.5	l-3	144	139	5
13	hêtre	rôdé	1	0	3	2	l-4	184	169	5
14	hêtre	rôdé	1	0	1	2	l-4	167	162	5
15	hêtre	rôdé	1	0	3	0.5	l-4	160	145	5
16	hêtre	rôdé	1	0	1	0.5	l-4	144	139	5
17	hêtre	rôdé	-1	0	3	2	l-5	184	169	5
18	hêtre	rôdé	-1	0	1	2	l-5	167	162	5
19	hêtre	rôdé	-1	0	3	0.5	l-5	159	144	5
20	hêtre	rôdé	-1	0	1	0.5	l-5	142	137	5
21	hêtre	rôdé	0	16.67	3	2	l-6	187	172	5
22	hêtre	rôdé	0	5.66	1	2	l-6	169	164	5
23	hêtre	rôdé	0	16.67	3	0.5	l-6	162	147	5
24	hêtre	rôdé	0	5.66	1	0.5	l-6	145	140	5
25	hêtre	rôdé	1	16.67	3	2	l-7	188	173	5
26	hêtre	rôdé	1	5.66	1	2	l-7	169	164	5
27	hêtre	rôdé	1	16.67	3	0.5	l-7	146	131	5
28	hêtre	rôdé	1	5.66	1	0.5	l-7	129	124	5
29	hêtre	rôdé	-1	16.67	3	2	l-8	180	165	5
30	hêtre	rôdé	-1	5.66	1	2	l-8	163	158	5
31	hêtre	rôdé	-1	16.67	3	0.5	l-8	156	152	1.3333333
32	hêtre	rôdé	-1	5.66	1	0.5	l-8	non	non	non
33	peuplier	rôdé	0	0	3	2	l-3	120	99	7
34	peuplier	rôdé	0	0	1	2	l-3	98	90	8
35	peuplier	rôdé	0	0	3	0.5	l-4	121	100	7
36	peuplier	rôdé	0	0	1	0.5	l-4	98	90	8
37	peuplier	rôdé	1	0	3	2	l-5	121	100	7
38	peuplier	rôdé	1	0	1	2	l-5	98	90	8
39	peuplier	rôdé	1	0	3	0.5	l-6	120	99	7
40	peuplier	rôdé	1	0	1	0.5	l-6	97	89	8
41	peuplier	rôdé	-1	0	3	2	l-7	120	99	7
42	peuplier	rôdé	-1	0	1	2	l-7	98	90	8
43	peuplier	rôdé	-1	0	3	0.5	l-8	119	98	7
44	peuplier	rôdé	-1	0	1	0.5	l-8	96	88	8

² Les essais hachurés n'ont pas pu être réalisés.

45	peuplier	rôdé	0	16.67	3	2	I-9	119	98	7
46	peuplier	rôdé	0	5.66	1	2	I-9	97	89	8
47	peuplier	rôdé	0	16.67	3	0.5	I-10	119	98	7
48	peuplier	rôdé	0	5.66	1	0.5	I-10	98	90	8
49	peuplier	rôdé	1	16.67	3	2	I-11	119	98	7
50	peuplier	rôdé	1	5.66	1	2	I-11	80	72	8
51	peuplier	rôdé	1	16.67	3	0.5	I-12	119	98	7
52	peuplier	rôdé	1	5.66	1	0.5	I-12	94	86	8
53	peuplier	rôdé	-1	16.67	3	2	I-13	119	98	7
54	peuplier	rôdé	-1	5.66	1	2	I-13	97	89	8
55	peuplier	rôdé	-1	16.67	3	0.5	I-14	118	97	7
56	peuplier	rôdé	-1	5.66	1	0.5	I-14	95	87	8
57	hêtre	usé	0	0	3	2	I-9	186	171	5
58	hêtre	usé	0	0	1	2	I-9	170	165	5
59	hêtre	usé	0	0	3	0.5	I-9	164	149	5
60	hêtre	usé	0	0	1	0.5	I-9	146	141	5
61	hêtre	usé	1	0	3	2	I-10	187	172	5
62	hêtre	usé	1	0	1	2	I-10	170	165	5
63	hêtre	usé	1	0	3	0.5	I-10	164	149	5
64	hêtre	usé	1	0	1	0.5	I-10	147	142	5
65	hêtre	usé	-1	0	3	2	I-12	187	172	5
66	hêtre	usé	-1	0	1	2	I-12	172	167	5
67	hêtre	usé	-1	0	3	0.5	I-12	166	151	5
68	hêtre	usé	-1	0	1	0.5	I-12	150	145	5
69	hêtre	usé	0	16.67	3	2	I-13	186	171	5
70	hêtre	usé	0	5.66	1	2	I-13	174	169	5
71	hêtre	usé	0	16.67	3	0.5	I-13	168	153	5
72	hêtre	usé	0	5.66	1	0.5	I-13	152	147	5
73	hêtre	usé	1	16.67	3	2	I-14	187	172	5
74	hêtre	usé	1	5.66	1	2	I-14	170	165	5
75	hêtre	usé	1	16.67	3	0.5	I-14	164	149	5
76	hêtre	usé	1	5.66	1	0.5	I-14	146	141	5
77	hêtre	usé	-1	16.67	3	2	I-15	187	172	5
78	hêtre	usé	-1	5.66	1	2	I-15	non	non	non
79	hêtre	usé	-1	16.67	3	0.5	I-15	non	non	non
80	hêtre	usé	-1	5.66	1	0.5	I-15	non	non	non
81	peuplier	usé	0	0	3	2	I-15	119	98	7
82	peuplier	usé	0	0	1	2	I-15	101	89	12
83	peuplier	usé	0	0	3	0.5	I-16	121	100	7
84	peuplier	usé	0	0	1	0.5	I-16	98	90	8
85	peuplier	usé	1	0	3	2	I-17	122	101	7
86	peuplier	usé	1	0	1	2	I-17	100	92	8
87	peuplier	usé	1	0	3	0.5	I-18	121	100	7
88	peuplier	usé	1	0	1	0.5	I-18	99	91	8
89	peuplier	usé	-1	0	3	2	I-19	121	100	7
90	peuplier	usé	-1	0	1	2	I-19	98	90	8
91	peuplier	usé	-1	0	3	0.5	I-20	121	100	7
92	peuplier	usé	-1	0	1	0.5	I-20	99	91	8

93	peuplier	usé	0	16.67	3	2	I-21	120	99	7
94	peuplier	usé	0	5.66	1	2	I-21	96	88	8
95	peuplier	usé	0	16.67	3	0.5	I-22	121	100	7
96	peuplier	usé	0	5.66	1	0.5	I-22	99	91	8
97	peuplier	usé	1	16.67	3	2	I-23	120	99	7
98	peuplier	usé	1	5.66	1	2	I-23	96	88	8
99	peuplier	usé	1	16.67	3	0.5	I-24	122	101	7
100	peuplier	usé	1	5.66	1	0.5	I-24	97	89	8
101	peuplier	usé	-1	16.67	3	2	I-25	122	101	7
102	peuplier	usé	-1	5.66	1	2	I-25	99	91	8
103	peuplier	usé	-1	16.67	3	0.5	I-26	121	100	7
104	peuplier	usé	-1	5.66	1	0.5	I-26	97	89	8
105	hêtre	rôdé	0	0	1	30*	II-5	192	85	107
106	hêtre	rôdé	0	0	1	60*	II-6	191	80	111
107	hêtre	rôdé	0	0	1	120*	II-7	192	80	112
108	hêtre	rôdé	0	0	0.7	0.1	III-3	150	150	1
109	hêtre	rôdé	0	0	1	0.1	III-3	143	142	1
110	hêtre	rôdé	0	0	1.3	0.1	III-3	141	140	1
111	hêtre	rôdé	0	0	1.7	0.1	III-3	136	134	1
112	hêtre	rôdé	0	0	2	0.1	III-3	132	130	1
113	hêtre	rôdé	0	0	2.3	0.1	III-3	128	126	1
114	hêtre	rôdé	0	0	2.7	0.1	III-3	123	121	1
115	hêtre	rôdé	0	0	3	0.1	III-3	118	115	1
116	hêtre	rôdé	0	0	3.3	0.1	III-3	108	105	1
117	peuplier	rôdé	0	0	0.7	0.1	II-3	111	111	1
118	peuplier	rôdé	0	0	1	0.1	II-3	109	108	1
119	peuplier	rôdé	0	0	1.3	0.1	II-3	107	105	1
120	peuplier	rôdé	0	0	1.7	0.1	II-3	104	102	1
121	peuplier	rôdé	0	0	2	0.1	II-3	101	99	1
122	peuplier	rôdé	0	0	2.3	0.1	II-3	91	88	1
123	peuplier	rôdé	0	0	2.7	0.1	II-3	84	81	1
124	peuplier	rôdé	0	0	3	0.1	II-4	107	104	1
125	peuplier	rôdé	0	0	3.3	0.1	II-4	92	88	1
126	peuplier	rôdé	0	5	3	0.5	II-5	107	92	5
127	peuplier	rôdé	0	10	3	0.5	II-5	92	77	5
128	peuplier	rôdé	0	15	3	0.5	II-6	107	92	5
129	peuplier	rôdé	0	20	3	0.5	II-6	92	77	5
130	hêtre	rôdé	0	0	2	0.25	III-5	168.5	166	1.25
131	hêtre	rôdé	0	0	2	0.5	III-5	166	163	1.5
132	hêtre	rôdé	0	0	2	0.75	III-5	163	159	2
133	hêtre	rôdé	0	0	2	1	III-5	159	155	2
134	hêtre	rôdé	0	0	2	1.5	III-5	155	153	1
135	hêtre	rôdé	0	0	2	2	III-4	124	118	3
136	hêtre	rôdé	0	0	2	3	III-4	131	125	3
137	hêtre	rôdé	0	0	2	4	III-4	156	150	3

ANNEXE II

1	Données pour l'analyse des corrélations	VIII
1.1	Variation de l'épaisseur.....	VIII
1.1.1	Données	VIII
1.1.2	Matrices des corrélations globale (85 essais).....	X
1.1.3	Matrices des corrélations outil rôdé (41 essais)	XI
2	Données brutes des efforts	XII
3	Données brutes acoustiques et vibratoires	XVI

1 Données pour l'analyse des corrélations

1.1 Variation de l'épaisseur

1.1.1 Données

Numéro	essence	pression (%)	angle de dépouille (°)	état de l'outil	Ep (mm)	Vc (m/s)	Moyenne (mm)	Pmin (nombre de tours)	Min (mm)	Pmax (nombre de tours)	Max (mm)	Ecart type (mm)	Coefficient d'asymétrie	Coefficient d'aplatissement	Période d'oscillation en nombre de tours
9	hêtre	0	0	rôdé	1	2	1.004	5.188	0.971	1.000	1.047	0.014	0.256	2.482	1.900
10	hêtre	0	0	rôdé	3	2	2.996	1.106	2.671	2.110	3.250	0.079	-0.232	4.599	
20	hêtre	5.66	0	rôdé	1	0.5	0.932	1.292	0.837	1.991	1.026	0.046	0.069	2.325	0.449
18	hêtre	5.66	0	rôdé	1	2	0.952	1.353	0.775	5.135	1.084	0.065	-0.605	3.020	0.896
19	hêtre	16.67	0	rôdé	3	0.5	2.978	1.431	2.651	2.571	3.165	0.086	-0.910	4.863	0.930
17	hêtre	16.67	0	rôdé	3	2	2.982	1.435	2.751	4.589	3.109	0.066	-0.994	3.610	0.927
24	hêtre	5.66	1	rôdé	1	0.5	0.968	1.363	0.841	5.199	1.081	0.036	-0.661	4.224	0.963
22	hêtre	5.66	1	rôdé	1	2	0.968	1.445	0.870	5.333	1.046	0.035	-0.647	3.419	0.932
23	hêtre	16.67	1	rôdé	3	0.5	2.970	1.104	2.795	4.030	3.131	0.064	-0.148	2.880	0.918
21	hêtre	16.67	1	rôdé	3	2	2.979	1.462	2.782	4.423	3.139	0.065	-0.156	3.252	0.930
28	hêtre	0	-1	rôdé	1	0.5	1.007	2.150	0.942	1.000	1.139	0.041	1.364	4.389	
26	hêtre	0	-1	rôdé	1	2	1.007	1.716	0.956	1.000	1.338	0.039	4.076	26.014	
27	hêtre	0	-1	rôdé	3	0.5	3.022	2.856	2.892	1.015	3.217	0.050	0.907	4.834	
25	hêtre	0	-1	rôdé	3	2	3.022	2.689	2.861	3.384	3.172	0.053	0.015	3.054	0.915
31	hêtre	5.66	-1	rôdé	1	2	0.926	3.223	0.732	1.748	1.143	0.096	0.078	2.216	0.945
30	hêtre	16.67	-1	rôdé	3	0.5	2.947	1.343	2.710	1.746	3.188	0.095	-0.238	2.979	0.919
29	hêtre	16.67	-1	rôdé	3	2	2.996	1.339	2.846	2.036	3.115	0.046	-0.441	3.907	
60	hêtre	0	0	usé	1	0.5	1.029	4.489	0.846	1.199	1.322	0.067	0.856	5.315	
58	hêtre	0	0	usé	1	2	1.022	1.000	0.742	1.386	1.323	0.087	0.400	5.335	
59	hêtre	0	0	usé	3	0.5	3.029	2.335	2.819	3.335	3.190	0.059	-0.298	3.610	
57	hêtre	0	0	usé	3	2	3.059	2.282	2.816	1.001	3.497	0.110	1.642	6.938	
64	hêtre	5.66	0	usé	1	0.5	0.839	2.816	0.293	4.877	1.308	0.173	-0.025	3.137	0.922
62	hêtre	5.66	0	usé	1	2	0.758	1.104	0.302	4.654	1.131	0.159	-0.116	2.702	
63	hêtre	16.67	0	usé	3	0.5	2.828	1.539	2.434	4.251	3.286	0.162	-0.063	2.640	0.448
61	hêtre	16.67	0	usé	3	2	2.690	1.696	2.136	3.007	3.144	0.281	0.091	1.854	1.033
68	hêtre	0	1	usé	1	0.5	1.012	3.428	0.895	4.434	1.202	0.037	0.303	4.883	
66	hêtre	0	1	usé	1	2	1.016	4.920	0.938	1.003	1.183	0.032	0.829	5.652	
67	hêtre	0	1	usé	3	0.5	3.026	2.146	2.920	1.042	3.134	0.035	0.223	3.228	
65	hêtre	0	1	usé	3	2	3.025	2.319	2.912	1.001	3.182	0.042	0.835	4.609	
72	hêtre	5.66	1	usé	1	0.5	0.894	1.334	0.586	4.702	1.183	0.111	0.153	2.399	
70	hêtre	5.66	1	usé	1	2	0.865	1.550	0.511	4.912	1.242	0.127	0.028	3.261	0.471
71	hêtre	16.67	1	usé	3	0.5	2.913	1.317	2.515	4.344	3.237	0.143	-0.562	2.946	0.627
69	hêtre	16.67	1	usé	3	2	2.822	1.633	2.425	4.568	3.200	0.180	-0.211	2.417	0.947
76	hêtre	0	-1	usé	1	0.5	1.010	1.910	0.664	1.021	1.536	0.137	0.474	3.957	0.457
74	hêtre	0	-1	usé	1	2	1.002	1.000	0.179	1.553	1.456	0.188	-0.680	4.584	0.448
75	hêtre	0	-1	usé	3	0.5	3.050	3.448	2.747	1.396	3.405	0.143	0.429	2.590	0.443
73	hêtre	0	-1	usé	3	2	3.109	3.405	2.629	1.073	3.541	0.211	0.149	2.306	0.599
36	peuplier	0	0	rôdé	1	0.5	0.996	3.432	0.953	4.546	1.043	0.017	0.122	2.294	2.522
34	peuplier	0	0	rôdé	1	2	1.006	5.730	0.973	7.109	1.040	0.014	-0.050	2.379	2.765
35	peuplier	0	0	rôdé	3	0.5	3.011	3.157	2.882	2.034	3.151	0.042	0.007	4.486	
33	peuplier	0	0	rôdé	3	2	2.997	5.947	2.688	4.607	3.254	0.087	0.059	3.765	1.837
40	peuplier	5.66	0	rôdé	1	0.5	0.988	1.000	0.846	2.900	1.078	0.038	-1.299	5.108	
38	peuplier	5.66	0	rôdé	1	2	0.983	1.377	0.905	8.262	1.029	0.027	-0.910	3.159	2.113
39	peuplier	16.67	0	rôdé	3	0.5	2.978	1.328	2.778	4.638	3.065	0.064	-1.642	4.860	
37	peuplier	16.67	0	rôdé	3	2	2.971	1.272	2.754	3.599	3.052	0.074	-1.852	5.213	
44	peuplier	0	1	rôdé	1	0.5	0.999	2.162	0.959	1.395	1.045	0.020	0.127	2.065	2.372
42	peuplier	0	1	rôdé	1	2	1.002	3.330	0.974	2.888	1.030	0.011	-0.076	2.388	
43	peuplier	0	1	rôdé	3	0.5	3.013	4.410	2.899	5.935	3.273	0.032	1.136	11.247	1.758
41	peuplier	0	1	rôdé	3	2	2.993	4.399	2.833	3.186	3.153	0.068	0.091	2.356	
48	peuplier	5.66	1	rôdé	1	0.5	0.990	1.342	0.882	8.030	1.055	0.030	-0.971	3.901	1.973
46	peuplier	5.66	1	rôdé	1	2	0.991	1.053	0.900	6.141	1.036	0.029	-1.304	4.269	
47	peuplier	16.67	1	rôdé	3	0.5	2.992	1.098	2.806	6.603	3.122	0.060	-1.070	3.778	
45	peuplier	16.67	1	rôdé	3	2	2.981	1.033	2.771	6.747	3.068	0.063	-1.538	4.812	0.958
52	peuplier	0	-1	rôdé	1	0.5	1.000	1.847	0.961	1.000	1.049	0.016	0.012	2.779	2.186
50	peuplier	0	-1	rôdé	1	2	1.006	4.073	0.973	1.010	1.187	0.022	4.043	28.622	
51	peuplier	0	-1	rôdé	3	0.5	3.018	5.960	2.947	5.774	3.120	0.026	0.356	3.093	
49	peuplier	0	-1	rôdé	3	2	3.009	5.140	2.917	6.297	3.133	0.029	0.079	2.992	

56	peuplier	5.66	-1	rôdé	1	0.5	0.991	1.350	0.823	4.423	1.088	0.046	-1.444	5.846	
54	peuplier	5.66	-1	rôdé	1	2	0.980	1.122	0.883	7.757	1.053	0.034	-0.418	2.595	
55	peuplier	16.67	-1	rôdé	3	0.5	2.981	1.435	2.731	5.390	3.125	0.077	-1.063	3.821	0.952
53	peuplier	16.67	-1	rôdé	3	2	2.915	2.220	2.680	5.957	3.155	0.124	0.071	1.659	0.909
84	peuplier	0	0	usé	1	0.5	1.050	1.215	0.685	2.787	1.892	0.165	2.262	9.377	
82	peuplier	0	0	usé	1	2	1.021	1.000	0.805	1.351	1.636	0.125	2.808	12.551	
83	peuplier	0	0	usé	3	0.5	3.005	1.077	2.353	1.197	3.162	0.062	-2.965	28.570	
81	peuplier	0	0	usé	3	2	2.762	0.147	-1.111	0.928	3.283	0.722	-1.470	8.984	
88	peuplier	5.66	0	usé	1	0.5	0.980	4.793	0.625	3.788	1.476	0.099	0.182	4.802	
86	peuplier	5.66	0	usé	1	2	0.972	1.488	-1.670	2.492	2.376	0.256	-4.190	49.995	
87	peuplier	16.67	0	usé	3	0.5	2.941	5.587	2.609	2.652	3.297	0.125	-0.420	3.225	
85	peuplier	16.67	0	usé	3	2	2.915	1.795	2.469	6.467	3.342	0.172	-0.083	2.383	
92	peuplier	0	1	usé	1	0.5	1.004	3.947	0.683	2.947	1.263	0.048	-0.275	7.731	
90	peuplier	0	1	usé	1	2	0.995	1.078	0.626	2.106	1.114	0.071	-2.350	11.674	
91	peuplier	0	1	usé	3	0.5	3.014	1.409	2.730	2.410	3.353	0.048	0.660	9.513	1.825
89	peuplier	0	1	usé	3	2	3.000	4.758	2.892	1.178	3.127	0.038	0.214	3.999	
96	peuplier	5.66	1	usé	1	0.5	0.989	1.144	0.643	1.741	1.301	0.085	-0.294	4.089	0.723
94	peuplier	5.66	1	usé	1	2	0.967	2.313	0.740	6.508	1.159	0.081	-0.150	2.716	
95	peuplier	16.67	1	usé	3	0.5	2.970	1.401	2.665	3.992	3.264	0.100	-0.605	3.686	0.895
93	peuplier	16.67	1	usé	3	2	2.915	1.256	2.648	6.323	3.248	0.138	0.133	2.142	
100	peuplier	0	-1	usé	1	0.5	1.000	1.628	0.711	1.448	1.386	0.061	0.348	8.816	
98	peuplier	0	-1	usé	1	2	1.009	1.228	0.798	1.069	1.330	0.082	0.358	4.095	
99	peuplier	0	-1	usé	3	0.5	3.019	1.200	2.839	2.518	3.202	0.058	0.066	3.281	0.920
97	peuplier	0	-1	usé	3	2	2.859	1.408	2.392	5.958	3.260	0.201	-0.020	3.636	
104	peuplier	5.66	-1	usé	1	0.5	0.990	1.052	0.602	5.857	1.285	0.097	-0.064	3.247	
102	peuplier	5.66	-1	usé	1	2	0.981	7.638	0.547	1.403	1.297	0.112	-0.243	3.924	
103	peuplier	16.67	-1	usé	3	0.5	2.973	1.108	2.640	6.244	3.257	0.114	-0.490	3.161	0.873
101	peuplier	16.67	-1	usé	3	2	2.859	1.408	2.392	5.958	3.260	0.201	-0.177	2.090	
1	ptfe	0	0	rôdé	1	0.5	1.003	1.787	0.916	1.000	1.184	0.035	2.488	12.825	
2	ptfe	0	0	rôdé	1	2	1.006	1.783	0.933	1.001	1.151	0.025	1.549	10.851	2.651
3	ptfe	0	1	rôdé	1	0.5	1.008	2.331	0.971	1.001	1.121	0.033	1.549	10.851	
4	ptfe	0	1	rôdé	1	2	1.008	1.730	0.943	1.001	1.143	0.022	1.646	5.258	2.442
5	ptfe	0	0	usé	1	0.5	1.144	2.425	0.500	1.512	2.538	0.491	2.012	13.038	
6	ptfe	0	0	usé	1	2	1.168	5.098	-0.621	1.857	2.997	1.302	-0.148	1.299	2.063
7	ptfe	0	1	usé	1	0.5	1.073	2.045	0.826	1.202	2.007	0.262	2.627	8.722	0.321
8	ptfe	0	1	usé	1	2	1.101	2.378	0.759	1.497	2.305	0.339	2.394	7.558	

1.1.2 Matrices des corrélations globale (85 essais)

Corrélations

	essence	barre	depouille	usure	Vc
essence		-0.0216 (85) 0.8443	-0.0167 (85) 0.8797	-0.0402 (85) 0.7147	-0.0402 (85) 0.7147
barre	-0.0216 (85) 0.8443		0.0950 (85) 0.3873	-0.0962 (85) 0.3812	-0.0197 (85) 0.8582
depouille	-0.0167 (85) 0.8797	0.0950 (85) 0.3873		0.1019 (85) 0.3532	-0.0152 (85) 0.8905
usure	-0.0402 (85) 0.7147	-0.0962 (85) 0.3812	0.1019 (85) 0.3532		-0.0366 (85) 0.7396
Vc	-0.0402 (85) 0.7147	-0.0197 (85) 0.8582	-0.0152 (85) 0.8905	-0.0366 (85) 0.7396	
Pmin	0.1010 (85) 0.3576	-0.3268 (85) 0.0023	-0.0675 (85) 0.5391	-0.0605 (85) 0.5822	0.0528 (85) 0.6311
Pmax/nb	-0.1660 (85) 0.1289	0.4984 (85) 0.0000	0.1498 (85) 0.1711	-0.2181 (85) 0.0449	-0.0573 (85) 0.6027
ecartype	-0.0205 (85) 0.8525	0.1407 (85) 0.1991	-0.1079 (85) 0.3257	0.4522 (85) 0.0000	0.1926 (85) 0.0775
asymétrie	-0.1997 (85) 0.0669	-0.3447 (85) 0.0012	-0.1740 (85) 0.1113	0.0385 (85) 0.7263	0.0314 (85) 0.7755
aplatissement	0.1687 (85) 0.1227	-0.2018 (85) 0.0640	-0.0564 (85) 0.6081	0.0957 (85) 0.3837	0.0805 (85) 0.4638
	Pmin	Pmax/nb	ecartype	asymétrie	aplatisseme
essence	0.1010 (85) 0.3576	-0.1660 (85) 0.1289	-0.0205 (85) 0.8525	-0.1997 (85) 0.0669	0.1687 (85) 0.1227
barre	-0.3268 (85) 0.0023	0.4984 (85) 0.0000	0.1407 (85) 0.1991	-0.3447 (85) 0.0012	-0.2018 (85) 0.0640
depouille	-0.0675 (85) 0.5391	0.1498 (85) 0.1711	-0.1079 (85) 0.3257	-0.1740 (85) 0.1113	-0.0564 (85) 0.6081
usure	-0.0605 (85) 0.5822	-0.2181 (85) 0.0449	0.4522 (85) 0.0000	0.0385 (85) 0.7263	0.0957 (85) 0.3837
Vc	0.0528 (85) 0.6311	-0.0573 (85) 0.6027	0.1926 (85) 0.0775	0.0314 (85) 0.7755	0.0805 (85) 0.4638
Pmin		-0.2046 (85) 0.0603	-0.2475 (85) 0.0224	0.2685 (85) 0.0130	-0.0734 (85) 0.5042
Pmax/nb	-0.2046 (85) 0.0603		-0.0143 (85) 0.8966	-0.1449 (85) 0.1857	-0.3398 (85) 0.0015
ecartype	-0.2475 (85) 0.0224	-0.0143 (85) 0.8966		-0.1722 (85) 0.1151	0.1111 (85) 0.3115
asymétrie	0.2685 (85) 0.0130	-0.1449 (85) 0.1857	-0.1722 (85) 0.1151		-0.0561 (85) 0.6100
aplatissement	-0.0734 (85) 0.5042	-0.3398 (85) 0.0015	0.1111 (85) 0.3115	-0.0561 (85) 0.6100	

Légende :

coefficient de corrélation
(nombre d'échantillons)
seuil de signification

1.1.3 Matrices des corrélations outil rôdé (41 essais)

	essence	barre	depouille	Vc	Pmin
essence		-0.1383 (41) 0.3883	0.1076 (41) 0.5032	-0.0872 (41) 0.5879	0.2607 (41) 0.0997
barre	-0.1383 (41) 0.3883		0.1071 (41) 0.5049	-0.0473 (41) 0.7691	-0.5947 (41) 0.0000
depouille	0.1076 (41) 0.5032	0.1071 (41) 0.5049		-0.0236 (41) 0.8835	-0.1409 (41) 0.3794
Vc	-0.0872 (41) 0.5879	-0.0473 (41) 0.7691	-0.0236 (41) 0.8835		0.1677 (41) 0.2947
Pmin	0.2607 (41) 0.0997	-0.5947 (41) 0.0000	-0.1409 (41) 0.3794	0.1677 (41) 0.2947	
Pmax/nb	-0.1123 (41) 0.4846	0.4095 (41) 0.0078	0.2096 (41) 0.1885	-0.0235 (41) 0.8842	-0.1928 (41) 0.2272
ecartype	-0.2575 (41) 0.1040	0.6004 (41) 0.0000	-0.1533 (41) 0.3386	0.0990 (41) 0.5382	-0.2605 (41) 0.1000
asymétrie	-0.1723 (41) 0.2813	-0.5134 (41) 0.0006	-0.3310 (41) 0.0345	0.1093 (41) 0.4962	0.4007 (41) 0.0094
aplatissement	0.0063 (41) 0.9689	-0.1892 (41) 0.2361	-0.2018 (41) 0.2057	0.1167 (41) 0.4674	0.0603 (41) 0.7082
	Pmax/nb	ecartype	asymétrie	aplatissement	
essence	-0.1123 (41) 0.4846	-0.2575 (41) 0.1040	-0.1723 (41) 0.2813	0.0063 (41) 0.9689	
barre	0.4095 (41) 0.0078	0.6004 (41) 0.0000	-0.5134 (41) 0.0006	-0.1892 (41) 0.2361	
depouille	0.2096 (41) 0.1885	-0.1533 (41) 0.3386	-0.3310 (41) 0.0345	-0.2018 (41) 0.2057	
Vc	-0.0235 (41) 0.8842	0.0990 (41) 0.5382	0.1093 (41) 0.4962	0.1167 (41) 0.4674	
Pmin	-0.1928 (41) 0.2272	-0.2605 (41) 0.1000	0.4007 (41) 0.0094	0.0603 (41) 0.7082	
Pmax/nb		0.2634 (41) 0.0962	-0.3899 (41) 0.0117	-0.3553 (41) 0.0226	
ecartype	0.2634 (41) 0.0962		-0.2313 (41) 0.1457	-0.1649 (41) 0.3027	
asymétrie	-0.3899 (41) 0.0117	-0.2313 (41) 0.1457		0.7535 (41) 0.0000	
aplatissement	-0.3553 (41) 0.0226	-0.1649 (41) 0.3027	0.7535 (41) 0.0000		

Légende :
 coefficient de corrélation
 (nombre d'échantillons)
 seuil de signification

2 Données brutes des efforts

Numéro essai	Nom voie	Moyenne_tot	Ecart type_tot	Maxi_tot	Mini_tot	Moyenne (1 tour)	Ecart type (1 tour)	Maxi (1 tour)	Mini (1 tour)
24	FXb	30.2	18.9	82.0	-32.5	41.8	10.6	82.0	13.8
22	FXb	43.4	22.2	108.3	-16.2	57.0	13.2	107.7	9.1
23	FXb	71.6	38.4	182.1	-72.9	53.4	45.3	132.9	-13.7
21	FXb	93.7	45.9	239.8	-66.2	113.0	23.1	221.1	36.8
28	FXb	30.8	14.5	93.1	-27.1	41.0	7.5	76.1	13.3
26	FXb	28.2	15.6	83.0	-18.0	37.2	11.9	83.0	-7.8
27	FXb	74.8	35.6	178.2	-57.9	90.8	13.9	148.3	46.4
25	FXb	77.5	40.9	218.4	-72.1	97.1	25.4	204.8	-6.2
30	FXb	50.3	22.8	129.9	-15.2	63.8	19.0	129.9	-0.8
31	FXb	76.1	47.6	194.8	-47.3	97.1	22.0	188.6	33.8
29	FXb	96.9	41.3	200.4	-95.3	107.5	19.5	186.3	27.6
48	FXb	18.0	7.3	41.0	-10.6	19.8	4.1	39.8	7.7
46	FXb	14.8	9.5	51.0	-18.2	17.5	8.9	51.0	-11.2
47	FXb	46.0	18.7	84.7	-28.0	52.4	7.5	76.6	25.5
45	FXb	48.3	21.7	96.7	-26.5	54.6	10.9	86.8	22.7
52	FXb	18.5	7.2	42.5	-10.7	21.0	3.8	34.6	6.7
50	FXb	15.9	13.2	62.5	-27.9	19.3	8.0	48.0	-5.7
51	FXb	49.2	18.8	90.0	-25.1	55.9	8.2	86.9	29.8
49	FXb	47.2	21.5	111.6	-35.4	53.5	11.1	90.9	19.7
56	FXb	22.2	8.1	43.8	-9.1	25.4	4.0	39.4	13.5
54	FXb	19.8	11.3	55.7	-16.9	24.2	9.9	54.0	-8.4
55	FXb	52.3	20.9	94.5	-28.0	59.9	9.6	89.3	37.6
53	FXb	46.4	22.0	102.2	-31.8	55.2	10.0	88.0	22.4
72	FXb	78.7	45.5	201.4	-25.8	114.5	29.3	201.4	0.0
70	FXb	76.0	48.9	205.1	-32.2	125.2	23.9	205.1	50.1
71	FXb	141.7	69.7	256.7	-37.6	192.9	24.3	256.7	114.7
69	FXb	141.7	81.0	320.7	-27.1	215.2	28.4	320.7	138.7
76	FXb	74.6	36.9	169.7	-33.0	102.7	19.1	169.7	45.0
74	FXb	71.9	39.2	171.3	-21.1	104.6	18.5	171.3	44.1
75	FXb	130.4	60.5	250.6	-54.1	168.5	25.8	250.6	102.7
73	FXb	137.8	69.4	392.1	-39.1	176.2	33.5	392.1	101.7
77	FXb	61.8	64.0	218.4	-25.7	120.9	31.6	218.4	1.3
96	FXb	30.4	12.7	67.2	-19.1	33.2	6.9	66.8	9.5
94	FXb	27.9	16.1	90.8	-31.8	35.2	11.6	84.0	-10.6
95	FXb	70.0	28.8	122.0	-37.2	72.7	9.1	106.8	14.5
93	FXb	62.5	28.1	122.0	-71.5	73.0	11.7	121.3	39.4
100	FXb	28.1	11.7	62.7	-18.7	31.0	6.4	54.8	8.5
98	FXb	25.8	13.8	72.8	-22.5	28.6	11.6	72.8	-4.0
99	FXb	72.4	27.7	120.7	-22.6	79.0	9.3	113.3	52.0
97	FXb	59.3	26.6	115.5	-44.1	68.2	11.9	101.3	16.1
104	FXb	28.9	12.4	63.7	-15.4	32.2	7.2	54.1	5.6
102	FXb	24.3	14.4	71.6	-30.1	29.1	11.8	65.0	-8.7
103	FXb	71.6	27.9	121.0	-17.4	78.2	8.3	107.2	54.7
101	FXb	67.2	30.5	131.6	-47.7	83.9	13.4	130.1	45.7
12	FXc	35.1	19.2	153.6	-66.0	36.0	16.8	126.7	-40.4
10	FXc	33.1	11.5	94.4	-21.1	33.4	10.6	86.9	-13.2
11	FXc	52.4	37.3	200.5	-98.1	51.7	39.6	200.5	-98.1
9	FXc	48.9	41.9	273.0	-166.5	50.6	46.7	237.9	-139.3
24	FXc	42.8	12.0	105.9	-19.2	45.9	10.9	105.9	12.6
22	FXc	44.4	13.4	120.0	-10.4	48.5	11.4	110.4	10.0
23	FXc	91.6	33.0	199.7	-75.9	67.9	47.1	161.3	0.2
21	FXc	94.6	28.6	227.3	-39.8	103.1	14.7	179.6	29.3
16	FXc	32.8	20.4	167.9	-78.3	35.3	22.4	154.1	-74.2
14	FXc	31.5	14.1	106.3	-37.8	32.1	13.2	106.3	-32.7
15	FXc	55.0	36.9	190.5	-92.1	58.3	39.2	190.5	-68.6
13	FXc	45.6	47.0	298.9	-196.5	47.3	44.6	242.0	-141.5
28	FXc	38.8	9.7	98.7	2.0	40.8	8.9	90.9	14.3
26	FXc	41.3	13.3	119.4	-19.3	44.2	11.1	119.4	-10.2
27	FXc	91.8	26.8	208.3	-79.5	96.8	14.0	166.7	42.3
25	FXc	93.8	29.1	246.8	-72.7	103.8	16.9	193.4	15.7
20	FXc	55.1	20.2	217.7	-123.8	54.0	23.9	217.7	-123.8
18	FXc	56.6	12.0	108.2	-0.4	55.1	9.4	101.6	14.9
19	FXc	81.0	36.9	244.5	-79.6	82.2	39.7	244.5	-72.6
17	FXc	78.5	36.6	276.2	-153.4	75.8	38.9	248.5	-102.1
30	FXc	103.2	20.6	170.2	27.7	114.1	21.2	170.2	55.2
31	FXc	106.9	26.2	194.2	-17.6	113.6	17.9	192.6	31.4
29	FXc	120.1	19.0	207.1	1.9	119.9	13.0	177.6	66.3
36	FXc	23.5	5.8	49.9	-4.9	23.3	5.2	49.9	5.4
34	FXc	21.3	6.8	49.7	-6.7	21.5	7.2	48.3	-4.1
35	FXc	34.6	18.1	95.2	-29.0	32.2	19.7	88.3	-24.7
33	FXc	30.6	42.5	178.7	-142.9	29.3	43.5	151.8	-103.9
48	FXc	23.7	5.5	52.3	-2.4	22.8	4.7	42.7	6.4
46	FXc	22.6	7.8	57.0	-10.8	24.2	10.0	57.0	-4.3
47	FXc	51.4	10.3	94.2	-1.5	52.2	7.0	76.9	30.2
45	FXc	45.2	11.7	77.3	-9.3	46.1	8.7	74.6	18.6

40	FXc	24.3	5.7	57.1	-4.7	24.2	5.1	46.4	5.2
38	FXc	20.8	6.7	52.1	-5.0	20.5	7.0	46.5	-5.0
39	FXc	32.3	18.8	109.4	-38.0	29.6	21.1	92.3	-37.4
37	FXc	27.6	41.5	218.8	-182.0	25.4	54.2	186.5	-144.6
52	FXc	22.6	5.2	48.1	3.9	22.3	4.8	44.7	6.1
50	FXc	23.7	9.4	58.6	-12.1	25.1	8.1	55.1	-1.6
51	FXc	51.8	9.8	93.6	1.1	50.6	6.3	74.9	31.9
49	FXc	51.3	13.0	99.6	-9.4	50.0	9.6	79.3	20.6
44	FXc	29.4	5.7	60.3	-0.1	29.3	4.4	53.3	8.3
42	FXc	26.6	7.5	52.3	-9.0	25.7	8.5	50.0	3.6
43	FXc	44.2	20.3	115.8	-29.3	41.9	22.0	109.4	-25.4
41	FXc	40.8	31.8	185.7	-126.7	37.1	43.7	160.7	-107.3
56	FXc	30.7	6.0	57.7	9.2	30.1	5.1	51.1	15.1
54	FXc	31.1	9.3	68.4	-9.5	32.2	10.7	67.1	-9.3
55	FXc	63.9	12.5	99.9	0.8	64.3	7.8	92.1	43.9
53	FXc	66.8	17.6	118.6	-7.5	70.9	12.2	118.6	35.9
60	FXc	105.1	35.0	273.5	-19.2	110.0	28.8	259.3	13.0
58	FXc	110.4	33.6	205.5	-8.6	118.8	18.0	177.4	66.9
59	FXc	129.5	38.7	284.0	-41.3	133.4	41.2	284.0	-25.4
57	FXc	133.2	40.9	287.9	-80.5	137.0	33.4	256.8	18.8
72	FXc	131.5	40.1	261.8	0.0	154.3	35.7	261.8	0.0
70	FXc	137.8	44.9	269.7	-4.9	165.5	30.3	269.7	96.9
71	FXc	186.0	43.4	330.0	3.1	212.2	28.6	330.0	131.3
69	FXc	198.5	49.3	309.8	9.3	230.3	25.5	309.8	162.2
64	FXc	80.9	27.1	246.3	-50.1	84.2	28.1	216.1	-27.1
62	FXc	81.4	18.8	156.7	-7.8	84.5	14.3	146.1	36.8
63	FXc	99.3	39.7	247.2	-61.3	104.0	42.5	247.2	-52.0
61	FXc	98.3	44.5	325.7	-162.5	101.3	41.7	242.7	-53.9
76	FXc	88.0	25.3	198.4	8.8	99.6	25.5	198.4	24.2
74	FXc	96.5	29.3	186.5	-9.0	112.3	24.6	181.0	56.9
75	FXc	136.3	31.4	248.9	-3.7	152.9	25.0	248.9	76.8
73	FXc	151.3	42.2	247.4	-5.7	176.3	21.4	247.4	117.1
68	FXc	186.8	36.6	347.0	85.6	183.7	39.1	336.0	106.0
66	FXc	171.4	45.4	279.7	4.2	181.4	26.9	279.6	101.9
67	FXc	206.9	46.7	371.0	12.6	208.3	45.7	371.0	64.2
65	FXc	236.6	81.1	420.2	2.1	210.5	37.5	328.0	60.7
77	FXc	215.9	74.5	354.2	-6.5	264.1	28.9	354.2	171.6
84	FXc	56.3	17.1	114.4	-0.9	50.5	10.3	92.2	14.7
82	FXc	53.0	23.9	159.7	-45.4	70.0	25.1	156.4	-38.9
83	FXc	72.1	22.2	149.6	-19.2	77.0	22.0	149.6	-1.9
81	FXc	73.2	52.2	333.4	-199.9	70.6	49.6	264.9	-138.2
96	FXc	46.2	12.4	100.4	3.8	38.8	8.3	76.7	10.6
94	FXc	56.6	18.8	134.4	-14.0	65.1	15.5	134.4	20.1
95	FXc	77.9	13.7	125.2	0.8	82.6	10.6	116.1	0.8
93	FXc	86.9	19.7	153.9	-56.2	80.5	11.4	128.9	49.9
88	FXc	51.3	12.2	110.9	0.4	50.3	8.3	78.1	19.5
86	FXc	51.5	20.4	215.8	-54.7	60.1	12.9	108.3	11.7
87	FXc	68.2	23.4	160.5	-18.2	64.8	20.6	125.0	-11.1
85	FXc	71.5	48.9	286.0	-156.8	82.2	64.9	273.4	-156.8
100	FXc	48.1	11.6	102.7	7.4	52.5	10.6	84.8	17.6
98	FXc	68.4	18.8	132.6	-7.1	75.2	16.5	127.6	14.9
99	FXc	70.9	13.0	113.2	-2.0	68.7	9.8	106.5	41.7
97	FXc	81.2	20.8	134.4	-11.4	78.7	11.4	118.5	43.7
90	FXc	56.5	12.3	111.4	-2.8	56.1	8.5	84.2	31.2
92	FXc	56.5	12.3	111.4	-2.8	52.4	8.2	84.2	26.7
91	FXc	76.5	21.6	157.9	-9.6	76.3	19.6	137.2	-2.3
89	FXc	76.6	42.6	293.6	-151.4	70.6	41.9	212.1	-98.0
104	FXc	48.1	11.7	97.6	5.7	48.8	9.5	86.2	19.7
102	FXc	60.4	18.1	114.3	-10.4	67.7	12.7	111.9	29.7
103	FXc	85.9	16.4	139.7	7.6	78.4	9.4	109.6	52.3
101	FXc	100.3	22.8	158.4	-9.6	102.7	13.3	153.3	64.7
24	FYb	74.0	47.1	232.4	-12.3	104.4	28.0	232.4	43.4
22	FYb	123.1	63.4	306.3	-29.1	163.0	37.0	301.8	27.0
23	FYb	182.3	96.5	406.4	-51.4	138.4	111.9	324.7	-4.0
21	FYb	263.7	127.0	420.2	-249.6	321.8	57.2	420.2	75.7
28	FYb	74.3	35.7	233.7	-16.4	99.1	19.7	210.8	43.7
26	FYb	80.3	44.1	243.2	-20.9	107.1	32.6	242.9	-4.1
27	FYb	189.8	90.0	424.5	-58.5	227.9	34.5	375.3	131.6
25	FYb	224.6	121.5	720.0	-205.9	280.1	74.6	695.2	27.7
30	FYb	144.2	66.1	369.7	-35.2	185.7	55.2	369.7	5.1
31	FYb	192.6	121.4	460.5	-29.8	248.1	58.3	444.3	122.5
29	FYb	274.5	116.6	614.4	-241.3	304.6	54.6	540.1	74.4
48	FYb	40.9	15.9	93.3	-4.5	43.8	8.4	76.1	23.0
46	FYb	41.3	18.3	106.4	-22.8	50.0	12.3	93.2	9.7
47	FYb	121.6	48.8	215.1	-25.6	137.7	18.7	200.1	90.1
45	FYb	142.6	58.1	256.2	-23.8	162.0	24.4	235.6	103.4

52	FYb	40.2	15.3	92.9	-6.2	45.1	7.4	75.4	21.1
50	FYb	42.0	18.5	112.0	-18.9	51.6	12.2	112.0	9.0
51	FYb	128.1	48.2	225.7	-16.7	143.7	20.8	213.8	91.8
49	FYb	137.8	56.1	272.8	-35.6	153.6	26.7	223.5	77.3
56	FYb	50.3	18.9	106.3	-4.9	57.1	9.9	88.5	23.4
54	FYb	53.0	24.3	129.0	-18.7	65.6	14.4	114.0	26.1
55	FYb	135.2	53.9	232.1	-16.0	155.6	24.5	224.9	98.0
53	FYb	219.6	104.5	420.2	-14.0	276.7	36.8	371.4	199.1
72	FYb	200.2	117.8	512.4	-11.0	294.0	78.2	512.4	0.0
70	FYb	215.1	136.7	626.9	-28.3	352.8	67.8	626.9	174.8
71	FYb	370.9	182.1	670.0	-15.5	506.6	62.3	670.0	320.6
69	FYb	410.0	232.4	868.7	-60.1	623.3	76.6	867.4	370.3
76	FYb	189.3	93.6	418.6	-12.7	260.5	52.1	418.6	144.3
74	FYb	206.5	111.5	485.8	-19.5	300.7	50.7	474.1	156.6
75	FYb	340.3	158.3	677.6	-23.2	443.5	69.9	658.9	296.7
73	FYb	425.7	218.1	1069.0	-63.7	649.0	91.7	1069.0	393.8
77	FYb	185.8	190.4	636.6	-63.9	362.4	92.8	636.6	44.1
96	FYb	71.4	31.1	159.1	-11.4	82.3	17.2	157.0	23.0
94	FYb	113.2	56.0	243.4	-40.3	161.7	26.3	243.4	76.8
95	FYb	192.3	81.9	381.2	-25.1	272.8	31.2	377.8	145.4
93	FYb	257.9	108.4	413.3	-58.0	300.8	36.1	407.0	225.7
100	FYb	68.3	27.8	145.2	-11.8	84.4	15.9	145.2	31.2
98	FYb	102.5	40.7	199.4	-16.5	118.7	20.0	186.6	44.2
99	FYb	177.8	68.9	293.9	-13.7	193.3	22.8	264.9	140.3
97	FYb	255.7	113.3	421.9	-29.4	300.6	35.7	393.0	184.5
104	FYb	66.6	28.5	137.7	-10.6	80.2	16.8	129.6	28.1
102	FYb	95.7	49.4	227.0	-35.8	128.7	23.9	214.9	66.3
103	FYb	177.3	69.7	295.3	-14.4	196.8	21.5	267.5	148.8
101	FYb	321.8	135.0	494.2	-26.4	387.1	42.4	483.3	308.9
12	FYc	29.3	16.1	105.0	-68.1	30.8	11.7	94.5	-30.0
10	FYc	29.2	25.4	133.1	-120.5	32.0	18.4	114.7	-50.3
11	FYc	5.6	21.5	116.4	-87.3	6.7	22.0	116.4	-87.3
9	FYc	41.6	43.9	251.1	-148.4	43.4	43.8	216.6	-106.3
24	FYc	25.2	12.5	81.2	-54.9	27.5	10.4	79.7	-5.5
22	FYc	29.7	16.8	147.1	-72.1	33.3	14.7	147.1	-11.0
23	FYc	95.9	39.6	223.0	-40.2	73.3	50.4	168.3	0.9
21	FYc	110.2	49.7	392.4	-196.6	124.3	32.5	292.0	-38.6
16	FYc	29.8	16.5	110.3	-53.3	32.7	16.7	110.3	-47.3
14	FYc	29.8	32.5	208.8	-136.2	32.6	28.6	158.5	-97.3
15	FYc	45.7	25.6	156.3	-84.7	45.7	26.1	150.3	-73.1
13	FYc	45.5	60.4	313.0	-241.2	46.5	60.0	241.2	-180.2
28	FYc	29.0	11.0	102.3	-26.5	30.9	9.0	84.0	3.2
26	FYc	34.5	22.4	206.2	-129.9	37.9	17.8	142.9	-48.7
27	FYc	103.5	35.6	245.3	-72.1	110.9	16.7	188.0	54.2
25	FYc	116.3	55.5	420.2	-192.2	132.6	38.4	402.4	-105.9
20	FYc	0.9	34.9	83.4	-326.9	9.6	13.3	83.4	-64.1
18	FYc	-39.1	84.8	47.1	-420.2	-13.3	11.1	33.1	-83.6
19	FYc	-1.3	62.4	84.1	-420.2	16.0	17.8	84.1	-68.6
17	FYc	-32.4	60.2	103.8	-420.2	-11.6	30.0	103.8	-106.8
30	FYc	-269.9	107.0	17.8	-420.2	-317.4	105.1	-84.7	-420.2
31	FYc	47.3	90.6	175.5	-390.3	75.9	32.8	173.5	-27.0
29	FYc	43.0	87.3	263.8	-420.2	65.9	39.3	221.5	-35.5
36	FYc	9.6	7.6	35.9	-54.8	10.0	4.0	25.6	-4.8
34	FYc	10.3	10.9	59.1	-36.5	11.2	10.7	56.5	-34.1
35	FYc	17.7	13.7	70.5	-38.1	17.2	14.7	67.1	-37.1
33	FYc	18.8	38.8	186.2	-134.1	18.7	38.0	158.3	-101.8
48	FYc	0.5	4.8	21.1	-28.0	0.2	3.2	13.8	-9.8
46	FYc	3.8	8.8	44.6	-33.8	3.0	10.3	34.8	-29.5
47	FYc	30.4	12.2	65.8	-27.4	30.7	7.8	56.5	8.2
45	FYc	35.4	14.4	77.6	-48.4	38.0	9.9	76.2	6.3
40	FYc	11.4	6.2	39.0	-25.6	12.0	4.4	35.1	-4.9
38	FYc	11.5	12.3	64.5	-45.2	11.8	13.0	64.5	-44.3
39	FYc	22.0	17.5	89.5	-42.0	20.3	19.0	89.5	-40.6
37	FYc	22.6	44.7	220.1	-179.9	21.6	54.3	183.8	-137.0
52	FYc	2.1	5.3	21.6	-42.6	2.0	3.4	16.4	-11.0
50	FYc	3.5	10.1	48.7	-36.5	4.4	10.5	39.4	-28.4
51	FYc	29.9	12.7	63.5	-33.0	34.1	6.7	57.6	11.5
49	FYc	31.4	16.1	84.3	-44.1	35.1	11.4	76.4	-5.4
44	FYc	0.2	10.1	20.8	-77.7	2.7	3.0	15.7	-10.0
42	FYc	-1.4	13.1	32.1	-96.3	2.5	10.4	32.1	-31.9
43	FYc	0.8	13.9	53.0	-99.6	3.7	9.4	42.8	-30.5
41	FYc	-3.3	24.5	108.9	-145.9	2.5	29.5	108.9	-84.9
56	FYc	-20.7	8.7	10.2	-66.6	-19.5	6.5	5.8	-38.3
54	FYc	-30.1	12.6	19.3	-84.1	-30.7	12.5	19.3	-73.0
55	FYc	-14.5	15.8	35.4	-117.6	-7.9	9.5	29.2	-34.7
53	FYc	-32.2	22.6	39.5	-109.1	-32.8	20.0	21.8	-109.1
60	FYc	-136.4	55.0	-0.1	-376.5	-125.0	43.9	-49.6	-305.0
58	FYc	-212.1	72.9	6.6	-420.2	-214.6	60.5	-103.6	-420.2
59	FYc	-110.4	55.1	9.4	-420.2	-96.3	42.5	9.4	-247.7
57	FYc	-205.4	81.9	5.3	-420.2	-182.7	56.1	-62.1	-408.8
72	FYc	-284.7	121.7	0.0	-728.4	-348.7	121.8	0.0	-728.4
70	FYc	-427.5	153.9	5.9	-958.4	-537.7	99.7	-347.4	-896.4
71	FYc	-229.3	74.4	-0.1	-496.8	-255.8	71.1	-101.3	-490.2
69	FYc	-414.2	135.4	-44.5	-808.3	-484.7	89.2	-285.8	-808.3
64	FYc	-44.4	28.8	12.2	-201.0	-42.5	27.4	11.7	-162.4
62	FYc	-68.0	34.4	4.5	-270.0	-64.7	34.8	-5.5	-270.0
63	FYc	-16.3	30.3	80.3	-221.8	-10.3	23.0	80.3	-112.0
61	FYc	-43.1	46.7	78.6	-412.7	-34.1	32.3	63.5	-172.4

76	FYc	-116.3	50.1	-18.7	-370.3	-143.4	54.3	-47.1	-370.3
74	FYc	-173.3	69.9	5.3	-437.7	-221.4	67.0	-86.3	-425.2
75	FYc	-36.4	40.5	67.2	-200.2	-41.0	41.1	48.6	-181.3
73	FYc	-111.0	68.3	76.0	-416.4	-137.8	71.5	50.3	-416.4
68	FYc	-459.5	131.0	-242.6	-966.5	-417.5	112.5	-242.6	-712.9
66	FYc	-669.3	169.7	-26.9	-1201.1	-671.7	120.0	-460.5	-968.6
67	FYc	-436.9	128.3	-37.8	-884.7	-396.6	109.6	-207.7	-669.0
65	FYc	-837.4	275.6	-23.1	-1630.5	-765.5	169.1	-443.6	-1185.7
77	FYc	-759.6	233.9	5.0	-1187.3	-868.0	122.4	-606.4	-1187.3
84	FYc	-46.1	15.7	2.2	-96.6	-39.9	14.5	-1.4	-82.6
82	FYc	-45.8	22.3	41.7	-147.1	-62.9	25.1	11.5	-147.1
83	FYc	-25.5	18.4	35.3	-130.9	-26.0	14.2	24.6	-72.5
81	FYc	-40.0	37.7	112.8	-219.0	-32.7	34.9	112.8	-137.0
96	FYc	-41.1	15.0	7.1	-109.8	-33.6	10.4	-0.1	-78.5
94	FYc	-53.5	19.7	26.4	-134.3	-56.7	18.7	6.4	-134.3
95	FYc	-38.2	18.6	22.6	-119.3	-49.1	22.8	10.1	-107.1
93	FYc	-53.0	21.2	54.6	-165.0	-42.5	18.7	6.2	-97.3
88	FYc	-25.6	12.0	19.5	-103.5	-20.0	6.1	1.0	-49.2
86	FYc	-37.3	16.4	14.4	-108.7	-40.4	13.2	0.8	-102.8
87	FYc	-15.8	17.2	43.2	-83.6	-12.6	15.0	41.7	-62.7
85	FYc	-28.1	35.3	112.2	-193.5	-37.7	43.3	112.2	-193.5
100	FYc	-35.5	13.4	10.1	-97.5	-41.0	16.3	0.0	-83.2
98	FYc	-62.3	20.9	19.7	-147.7	-75.7	21.8	-5.0	-144.4
99	FYc	-12.3	12.0	29.4	-91.6	-8.7	7.9	15.9	-37.7
97	FYc	-24.8	15.9	42.2	-94.0	-19.6	13.5	31.8	-70.9
90	FYc	-43.1	14.3	5.3	-111.3	-35.1	7.7	-13.6	-60.5
92	FYc	-43.1	14.3	5.3	-111.3	-32.5	8.4	-8.6	-60.5
91	FYc	-49.8	24.1	19.0	-178.9	-39.4	19.0	19.0	-103.7
89	FYc	-54.5	35.7	109.1	-206.8	-45.1	35.0	83.9	-151.2
104	FYc	-47.9	18.8	8.2	-121.2	-46.3	15.5	-3.5	-97.3
102	FYc	-68.8	24.0	11.9	-153.8	-65.2	17.8	-11.7	-137.6
103	FYc	-73.5	29.0	-7.6	-168.2	-47.4	17.6	-10.1	-103.4
101	FYc	-143.8	48.2	6.0	-267.8	-139.0	36.7	-48.2	-245.6
12	Fa	49.1	25.1	189.0	-84.6	50.7	21.5	156.7	-45.9
10	Fa	50.5	17.2	132.7	-24.0	51.9	14.1	116.8	-24.0
11	Fa	58.0	44.3	218.7	-99.5	57.7	46.9	218.7	-99.5
9	Fa	74.0	58.5	394.7	-222.9	76.8	64.7	333.0	-182.9
16	Fa	55.7	16.8	139.5	-18.5	59.9	14.8	139.5	21.7
14	Fa	64.4	20.2	165.2	-11.2	70.6	16.9	165.2	21.1
15	Fa	136.2	50.3	296.7	-73.4	101.8	70.2	233.4	0.7
13	Fa	153.7	47.8	341.6	-30.9	169.0	23.0	306.3	81.4
20	Fa	46.6	27.0	209.8	-94.7	50.4	29.2	198.0	-94.7
18	Fa	48.3	19.9	145.0	-44.2	49.9	17.5	145.0	-23.3
19	Fa	76.5	46.7	243.7	-98.7	80.0	48.7	231.6	-79.9
17	Fa	70.8	66.7	417.4	-267.8	73.2	62.0	335.4	-170.4
24	Fa	52.7	13.9	135.3	-3.6	55.5	12.2	128.7	22.2
22	Fa	61.9	20.1	166.9	-41.6	66.5	16.3	166.9	1.3
23	Fa	138.1	41.8	301.4	-107.4	146.3	20.8	250.4	68.3
21	Fa	152.9	48.4	344.8	-36.6	170.6	26.5	313.6	74.6
28	Fa	59.7	24.1	255.6	-148.2	61.7	28.7	255.6	-148.2
26	Fa	57.5	26.2	127.9	-56.2	63.6	10.8	111.8	11.8
27	Fa	86.8	44.3	274.5	-94.7	94.4	44.0	274.5	-82.0
25	Fa	86.4	49.5	350.7	-206.8	89.5	49.9	296.7	-121.5
30	Fa	43.5	21.4	138.4	-42.1	42.2	19.7	110.8	-24.3
31	Fa	132.5	48.0	264.6	-47.3	150.2	24.8	256.6	56.9
29	Fa	160.6	40.5	292.0	-13.4	167.5	20.9	280.9	100.4
36	Fa	27.9	7.8	61.2	-7.3	27.9	6.3	57.2	6.3
34	Fa	26.8	9.1	62.5	-8.9	27.4	9.4	60.5	-0.3
35	Fa	42.7	22.9	118.7	-37.3	40.0	25.1	114.2	-31.1
33	Fa	40.2	56.5	231.9	-169.5	38.7	56.6	220.1	-147.7
40	Fa	24.3	6.1	52.3	-5.4	23.3	5.2	46.4	3.9
38	Fa	24.6	9.6	65.0	-15.7	25.9	12.9	65.0	-10.6
39	Fa	65.1	14.3	106.9	-3.0	66.1	9.3	97.9	39.6
37	Fa	61.0	16.5	102.5	-11.5	63.0	11.8	101.4	27.3
44	Fa	29.5	7.5	70.2	-5.8	29.7	6.2	56.2	4.3
42	Fa	25.9	8.7	63.8	-13.8	25.8	9.4	63.8	-8.3
43	Fa	42.0	25.4	142.3	-45.8	38.5	28.3	124.1	-45.8
41	Fa	37.4	55.8	304.6	-240.8	34.7	72.6	252.0	-196.4
48	Fa	24.0	6.2	56.4	1.2	23.6	5.4	46.1	4.9
46	Fa	25.7	10.2	64.7	-14.9	27.5	9.8	60.8	-0.5
47	Fa	65.1	13.6	104.5	-1.1	65.6	8.3	96.5	42.2
45	Fa	65.3	17.4	129.9	-10.0	65.4	12.9	108.0	29.4
52	Fa	30.4	7.7	66.5	-2.9	31.2	4.8	58.0	9.8
50	Fa	26.9	9.8	59.5	-15.6	27.5	10.8	59.5	-1.2
51	Fa	45.9	22.8	125.1	-38.2	44.6	23.5	114.3	-22.1
49	Fa	40.7	37.3	208.5	-148.0	39.3	52.8	181.8	-122.8
56	Fa	23.6	5.3	46.4	-0.1	23.4	4.2	40.9	9.7
54	Fa	20.4	9.4	64.8	-21.7	21.3	12.2	64.8	-21.7
55	Fa	60.2	14.3	105.8	-5.7	63.2	8.6	93.9	42.2
53	Fa	56.3	16.4	101.2	-16.0	60.4	10.1	93.0	28.4

12	Fd	8.5	12.4	189.0	-84.6	8.1	10.4	156.7	-45.9
10	Fd	12.1	21.3	132.7	-84.4	10.3	18.0	116.8	-63.7
11	Fd	41.0	28.6	218.7	-111.7	39.6	30.4	218.7	-111.7
9	Fd	19.0	42.9	394.7	-222.9	19.4	45.2	333.0	-182.9
16	Fd	18.2	7.4	139.5	-23.5	19.1	6.8	139.5	-6.1
14	Fd	23.2	12.5	165.2	-82.3	24.7	11.6	165.2	-57.3
15	Fd	7.7	10.7	296.7	-78.9	4.1	6.9	233.4	-26.7
13	Fd	14.5	29.2	341.6	-220.4	12.7	25.8	306.3	-127.9
20	Fd	5.3	11.1	209.8	-94.7	5.2	12.5	198.0	-94.7
18	Fd	9.0	29.0	173.2	-148.0	7.5	27.1	145.0	-120.9
19	Fd	12.1	23.1	243.7	-112.2	14.8	26.5	231.6	-79.9
17	Fd	11.3	53.9	417.4	-267.8	12.2	56.5	335.4	-211.7
24	Fd	10.9	5.7	135.3	-21.7	11.2	5.4	128.7	-11.9
22	Fd	15.4	17.5	166.9	-133.7	15.7	14.9	166.9	-80.1
23	Fd	-0.5	10.1	301.4	-107.4	-1.9	6.7	250.4	-31.7
21	Fd	5.9	35.3	344.8	-261.7	3.6	30.4	313.6	-172.8
28	Fd	45.3	33.3	339.7	-148.2	37.7	16.8	255.6	-148.2
26	Fd	86.9	70.5	404.7	-56.2	65.3	14.7	144.7	11.8
27	Fd	68.7	59.2	446.3	-94.7	56.3	34.4	274.5	-82.0
25	Fd	103.5	57.9	446.5	-206.8	84.6	42.4	296.7	-121.5
30	Fd	313.6	100.1	492.9	-42.1	361.5	99.7	492.9	-24.3
31	Fd	52.8	68.6	407.9	-47.3	36.3	26.5	256.6	-37.9
29	Fd	86.0	65.1	452.7	-80.0	68.0	32.3	280.9	-29.4
36	Fd	11.9	5.7	64.2	-7.3	11.5	3.9	57.2	-4.6
34	Fd	10.7	9.3	62.5	-28.8	10.2	9.3	60.5	-23.6
35	Fd	14.8	10.2	118.7	-37.3	13.3	10.6	114.2	-31.1
33	Fd	12.4	28.8	231.9	-169.5	11.4	31.3	220.1	-147.7
40	Fd	18.8	5.3	52.3	-5.4	18.3	4.0	46.4	2.9
38	Fd	15.5	7.8	65.0	-21.5	17.4	7.9	65.0	-12.0
39	Fd	18.9	7.6	106.9	-15.9	19.4	5.3	97.9	1.1
37	Fd	10.2	8.6	102.5	-30.4	9.0	6.6	101.4	-16.8
44	Fd	10.6	4.5	70.2	-10.2	10.2	3.9	56.2	-4.9
42	Fd	7.8	10.5	63.8	-37.3	7.4	10.9	63.8	-31.9
43	Fd	9.1	8.6	142.3	-45.8	8.1	9.6	124.1	-45.8
41	Fd	4.9	28.8	304.6	-240.8	3.8	32.7	252.0	-196.4
48	Fd	16.4	5.0	56.6	-0.9	16.2	4.1	46.1	-0.9
46	Fd	16.2	11.1	70.8	-30.1	16.6	9.5	60.8	-18.1
47	Fd	18.5	8.3	104.5	-12.6	14.4	4.6	96.5	-0.4
45	Fd	17.0	11.5	129.9	-37.9	13.2	7.8	108.0	-16.3
52	Fd	22.9	8.1	88.8	-2.9	20.8	3.8	58.0	3.9
50	Fd	21.9	10.9	106.2	-15.6	18.3	8.7	59.5	-10.0
51	Fd	34.0	17.0	125.1	-38.2	30.0	17.7	114.3	-29.6
49	Fd	34.5	25.1	208.5	-148.0	27.1	27.1	181.8	-122.8
56	Fd	40.0	9.9	81.0	-0.1	38.6	8.1	64.8	9.7
54	Fd	47.7	13.8	99.3	-21.7	49.0	12.5	90.3	-21.7
55	Fd	61.3	15.8	133.0	-5.7	56.5	10.0	93.9	30.1
53	Fd	77.2	26.5	162.4	-16.0	81.0	22.5	155.9	20.7

Ces données sont exprimées en N/cm.

3 Données brutes acoustiques et vibratoires

Numéro essai	RMS_tot Xc (m/s ²)	Kurtosis_tot Xc	RMS (1 tour) Xc (m/s ²)	Kurtosis (1 tour) Xc	RMS_tot Yc (m/s ²)	Kurtosis_tot Yc	RMS (1 tour) Yc (m/s ²)	Kurtosis (1 tour) Yc	SPL_tot micro (dB)	SPL (1 tour) micro (dB)
12	43.356	7.568	43.356	7.915	66.156	9.510	66.667	9.339	89.2	88.6
10	107.180	4.334	107.180	4.292	188.954	4.502	186.608	4.543	93.7	93.6
11	48.530	11.295	48.530	11.322	84.782	20.809	85.864	21.167	97.2	97.9
9	135.750	3.993	135.750	4.128	322.988	5.148	307.023	5.272	102.0	102.5
24	23.228	7.709	23.228	4.602	33.800	8.241	26.502	4.875	87.1	86.6
22	95.006	3.994	95.006	3.612	189.960	4.867	171.003	5.346	93.6	93.8
23	21.287	21.681	21.287	13.418	53.897	20.615	33.194	12.754	89.0	85.4
21	105.874	5.125	105.874	3.941	264.342	6.327	233.424	4.905	96.9	95.9
16	56.083	9.759	56.083	9.031	75.878	12.360	79.836	10.982	90.0	90.7
14	132.624	4.352	132.624	4.368	290.666	4.293	284.157	4.430	95.4	95.3
15	58.560	14.738	58.560	13.816	103.746	25.763	101.289	30.699	96.4	98.3
13	160.805	5.557	160.805	5.657	460.481	5.620	452.237	5.644	102.9	103.9
28	39.960	7.930	39.960	5.328	56.435	7.166	47.817	4.895	87.4	87.1
26	115.318	4.262	115.318	3.646	278.334	5.957	270.646	11.462	94.3	94.2
27	42.880	15.468	42.880	6.524	67.523	16.295	56.722	6.677	89.9	88.0
25	98.883	6.278	98.883	3.641	300.405	7.223	256.052	5.014	98.4	97.7
20	45.403	8.985	45.403	8.105	27.809	14.669	30.322	15.256	90.8	91.3
18	119.044	4.331	119.044	3.813	89.659	5.508	91.566	4.640	92.7	92.7
19	54.551	14.853	54.551	17.504	65.309	23.687	69.440	24.229	94.3	95.9
17	131.893	5.072	131.893	4.417	171.095	6.795	188.724	6.236	100.1	101.0
30	75.939	4.418	75.939	4.004	77.585	4.612	76.353	3.695	93.2	93.8
31	26.308	17.910	26.308	7.300	25.042	30.008	20.503	7.939	88.9	88.3
29	86.299	4.783	86.299	3.957	103.365	6.988	98.337	6.834	94.9	94.6
36	27.592	5.348	27.592	3.866	37.115	4.600	31.982	3.810	85.7	85.1
34	105.962	3.973	105.962	3.643	137.337	3.755	128.510	3.595	94.7	94.8
35	68.183	13.949	68.183	16.404	77.451	15.947	88.594	20.097	91.0	91.3
33	159.660	5.757	159.660	5.529	203.608	5.656	215.765	5.866	99.5	99.7
48	19.496	3.944	19.496	3.488	22.902	4.055	20.402	3.481	84.7	84.3
46	67.796	4.009	67.796	3.585	103.057	3.947	98.178	3.682	93.7	94.4
47	22.206	8.215	22.206	4.093	27.562	9.870	21.610	3.901	85.4	84.0
45	76.854	4.070	76.854	3.377	102.152	4.001	84.799	3.501	94.6	93.2
40	35.622	5.780	35.622	4.329	45.903	4.965	41.286	3.934	85.9	85.0
38	119.477	3.847	119.477	3.823	166.161	3.791	146.404	3.554	95.0	94.5
39	85.655	17.450	85.655	17.384	95.652	16.876	106.890	20.545	91.2	91.6
37	182.623	6.023	182.623	5.191	232.222	5.146	243.811	5.396	99.9	100.1
52	20.236	3.800	20.236	3.752	22.988	4.284	21.638	4.120	84.7	85.0
50	79.138	3.582	79.138	3.326	97.627	3.944	105.781	3.263	96.2	97.7
51	15.618	8.320	15.618	3.690	24.703	14.342	20.361	3.818	85.0	83.6
49	72.309	5.321	72.309	3.386	108.282	4.238	90.606	3.492	95.8	94.1
44	18.303	4.605	18.303	3.938	17.609	4.494	17.077	3.942	84.6	84.3
42	66.747	3.811	66.747	4.050	61.942	3.612	60.068	3.527	93.4	93.6
43	49.323	12.965	49.323	12.613	47.241	14.516	52.828	13.744	90.1	91.2
41	124.123	5.590	124.123	5.307	115.680	5.595	128.109	5.569	97.3	97.6
56	11.937	4.035	11.937	3.571	11.496	3.826	10.953	3.504	83.7	84.1
54	41.282	3.793	41.282	3.237	51.824	3.834	47.364	3.355	93.3	95.0
55	13.181	8.189	13.181	3.413	15.472	7.657	13.129	3.461	83.8	82.7
53	43.833	4.865	43.833	3.198	69.918	3.978	61.431	3.608	94.7	93.0
60	19.083	8.763	19.083	9.260	15.222	10.587	17.251	10.859	90.3	91.4
58	70.039	4.242	70.039	3.798	60.406	4.510	63.770	3.981	92.8	93.1
59	38.180	11.218	38.180	11.222	54.131	20.303	58.928	18.036	92.5	93.4
57	112.220	4.750	112.220	4.554	137.163	7.272	153.538	6.464	98.7	98.8
72	10.332	4.704	10.332	4.704	9.235	3.880	9.199	3.697	88.0	88.0
70	76.745	4.094	76.745	3.932	63.951	3.857	68.681	3.602	92.9	93.1
71	11.021	17.283	11.021	3.874	14.453	15.337	11.941	3.297	87.9	88.4
69	87.976	5.072	87.976	3.670	84.734	7.020	76.530	3.381	93.6	93.3
64	20.182	7.521	20.182	5.905	21.985	10.181	23.140	9.667	91.2	91.7
62	70.082	3.959	70.082	3.873	85.456	4.716	87.612	4.350	93.7	93.8
63	40.673	11.623	40.673	10.333	68.504	19.365	74.663	19.038	94.1	95.1
61	104.599	4.188	104.599	4.076	177.582	6.800	191.588	6.111	100.2	100.9
76	10.063	5.149	10.063	3.915	9.875	4.507	9.608	3.592	88.8	88.9
74	58.891	3.985	58.891	3.515	69.017	3.702	68.827	3.426	93.3	93.2
75	10.864	30.004	10.864	4.404	16.962	34.844	12.468	3.875	88.4	88.3
73	66.161	4.662	66.161	3.734	85.631	7.565	78.738	3.604	93.2	93.6
68	20.683	10.517	20.683	7.870	13.099	11.260	13.915	8.254	90.7	91.2
66	86.981	4.938	86.981	4.192	48.455	4.536	51.316	3.989	92.7	93.1
67	46.407	14.661	46.407	13.443	44.450	21.054	50.816	17.140	91.4	92.8
65	158.277	6.772	158.277	5.557	112.852	7.797	127.137	7.088	97.7	98.7
77	111.706	6.822	111.706	4.364	70.185	5.825	78.125	3.867	93.1	93.6
84	8.797	5.206	8.797	4.274	11.904	5.059	13.929	4.362	84.4	84.4
82	27.224	3.863	27.224	3.783	64.246	3.870	57.974	3.248	96.1	97.5
83	19.774	12.952	19.774	11.769	40.520	13.960	39.506	10.813	90.8	87.3
81	55.021	5.061	55.021	5.377	109.109	4.396	117.630	4.234	99.5	99.0
96	5.876	3.836	5.876	3.414	10.440	3.981	10.071	3.335	83.9	84.0
94	18.816	3.554	18.816	3.078	55.036	3.596	55.727	3.321	94.7	95.8
95	7.589	5.454	7.589	3.605	14.583	5.087	12.935	3.364	84.8	84.5
93	26.839	3.568	26.839	3.505	74.772	3.477	67.122	3.433	95.9	93.3
88	8.893	4.608	8.893	4.136	16.282	4.383	17.178	4.185	84.5	85.2
86	28.461	3.826	28.461	3.136	75.622	3.678	78.248	3.137	95.0	95.8
87	22.586	13.368	22.586	11.376	46.159	14.797	51.048	16.756	91.6	87.9
85	54.153	5.175	54.153	5.660	121.314	4.504	120.117	4.649	99.5	101.4
100	5.134	3.675	5.134	3.451	10.674	3.737	9.222	3.640	83.9	83.9
98	18.505	3.332	18.505	3.281	62.470	3.546	55.477	3.512	95.0	96.1
99	7.290	6.864	7.290	3.585	16.145	5.725	14.232	3.425	84.2	82.5
97	24.245	4.267	24.245	3.539	86.013	3.720	65.713	3.416	95.6	93.5
90	7.955	4.511	7.955	4.446	12.197	4.384	13.312	4.349	84.8	85.6
92	8.066	4.511	8.066	4.021	12.197	4.384	13.246	3.989	84.8	84.9
91	19.430	11.793	19.430	9.575	39.051	15.093	41.531	12.509	91.3	87.8
89	50.145	5.085	50.145	4.711	103.531	4.957	109.840	4.670	98.9	98.4
104	4.584	3.714	4.584	3.349	8.850	3.907	7.884	3.392	83.8	84.3
102	17.207	3.452	17.207	3.081	50.905	3.608	51.621	3.135	94.1	95.2
103	6.194	6.378	6.194	3.278	13.161	4.520	11.704	3.182	84.5	82.7
101	23.587	3.938	23.587	3.746	65.798	3.490	59.730	3.488	96.2	93.5

ANALYSES VIBRATOIRES ET ACOUSTIQUES DU DÉROULAGE

RÉSUMÉ : Les processus de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière s'accompagnent de nombreux phénomènes vibro-acoustiques à la fois source de nuisances mais aussi révélant des informations utiles sur la coupe et sur la qualité du processus en cours. Dans le cas du déroulage, les opérateurs sont capables d'ajuster « à l'oreille » certains réglages de la machine en cours d'usinage. Une enquête auprès de professionnels a permis de cibler des modalités expérimentales, susceptibles de créer les situations caractéristiques pour les opérateurs.

Des essais de déroulage ont été conduits sur la microdérouleuse du LABOMAP à partir de deux essences homogènes (hêtre et peuplier) et d'un matériau de référence (PTFE).

Cette première étude a permis, dans des conditions contrôlées, l'identification de la signature de l'ouverture des fissures de déroulage dans les domaines temporel et fréquentiel. Les influences des paramètres de coupe sur le mécanisme de fissuration ont pu être clarifiées ou confirmées.

La caractérisation de la qualité du bois à l'état vert demeure un problème, tant du point de vue technique que normatif. Le principe d'un outil simple de mesure de la position effective des fissures sur le placage a été proposé à partir de données vibratoires.

Le comportement vibratoire et acoustique de la microdérouleuse en fonction des paramètres de coupe (épaisseur du placage, angle de dépouille, vitesse de coupe, taux de compression de la barre, essence, usure de l'outil) a été analysé dans les domaines temporels et fréquentiels.

La prochaine étape passe par la validation de résultats obtenus à l'échelle d'un billon sur une dérouleuse de type industriel.

Mots-Clés : Déroulage, Microdéroulage, Bois homogènes, Fissuration, Efforts, Vibrations, Acoustique, Traitement du signal.

VIBRO-ACOUSTIC ANALYSIS OF WOOD PEELING PROCESS

ABSTRACT : Working material process generate vibro-acoustic phenomena which are in one hand sources of noise and in the other hand useful information describing the state of the cut. In the case of the peeling process, operators are able to check some settings of their device "hearing the noise". A survey from workers' knowledge was conducted to identify typical situation they can identify.

Peeling trials were conducted on both two homogeneous species (beech and poplar) and a reference' material (PTFE) while using the microlathe of the LABOMAP.

This first study, carried in very controlled conditions, allows identifying lathe check signature in both time and spectral domain. Influence of the process parameters on lathe check phenomenon were clarified or confirmed.

The green wood quality characterization is still a problem today on both technical and normative point of view. The principle of a simple procedure based on vibratory measurements was proposed to determine the position of the checks along the veneer.

The vibro-acoustic behaviour of the microlathe as regard to cutting parameters (veneer thickness, clearance angle, cutting speed, pressure rate of the pressure bare, species, tool wear) was analysed in both temporal and spectral area.

The following stage is to validate results obtained on a bolt for an industrial lathe type.

Keywords : Peeling, Microlathe, Homogeneous species, Lathe checks, Forces, Vibrations, Acoustic, Signal processing.