



HAL
open science

Contribution à l'étude de l'influence de l'usure sur le bruit de frottement des étoffes : approches instrumentales et sensorielles

Floriane Leclinche

► **To cite this version:**

Floriane Leclinche. Contribution à l'étude de l'influence de l'usure sur le bruit de frottement des étoffes : approches instrumentales et sensorielles. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2019. Français. NNT : 2019MULH2984 . tel-03606369

HAL Id: tel-03606369

<https://theses.hal.science/tel-03606369v1>

Submitted on 11 Mar 2022

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.

Année 2019

UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE

Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles – LPMT

Ecole doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur (ED 269)

THESE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE

Discipline : Mécanique

Présentée et soutenue publiquement

Par

Floriane LECLINCHE

Le 20 Novembre 2019

Contribution à l'étude de l'influence de l'usure sur le bruit de frottement des étoffes : Approches instrumentales et sensorielles

Jury :

Dr. Boubaker JAOUACHI	ENIM, Tunisie	Examineur
Prof. Catherine DACREMONT	AgroSup, Dijon	Rapporteur
Prof. Xianyi ZENG	ENSAIT/Gemtex, Roubaix	Président / Rapporteur
Prof. Dominique ADOLPHE	ENSISA/LPMT, Mulhouse	Directeur de thèse
Dr. Emilie DREAN	ENSISA/LPMT, Mulhouse	Encadrante de thèse
Dr. Véronique ZIMPFER	ISL, Saint- Louis, Mulhouse	Encadrante de thèse
Prof. Laurence SCHACHER	ENSISA/LPMT, Mulhouse	Invitée

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier la Région Grand-Est et l'Institut de recherche de Saint-Louis pour avoir financé ces travaux.

Cette étude ayant été réalisée en collaboration entre le Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles et l'Institut franco-allemand de recherche de Saint-Louis, je tiens à remercier tous les membres de ces deux institutions pour leur accueil durant mes trois années de thèse.

J'exprime toute ma reconnaissance à mes directeurs et encadrants de thèse, le Professeur Dominique Adolphe, Mme Emilie Drean et Mme Véronique Zimpfer, pour leur aide, leur disponibilité, leurs encouragements et la confiance qu'ils m'ont témoignée tout au long de cette étude. Je remercie également le Professeur Laurence Schacher pour ses conseils et sa contribution à l'étude.

Je voudrais remercier les rapporteurs et examinateurs de cette thèse, le Professeur Catherine Dacremont, le Professeur Xianyi Zeng et Mr Boubaker Jaouachi pour le temps qu'ils ont accordé à mes travaux.

Mes remerciements vont également aux membres du panel sensoriel pour leur disponibilité et leur motivation constante lors de cette étude.

Je remercie tous mes collègues de l'ISL et du LPMT qui ont de près ou de loin contribué à cette thèse. Je remercie également l'ensemble des doctorants Carole, Elise, Wafa, Clément, Claire et Kevin pour les moments partagés et leur bonne humeur quotidienne. Un grand merci à Charles pour ses conseils et à Céline pour la relecture du mémoire.

Enfin, mes derniers remerciements vont à ma famille et à Xavier pour leur soutien et leurs encouragements permanents.

Table des matières

Liste des Figures	9
Liste des Tableaux.....	12
Glossaire.....	13
Introduction	17
Chapitre I. Revue Bibliographique.....	21
1. Généralités sur le frottement.....	22
1.1 Phénomène de frottement textile.....	22
1.2 Bruits de friction engendrés par frottement.....	24
1.3 Usure des surfaces textiles	28
1.3.1 Abrasion	28
1.3.2 Entretien	30
2. Généralités sur le son	31
2.1 Distinction entre son et bruit	31
2.1.1 Sons purs et complexes	32
2.1.2 Définition du bruit.....	33
2.2 Intensité acoustique	34
2.3 Perception du son	35
2.3.1 Anatomie de l'oreille humaine	35
2.3.2 Intensité physiologique	37
2.3.3 Système de pondération	39
3. Analyse des signaux sonores.....	41
3.1 Analyse spectrale.....	41
3.2 Transformation de Fourier	41
3.2.1 Échantillonnage	43
3.2.2 Fenêtrage	44
3.3 Analyse en <i>1/nième</i> d'octave.....	44

4. Analyse sensorielle.....	46
4.1 Méthodes d'analyse sensorielle.....	47
4.2 Profil sensoriel conventionnel	48
4.2.1 Choix des panélistes	49
4.2.2 Etablissement de la liste des descripteurs	50
4.2.3 Contrôle des performances du panel	52
4.3 Applications de l'analyse sensorielle	54
5. Traitement statistiques des données	56
5.1 Outils statistiques	56
5.2 Analyse de corrélation.....	58
5.3 Analyse de la variance (ANOVA)	58
5.4 Analyse en Composantes Principales (ACP)	59
Chapitre II. Matériels et Méthodes.....	63
1. Caractérisation des étoffes testées	64
1.1 Présentation des étoffes	64
1.2 Données mesurées par la chaîne d'évaluation KES-FB.....	65
1.2.1 Mesures des paramètres physiques	65
2. Méthodes d'usure des étoffes	70
2.1 Méthode de lavage	70
2.2 Abrasion par procédé Martindale	72
3. Mesure instrumentale des bruits de friction.....	74
3.1 Dispositif expérimental	74
3.2 Modifications apportées au dispositif	77
3.3 Etalonnage et répétabilité des mesures.....	78
3.4 Déroulement des essais expérimentaux.....	81
3.4.1 Enregistrement du bruit	81
3.4.2 Analyse du bruit	82
4. Analyse sensorielle.....	84
4.1 Etude réalisée par Yosouf	84
4.2 Choix des nouveaux panélistes	86
4.3 Entraînement des panélistes	88

4.3.1 Première séance d'entraînement.....	88
4.3.2 Contrôle des performances des panélistes sur les séances suivantes	91
Chapitre III. Etude de l'influence de l'entretien des étoffes	103
1. Caractérisation de l'étoffe n°1	104
1.1 Caractérisation physique	104
1.1.1 Premières observations de la dégradation de l'étoffe.....	104
1.1.2 Analyse de la surface de l'étoffe	105
1.1.3 Propriétés de compression et de surface	106
1.2 Caractérisation instrumentale	108
1.2.1 Signature acoustique des signaux sonores	108
1.2.2 Spectres sonores des bruits de frottement	109
1.2.3 Analyse en 1/6 d'octave	111
1.3 Caractérisation sensorielle de l'étoffe	112
1.4 Corrélations de l'ensemble des données	114
1.4.1 Corrélations entre les paramètres mesurés par KES-F et les propriétés sonores	115
1.4.2 Corrélations entre les paramètres mesurés par KES-F et les propriétés sensorielles	118
1.4.3 Corrélations entre les propriétés sonores et sensorielles	121
1.4.4 Synthèse des corrélations	123
2. Généralisation des résultats et comparaison de l'ensemble des étoffes.....	127
2.1 Caractérisation physique des étoffes	127
2.2 Caractérisation instrumentale	128
2.2.1 Signatures acoustiques	128
2.2.2 Niveau sonore global des bruits de frottement.....	130
2.3 Caractérisation sensorielle.....	131
2.3.1 Profils sensoriels des étoffes brutes	131
2.3.2 Influence du lavage sur l'évaluation sensorielle	131
2.4 Etude des corrélations	132

Chapitre IV. Etude de l'influence de l'abrasion des étoffes.....	135
1. Etude de l'influence de l'abrasion sur l'étoffe 1.....	136
1.1 Caractérisation physique	136
1.1.1 Analyse de la surface.....	136
1.1.2 Propriétés mesurées par le KES-F.....	137
1.2 Caractérisation sonore	139
1.2.1 Signature acoustiques des échantillons	139
1.2.2 Analyse des signaux sonores.....	140
1.2.3 Paramètres sonores des bruits de frottements	141
1.3 Caractérisation sensorielle.....	143
1.4 Analyse des corrélations par Analyse en Composantes Principales	144
1.5 Comparaison de l'influence du lavage et de l'abrasion sur les bruits de frottement de l'étoffe 1	147
2. Etude sur l'ensemble du panel d'étoffe	148
2.1 Caractérisation sonore	148
2.2 Caractérisation sensorielle.....	149
2.3 Analyses en Composantes Principales	150
3. Conclusions	151
Conclusions et Perspectives	153
Bibliographie.....	159
Annexes	165
Annexe A. Audiogrammes individuels du panel.....	166
Annexe B. Formulaire d'évaluation sensorielle	170
Annexe C. Influence du lavage – Caractérisation sonore	172
Annexe D. Influence du lavage – Caractérisation sensorielle	174
Annexe E. Influence de l'abrasion – Caractérisation sonore	176
Annexe F. Influence de l'abrasion – Caractérisation sensorielle.....	178

Liste des Figures

<i>Figure 1 : Dispositif de génération des bruits de friction conçu par Walter</i>	24
<i>Figure 2 : Dispositif développé par Fujimoto</i>	25
<i>Figure 3 : Dispositif utilisé par Yi et Cho (MAFN)</i>	25
<i>Figure 4 : Dispositif de Cooper</i>	26
<i>Figure 5 : Appareil conçu par Latroch</i>	27
<i>Figure 6 : Conséquences d'une usure abrasive sur une surface textile (photo LPMT) [30]</i>	29
<i>Figure 7 : Exemples de vibrations sonore et de leur spectre pour différents sons [18]</i>	32
<i>Figure 8 : Echelle de bruit de différentes sources sonores en dB [42]</i>	35
<i>Figure 9 : Schéma du système auditif humain [44]</i>	36
<i>Figure 10 : Courbes isosoniques</i>	38
<i>Figure 11 : Sonie en fonction du niveau sonore à la fréquence de 1000 Hz</i>	39
<i>Figure 12 : Courbes de pondération A, B et C</i>	40
<i>Figure 13 : Représentation d'un signal périodique et de son spectre discret après transformation de Fourier</i>	42
<i>Figure 14 : Echantillonnage d'un signal dans le domaine temporel et fréquentiel</i>	44
<i>Figure 15 : Schéma de la largeur de bande sur une échelle linéaire et logarithmique</i>	46
<i>Figure 16 : Exemple de profil sensoriel [57]</i>	48
<i>Figure 17 : Protocole de recherche et de sélection de descripteurs en vue de l'établissement de profil sensoriel conventionnel [57]</i>	49
<i>Figure 18 : Evolution des paramètres de LPE et du CV en fonction du nombre de mesures réalisées</i> 57	
<i>Figure 19 : Exemple de représentation graphique des variables en ACP [81]</i>	61
<i>Figure 20 : Armures des étoffes analysées</i>	65
<i>Figure 21 : Courbe de compression</i>	67
<i>Figure 22 : Module KES - FB3</i>	67
<i>Figure 23 : Diagramme de compression et de relaxation donné par le KES-FB3</i>	68
<i>Figure 24 : Mécanisme du module de compression FB-3</i>	68
<i>Figure 25 : Module KES – FB4</i>	69
<i>Figure 26 : Diagramme décrivant l'état de surface d'une étoffe et principe de mesure du dispositif</i> ..	69
<i>Figure 27 : Dispositif Martindale</i>	72
<i>Figure 28 : Courbe de Lissajous</i>	72
<i>Figure 29 : Illustration de la rupture de l'étoffe</i>	73
<i>Figure 30 : Dispositif expérimental</i>	74
<i>Figure 31 : Méthode d'analyse du mouvement du bras [6]</i>	75
<i>Figure 32 : Exemples d'empreinte de peinture pour deux vitesses de déplacement</i>	75

<i>Figure 33 : Positionnement du capteur de pression</i>	<i>76</i>
<i>Figure 34 : Dispositif expérimental de génération du bruit des étoffes.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 35 : Courbe d'étalonnage du moteur.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 36 : Plan d'échantillonnage.....</i>	<i>79</i>
<i>Figure 37 : Spectres sonores des 15 mesures (échantillon 1).....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 38 : Spectres moyens des trois échantillons</i>	<i>81</i>
<i>Figure 39 : Obtention du spectre sonore du bruit de frottement.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 40 : Représentation en sixième d'octave.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 41 : Courbes références à 10 et 90 % des seuils d'audition d'un homme de 30 ans données par la norme.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 42 : Evolution des seuils audiométriques pour les hommes en fonction de l'âge</i>	<i>87</i>
<i>Figure 43 : Exemple d'un audiogramme d'un panéliste (26 ans).....</i>	<i>88</i>
<i>Figure 44 : Notes attribuées à l'ensemble des descripteurs lors de la première séance pour chaque panéliste</i>	<i>91</i>
<i>Figure 45 : Répétabilité du panéliste P3.....</i>	<i>92</i>
<i>Figure 46 : Répétabilité du panéliste P6.....</i>	<i>93</i>
<i>Figure 47 : Indice moyen de répétabilité des panélistes</i>	<i>94</i>
<i>Figure 48 : Répétabilité du panel pour une étoffe</i>	<i>95</i>
<i>Figure 49 : ACP des réponses sensorielles moyennes des panélistes lors de l'entraînement.....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 50 : Indice d'homogénéité des panélistes à la fin de la phase d'entraînement</i>	<i>100</i>
<i>Figure 51 : Observation de la dégradation de la surface de l'étoffe.....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 52 : Perte de masse de l'étoffe au cours des cycles de lavages successifs</i>	<i>105</i>
<i>Figure 53 : Photo de la surface des échantillons.....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 54 : Comportement en compression des échantillons lavés (étoffe 1).....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 55 : Paramètres de surface de Kawabata des échantillons (étoffe 1)</i>	<i>107</i>
<i>Figure 56 : Signature acoustique de l'étoffe brute.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 57 : Signature acoustique de l'Ech 5.....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 58 : Spectres sonores des bruits de frottement</i>	<i>109</i>
<i>Figure 59 : Courbe d'évolution du niveau sonore total en fonction du nombre de lavages.....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 60 : Analyse en 1/6 d'octave des bruits de frottement des différents échantillons lavés.....</i>	<i>111</i>
<i>Figure 61 : Profil sensoriel de l'étoffe brute.....</i>	<i>113</i>
<i>Figure 62 : Profils sensoriels des échantillons selon le nombre de lavages subis.....</i>	<i>113</i>
<i>Figure 63 : ACP des paramètres sur les dimensions F1 et F2 (85,27%).....</i>	<i>115</i>
<i>Figure 64 : ACP des paramètres sur les dimensions F1 et F3 (69,41%).....</i>	<i>115</i>
<i>Figure 65 : ACP des données représentée sur les dimensions F1 et F2 (84,82%)</i>	<i>118</i>
<i>Figure 66 : ACP des données représentée sur les dimensions F1 et F3 (73,44%)</i>	<i>118</i>
<i>Figure 67 : ACP des données représentée sur les dimensions F1 et F2 (85,76%)</i>	<i>121</i>

<i>Figure 68 : ACP des données représentée sur les dimensions F1 et F3 (72,3%)</i>	121
<i>Figure 69 : Cercle de corrélation de l'espace perceptif</i>	123
<i>Figure 70 : Cercle de corrélation de l'espace perceptif après réduction des variables</i>	124
<i>Figure 71 : Cercle de corrélation simplifié</i>	124
<i>Figure 72 : Espace produit des échantillons lavés</i>	126
<i>Figure 73 : Paramètres de compression Kawabata des étoffes étudiées</i>	127
<i>Figure 74 : Paramètres de surface Kawabata des étoffes étudiées</i>	128
<i>Figure 75 : Signatures acoustiques des bruits de frottement des étoffes</i>	129
<i>Figure 76 : Evolution du niveau sonore global pour l'ensemble des étoffes</i>	130
<i>Figure 77 : Profils sensoriels des étoffes brutes</i>	131
<i>Figure 78 : Profils des échantillons de l'étoffe 4</i>	132
<i>Figure 79 : Surface des échantillons observées à la loupe binoculaire</i>	137
<i>Figure 80 : Paramètres de compression des échantillons abrasés de l'étoffe 1</i>	138
<i>Figure 81 : Paramètres de surface des échantillons abrasés de l'étoffe 1</i>	138
<i>Figure 82 : Signatures acoustiques des échantillons de l'étoffe 1</i>	139
<i>Figure 83 : Analyse en 1/6 d'octave des échantillons de l'étoffe 1</i>	140
<i>Figure 84 : Evolution du niveau sonore global des bruits de frottement de l'étoffe 1 en fonction du nombre de cycles d'abrasion</i>	142
<i>Figure 85 : Bandes passantes des échantillons abrasés (étoffe 1)</i>	143
<i>Figure 86 : Caractérisation sensorielle des échantillons abrasés (étoffe 1)</i>	144
<i>Figure 87 : Cercle de corrélation déterminé par ACP</i>	145
<i>Figure 88 : Cercle de corrélations après réduction du nombre de variables</i>	146
<i>Figure 89 : Espace produit des échantillons abrasés de l'étoffe 1</i>	147
<i>Figure 90 : Evolution de L_g en fonction du nombre de cycles d'abrasion</i>	148

Liste des Tableaux

<i>Tableau 1 : Qualification des sons selon leurs fréquences</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 2 : Exemple de pondération d'un bruit rose.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 3 : Fréquences normalisées pour l'analyse par octave et tiers d'octave</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 4 : Caractéristiques des étoffes étudiées</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 5 : Paramètres mesurés par le système Kawabata Evaluation System</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 6 : Composition du détergent de référence n°3[43].....</i>	<i>71</i>
<i>Tableau 7 : Gamme des cycles d'abrasion pour chacune des étoffes.....</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 8 : Conditions expérimentales de frottement.....</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 9 : Coefficients de corrélation entre les mesures</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 10 : Liste des descripteurs établie par Yosouf [7]</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 11 : Indice de répétabilité des panélistes</i>	<i>94</i>
<i>Tableau 12 : Pouvoir de discrimination des panélistes</i>	<i>96</i>
<i>Tableau 13 : Indice de discrimination du panel pour la première et la dernière répétition.....</i>	<i>97</i>
<i>Tableau 14 : Homogénéité des réponses des panélistes (valeur P-value ANOVA à deux facteurs).....</i>	<i>98</i>
<i>Tableau 15 : Références positives et négatives des descripteurs</i>	<i>99</i>
<i>Tableau 16 : Liste des descripteurs utilisée pour la caractérisation sensorielle</i>	<i>101</i>
<i>Tableau 17 : Dénomination des échantillons lavés.....</i>	<i>104</i>
<i>Tableau 18 : Propriétés sonores des échantillons</i>	<i>110</i>
<i>Tableau 19 : Coefficients de variation entre le spectre de l'étoffe brute (Ech0) et le spectre de l'Ech i</i>	<i>112</i>
<i>Tableau 20 : Matrice des coefficients de Pearson</i>	<i>117</i>
<i>Tableau 21 : Matrice des coefficients de Pearson (ACP paramètres Kawabata / descripteurs).....</i>	<i>119</i>
<i>Tableau 22 : Matrice des coefficients de Pearson</i>	<i>122</i>
<i>Tableau 23 : Synthèse des corrélations entre les paramètres mesurés.....</i>	<i>125</i>
<i>Tableau 24 : Coefficient de variation du niveau sonore</i>	<i>130</i>
<i>Tableau 25 : Synthèse des corrélations existantes entre les différents paramètres mesurés</i>	<i>133</i>
<i>Tableau 26 : Gamme des cycles d'abrasion réalisé pour cette étoffe.....</i>	<i>136</i>
<i>Tableau 27 : Coefficients de variation entre le spectre de l'étoffe brute et celui des autres échantillons</i>	<i>141</i>
<i>Tableau 28 : Paramètres sonores des échantillons abrasés de l'étoffe 1</i>	<i>141</i>
<i>Tableau 29 : Variation du niveau sonore global de chaque étoffe</i>	<i>149</i>
<i>Tableau 30 : Synthèse des corrélations dans le cadre de l'abrasion.....</i>	<i>150</i>

Glossaire

Ce glossaire reprend les définitions des termes principaux concernant le domaine du textile et de l'acoustique à l'aide des normes G00-001[1], NF S30-101 [2], NF S30-105 [3] et NF D30-107 [4].

Armure	Mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame dans une structure tissée
Bruit blanc	Bruit présentant la même énergie pour l'ensemble des fréquences audibles
Bruit de fond	Toute composante sonore qui influe sur les mesures en venant se superposer au signal étudié
Bruit rose	Bruit présentant une énergie constante par unité d'intervalle logarithmique
Chaîne	Ensemble de fils parallèles entre eux et disposés dans le sens longitudinal du tissu
Contexture	Dénomination d'une étoffe indiquant le compte, le duitage et le titre et la matière des fils
Emerisage	Apprêt mécanique conférant un toucher « peau de pêche » au textile par contact avec un cylindre tournant recouvert d'émeri
Enduction	Dépôt d'un apprêt à la surface d'une étoffe lui conférant des caractéristiques particulières
Etoffe	Terme générique désignant toute surface textile constituée par un assemblage de fils quel que soit le procédé de fabrication utilisé (tissage, tricotage ..)
Grattage	Méthode consistant à arracher les fibres en surface des tissus afin de leur conférer un côté plus moelleux et épaisseur différente
Octave	Au sens strict, il s'agit de l'intervalle caractérisé par un rapport de fréquences égal à 2/1
Seuil sensoriel	Niveau d'intensité minimum d'un stimulus sensoriel afin de déclencher une réponse nerveuse
Spectre acoustique	Ensemble, ordonné en fonction de la fréquence, des amplitudes ou encore des composantes sinusoïdales d'une vibration acoustique

Stimulus sensoriel	Facteur permettant de déclencher une réponse sensorielle par l'excitation d'un récepteur
Tex	Unité internationale équivalent au rapport de la masse en grammes de mille mètres de fil
Titre	Mesure normalisée de la masse linéique de toute structure textile linéaire, le plus souvent exprimée en Tex.
Trame	Ensemble de fils disposé dans le sens transversal du tissu (perpendiculairement aux fils de chaîne)

Introduction

Dans le domaine textile, les perceptions sensorielles des consommateurs vis-à-vis des produits sont grandement étudiées. En effet, selon les applications du produit (habillement, ameublement ou encore applications techniques), la perception et les attentes des consommateurs ne sont pas identiques. Il est donc intéressant de chercher à caractériser ces perceptions qui peuvent être visuelles, tactiles ou encore auditives.

En effet, les produits textiles, notamment les vêtements, sont sujets à de nombreux frottements qui génèrent des bruits de friction. Ces bruits sont parfois sources de désagréments pour le consommateur, comme par exemple le bruit émis par une veste imperméable. A contrario, le bruit caractéristique de la soie est généralement recherché et apprécié des clients. La qualité sonore des bruits des étoffes a ainsi commencé à être étudiée vers 1960, puis d'autres études menant à la caractérisation physique et sensorielle des bruits de frottement des étoffes ont été entreprises au début des années 2000 [5].

Dans ce contexte, des travaux récents concernant les bruits de frottement ont été menés au sein du Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles (LPMT) [6], [7]. La première étude a porté sur la conception d'un système de génération et d'enregistrement du bruit de frottement reproduisant le mouvement du bras lors d'un déplacement. Pour cela, le mouvement des bras a été analysé et les paramètres essentiels au mouvement tels que sa vitesse ou la surface de frottement ont été déterminés. Les conditions de génération des bruits ont été déterminées pour trois vitesses de déplacement. Par la suite, une deuxième étude a permis d'analyser les signaux sonores des bruits de frottement d'étoffes d'armures et de matières différentes par un traitement du signal spécifique et par analyse sensorielle. L'évaluation sensorielle a été mise en œuvre par la constitution d'un panel sensoriel et l'établissement d'une liste de descripteurs spécifiques. Enfin, cette étude a permis de comparer le bruit de deux types de vestes présentant deux variantes de manches.

Selon le type ou le domaine d'utilisation des étoffes, les bruits de friction ne sont pas perçus de la même façon. Dans le cadre d'applications militaires, le concept de vêtement furtif est intéressant. Les travaux recensés dans la littérature concernant ce concept portent pour la plupart sur la furtivité visuelle du vêtement mais très peu sur sa furtivité acoustique. Pourtant, le militaire en se déplaçant génère des frottements étoffe contre étoffe qui sont sources de bruit. Ces bruits peuvent être gênants lors des déplacements du militaire. Ces bruits de frottement dépendent de nombreux paramètres, propres notamment à l'étoffe utilisée et aux conditions d'usage de celle-ci.

Notre étude s'inscrit dans la continuité des travaux menés précédemment au sein du LPMT en collaboration avec l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL). L'objectif principal est d'analyser les bruits générés par le frottement étoffe contre étoffe d'un vêtement militaire au cours de son cycle de vie, en prenant notamment en compte les conditions d'usage. Ainsi, l'influence de l'usure par abrasion et de l'entretien du vêtement (lavage) sur le bruit de frottement sera étudiée. Dans l'optique de placer le ressenti du combattant au cœur de la problématique, les caractéristiques de ces bruits seront étudiées parallèlement de manière instrumentale et sensorielle, puis corrélées aux caractéristiques mécaniques et structurelles des étoffes étudiées.

La présentation de cette étude est composée de quatre chapitres distincts.

Dans le premier chapitre, l'état de l'art est présenté à partir d'une étude bibliographique poussée. Le sujet principal de notre étude étant les bruits de frottement des étoffes, le phénomène de frottement et ses conséquences sur les étoffes, c'est-à-dire la génération de bruits et l'usure de la surface, sont décrits. La caractérisation et la perception du son par l'oreille sont également détaillées afin de comprendre les mécanismes psychoacoustiques mis en jeu. Ensuite, les deux approches instrumentale et sensorielle choisies pour caractériser les bruits de frottement sont amplement présentées. Enfin, les outils et analyses statistiques utilisés au cours de cette étude afin de traiter les données sont décrits.

Le second chapitre du manuscrit décrit essentiellement les méthodes et matériels utilisés au cours de ce travail. Dans un premier temps, les étoffes sélectionnées pour l'étude et leurs caractéristiques principales sont présentées. A partir de ces étoffes, des jeux d'échantillons de degrés d'usure différents ont été obtenus par abrasion et par lavage. Les protocoles expérimentaux sont exposés dans cette partie. Puis le dispositif expérimental de génération et d'enregistrement des bruits de frottement est présenté, de même que les modifications que nous avons apportées au mécanisme. Enfin, la méthode d'analyse descriptive quantitative utilisée en analyse sensorielle est décrite, tout comme l'entraînement du panel sensoriel qui en découle.

Puis les chapitres III et IV présenteront les résultats et analyses de l'étude. Le troisième chapitre se concentre exclusivement sur l'influence de l'entretien des étoffes sur les bruits de frottement. Pour cela, la caractérisation sonore et sensorielle des bruits est détaillée. Dans un premier temps, les résultats d'une seule étoffe sont expliqués de manière détaillée, puis les résultats sont généralisés à l'ensemble des étoffes de l'étude. L'étude des corrélations existantes, par analyses en composantes principales, entre les paramètres sonores, sensorielles et mécaniques est

également exposée dans ce chapitre. Le chapitre IV traite quant à lui de l'impact de l'abrasion sur les bruits de frottement. Cette partie de l'étude a été réalisée de façon analogue à celle du lavage en termes de caractérisation des bruits de friction et des analyses statistiques menées sur l'ensemble des paramètres ; le chapitre est, de ce fait, structuré comme le chapitre III

Enfin, les conclusions générales de cette étude sont synthétisées et les perspectives d'études envisageables sont décrites. Ces perspectives concernent aussi bien les étoffes et le dispositif expérimental que le panel sensoriel.

Chapitre I. Revue Bibliographique

Ce premier chapitre a pour objectif d'introduire l'état de l'art de ce travail. Notre objet d'étude étant les bruits de frottement des étoffes, les deux premières parties se focaliseront sur les phénomènes de frottement, d'usure des surfaces textiles, de perception et de caractérisation du son. Ensuite, les deux approches choisies pour l'étude de ces bruits, à savoir l'analyse des signaux sonores et l'analyse sensorielle, seront présentées. Enfin, les différents outils et analyses statistiques permettant le traitement des données issues de ces deux approches seront détaillés.

1. Généralités sur le frottement

1.1 Phénomène de frottement textile

Le phénomène de frottement est un phénomène physique étudié depuis longtemps [8] car il est l'un des facteurs majeurs de la dégradation des matériaux. Plusieurs types de frottement peuvent être distingués dans le cadre des frottements textiles : le frottement fibre-fibre [9], le frottement fil-fil [10], le frottement métal-étoffe et enfin le frottement étoffe-étoffe [7]. En s'appuyant sur notre problématique, nous nous sommes exclusivement intéressés au frottement étoffe-étoffe entre deux étoffes de même nature.

Les premières lois régissant la friction ont été établies par Amontons en 1699 [11]. Il a mis en évidence une relation linéaire entre la force de frottement (F) et la charge normale appliquée (N), le rapport des deux définissant le coefficient de friction noté μ .

$$F = \mu N \quad (1)$$

Cependant, il a été montré que cette relation ne pouvait s'appliquer dans le cas de frottements textiles [12]. C'est en 1963 que Wilson [13] a étudié la dynamique du frottement entre deux étoffes afin de modéliser le phénomène. Il a ainsi pu établir une relation entre la force de frottement et la charge normale appliquée (2)

$$\log\left(\frac{F}{A}\right) = C + n \cdot \log\left(\frac{N}{A}\right) \quad (2)$$

Avec F la force de frottement, A la surface apparente de contact, C le paramètre de friction, n l'indice de frottement qui dépend du type de la matière textile et N la charge normale appliquée. Wilson a démontré que les deux paramètres C et n sont dépendants du nombre d'aspérités de la surface de contact. De plus, le rapport entre C et n définit le facteur de frottement R .

Le frottement textile peut être influencé par de nombreux paramètres, les trois paramètres majeurs étant :

- La vitesse de frottement,
- La charge appliquée,
- La surface de frottement.

Concernant la vitesse de frottement, il a été montré qu'elle n'a pas la même influence sur le coefficient de frottement statique et dynamique [14]. Une augmentation de la vitesse de frottement implique une augmentation régulière du coefficient de frottement statique alors qu'elle n'a pas d'influence significative sur le coefficient de frottement dynamique. Selon les études de Ajayi *et al.* [15], la géométrie de l'étoffe va grandement influencer le lien entre la vitesse de frottement et le coefficient de friction.

Il a également été établi que d'autres propriétés telles que la pression pouvait modifier les paramètres du frottement. En effet, une augmentation de la pression, c'est-à-dire, une charge appliquée plus importante, va nécessairement augmenter le nombre de points de contact entre les fils du tissu et donc accroître le coefficient de frottement [16]. De plus, l'influence de la charge appliquée sera d'autant plus importante si la vitesse de frottement est élevée [17].

Concernant la surface de frottement, les paramètres de surface des étoffes, comme la rugosité géométrique, vont nécessairement influencer le frottement. Une plus grande surface de frottement entre deux étoffes va engendrer une augmentation des interactions entre les deux matériaux et un frottement plus important [11]. L'ensemble de ces paramètres est lié au coefficient de frottement des étoffes qui conditionne fortement le frottement textile/textile mais ce coefficient dépend également d'autres paramètres.

Dans la plupart des applications textiles, afin de répondre au cahier des charges, les étoffes subissent des traitements de surface ; ces traitements vont nécessairement influencer sur leurs propriétés notamment sur le coefficient de frottement. On peut, par exemple, diminuer le coefficient de friction grâce à un traitement par adoucissant alors qu'un mercerisage aura plutôt tendance à l'augmenter [18].

Lorsque deux étoffes vont être mises en contact et frotter l'une contre l'autre, les deux surfaces textiles vont interagir entre elles au niveau microscopique comme au niveau macroscopique [18]. Ces interactions vont se traduire par la vibration des fibres au sein de l'étoffe et donc par

la génération d'un bruit de friction des étoffes. Les différents dispositifs permettant de générer ces bruits et de les analyser sont présentés dans le paragraphe suivant.

1.2 Bruits de friction engendrés par frottement

Depuis les années 60, de nombreuses études sur la génération et l'étude des bruits de friction des étoffes textiles ont été menées. Le premier dispositif expérimental à mouvement rotatif (Figure 1) permettant de générer des bruits de frottement entre des fibres en laine a été développé par Walter *et al* [19] en 1961. Au cours de leur étude, ils ont établi que des matières textiles différentes ne présentaient pas les mêmes propriétés acoustiques.

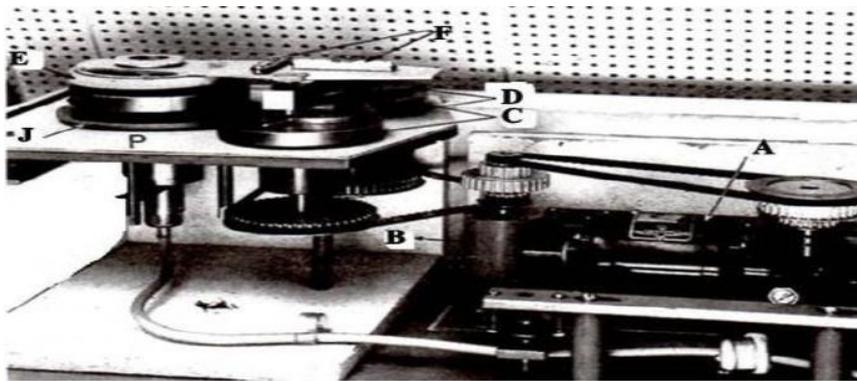


Figure 1 : Dispositif de génération des bruits de friction conçu par Walter

Sur la Figure 1, on retrouve le moteur (A), un ensemble d'engrenages (B), deux disques de même diamètre (C), les supports des disques (D), la traverse de la tête supérieure (E), deux niveaux (F), le disque inférieur (J) et le plateau du dispositif (P).

En 1962 [20], le dispositif a été modifié afin de pouvoir étudier le frottement entre deux étoffes. Ils ont ainsi démontré que des traitements de surface pouvaient modifier la pression acoustique du bruit de friction. En effet, le dépôt d'un apprêt tend à accroître l'épaisseur du tissu et à modifier ses paramètres de surface ce qui peut modifier le niveau du bruit de frottement généré.

Un autre dispositif expérimental utilisant un système de poulie courroie, présenté en Figure 2, a été développé en 1986 par Fujimoto [21]. Cet appareil a également été utilisé dans d'autres études, notamment celle de Fukuhara [22] en 1993. Dans ces études, les bruits de frottement d'étoffes en polyester et en soie naturelle ont été comparés. En effet, de nombreuses fibres synthétiques ont été développées dans le but d'imiter le son émis par des fibres naturelles. Ces travaux ont donc permis de mettre en évidence des similitudes entre les signatures acoustiques des étoffes en polyester et celle en soie.

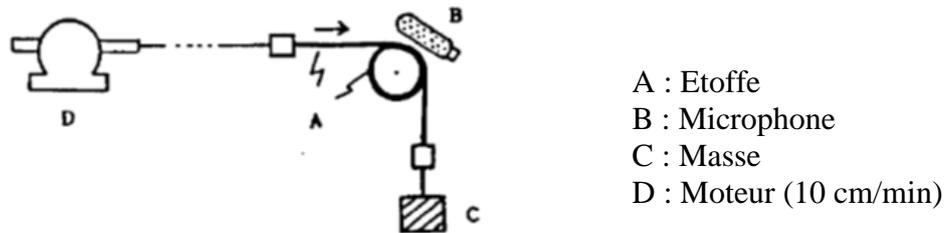


Figure 2 : Dispositif développé par Fujimoto

Dans les années 2000, un appareil nommé MAFN (Measuring Apparatus for Fabric Noise) a été conçu par Yi, Cho *et al* [5]. Ce dispositif, présenté en Figure 3, permet de générer les bruits de friction par un mouvement de translation des étoffes.

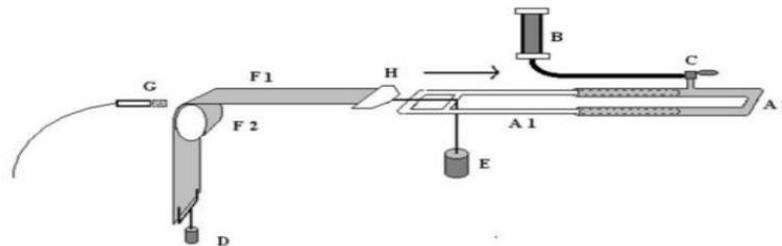


Figure 3 : Dispositif utilisé par Yi et Cho (MAFN)

Dans cette étude, les bruits de friction de différentes étoffes tissées (laine, coton, soie, polyester et polyamide) ont été étudiés à travers plusieurs paramètres acoustiques : la pression acoustique, la plage d'amplitude et la différence fréquentielle. En parallèle, les propriétés mécaniques des étoffes (flexion, cisaillement, compression, propriétés de surface) ont été mesurées à l'aide du système Kawabata Evaluation System [23]. De fortes relations ont pu être démontrées entre ces paramètres. L'ensemble de ces paramètres ont également été pris en compte dans l'étude menée par Kim *et al* [24] pour comparer les bruits de friction émis par des étoffes tricotées avec des fils de polyester dans le sens colonne du tricot. En 2009, Cho *et al* [25] ont élargi leur étude à des étoffes tricotées en coton, en laine et dans un mélange coton/laine en changeant les types de liages. La comparaison des bruits de friction d'étoffes tissées, tricotées et imper-respirantes a été analysée en 2010 par Cho *et al* [26]. Ils ont ainsi mis en évidence une corrélation positive entre le niveau sonore des bruits de frottements et la moyenne quadratique du coefficient de frottement (MMD).

Pendant ses travaux de thèse en 2013, Cooper [18] a également conçu un dispositif permettant de réaliser un frottement étoffe contre étoffe dans une direction privilégiée, soit dans le sens

des fils de chaîne soit dans le sens des fils de trame. Le schéma de son dispositif est présenté en Figure 4.

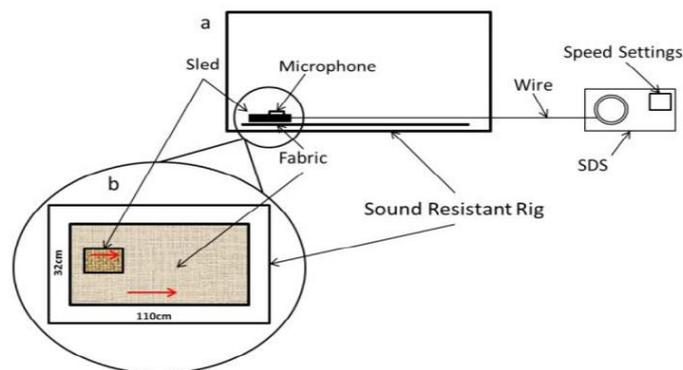


Figure 4 : Dispositif de Cooper

Dans un premier temps, Cooper s'est intéressé à l'influence de la vitesse de frottement et à la rugosité des étoffes. Il a ainsi démontré que l'augmentation de ces paramètres engendre un niveau sonore du bruit de friction plus important. Puis à travers différents jeux d'étoffes, il a établi que la matière de l'étoffe ainsi que son armure influent nécessairement sur la signature acoustique du textile. Par exemple, la comparaison entre une étoffe de coton et une étoffe de soie ayant la même armure toile a montré un bruit de frottement plus important dans le cas du coton.

Lors de ses travaux de thèse en 2013, Latroch [6] s'est intéressé aux bruits de friction générés par les vêtements lorsqu'ils sont portés. L'ensemble des dispositifs détaillés précédemment permet, en effet, d'étudier le frottement textile/textile via des mouvements de rotation ou de translation spécifiques, qui ne traduit cependant pas les conditions réelles de frottements textiles lors du port d'un vêtement. Lors du déplacement d'une personne, on peut distinguer deux zones de frottements majeures qui sont sources de bruits : entre les bras et le haut du corps et entre les jambes. Un système de génération et d'enregistrement du bruit de friction (Figure 5), permettant de simuler le mouvement du bras lors d'activités sportives, a ainsi été spécifiquement développé par Latroch.

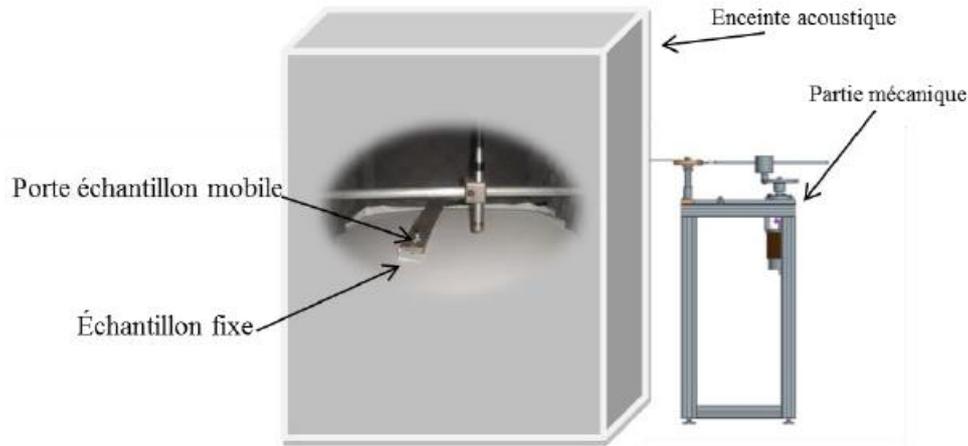


Figure 5 : Appareil conçu par Latroch

Le principe général de l'appareil est de mettre en contact deux étoffes de même nature. Le premier échantillon est placé sur une surface en silicone qui modélise la peau et le deuxième est fixé sur un bras métallique mobile. Le mouvement de balayage effectué par cet échantillon est semblable au mouvement du bras. En effet, Latroch a établi les conditions optimales nécessaires pour engendrer un bruit de friction pour trois types de déplacement : la marche, le footing et la course. La vitesse et la surface de frottement ont été déterminées ainsi que la pression existante entre le bras et le haut du corps [27]. Au cours de son étude, l'auteur a démontré que la vitesse de frottement a une influence plus ou moins significative sur le niveau de bruit en fonction de la matière de l'étoffe. Concernant la surface de frottement, une augmentation de celle-ci accroîtra nécessairement le niveau du bruit de friction quel que soit le type d'étoffe.

En 2016, Yosouf [7] a travaillé sur le même dispositif en se focalisant sur l'identification instrumentale et sensorielle de la signature acoustique des bruits de frottement. Il a ainsi voulu montrer que chaque étoffe possédait une signature acoustique qui lui est propre. En complément des paramètres classiques d'analyse du son comme le niveau sonore ou l'amplitude maximale, la transformée en S a été utilisée pour interpréter le signal sonore. De plus, dans le cadre de cette étude, l'évaluation sensorielle du bruit a été menée par des panélistes entraînés en appliquant la méthode d'analyse descriptive quantitative. Au cours de cette étude, l'influence de l'armure d'étoffes en coton écru sur les propriétés sonores a été analysée. Il a ainsi montré que l'armure sergé 3 possède un niveau sonore plus important et donc que cette armure est la plus bruyante. À l'inverse, l'armure la plus furtive d'un point acoustique est l'armure satin 4.

La corrélation entre les paramètres mécaniques des tissus qui décrivent l'état de surface et la compression de l'étoffe (mesurés par la chaîne de mesure Kawabata Evaluation System) et le niveau sonore global du bruit de frottement a été effectuée ; de même que les corrélations entre le niveau sonore et les descripteurs sensoriels. Le bruit d'une veste d'homme, confectionnée selon deux prototypes présentant des variantes de manches, a été analysé en situation réelle, dans une chambre anéchoïque.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes appuyé sur le dispositif développé par Latroch et Yosouf pour la génération et l'enregistrement des bruits de friction. Cette méthode sera détaillée dans la partie expérimentale.

1.3 Usure des surfaces textiles

1.3.1 Abrasion

Toute surface textile est nécessairement soumise à diverses sollicitations au cours de son cycle de vie. L'ensemble des sollicitations va progressivement altérer la surface du tissu. Dans le secteur de l'habillement, les tissus doivent pouvoir résister aux sollicitations de l'utilisateur (résistance à la traction, à la déchirure, aux frottements ...), aux conditions d'entretien (lavage, séchage, repassage ...) et à l'environnement (résistance aux UV). L'abrasion et le lavage des étoffes représentent donc des facteurs importants d'usure.

L'usure par abrasion est une détérioration qui résulte du frottement prolongé entre deux étoffes. Cette usure, sous l'effet de la répétition, va dégrader la qualité du tissu, modifier ses caractéristiques superficielles et parfois atteindre la rupture du matériau. Lorsqu'une étoffe est soumise à une abrasion répétée, elle va, dans un premier temps, subir un changement d'apparence superficiel. Ce changement est essentiellement engendré par une modification de la pilosité de surface. La structure interne de l'étoffe sera également impactée si l'abrasion se prolonge dans le temps [28]. L'abrasion peut être influencée par différents paramètres comme le type de fibres, la structure du fil et les propriétés de tissage de l'étoffe [29].

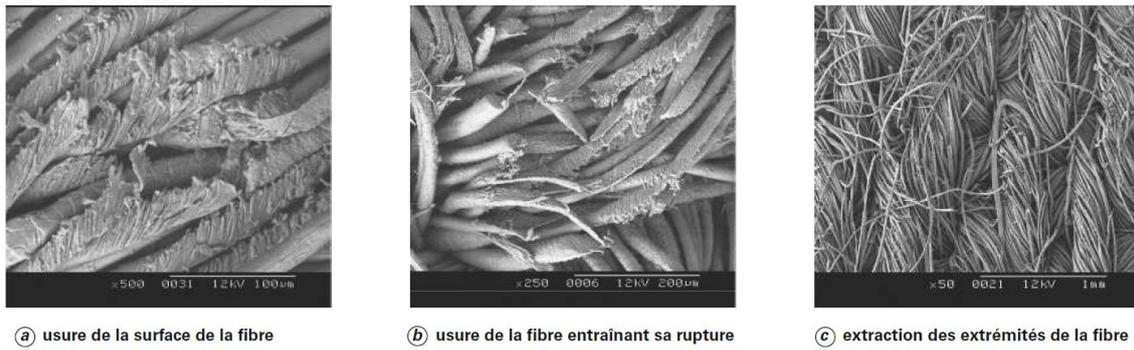


Figure 6 : Conséquences d'une usure abrasive sur une surface textile (photo LPMT) [30]

Lors de l'abrasion, plusieurs mécanismes sont mis en jeu (Figure 6) : l'usure superficielle de la fibre (cas a), la rupture des fibres (b) et enfin l'extraction de l'une des extrémités de la fibre en dehors de la structure de la surface textile (cas c). Ce dernier mécanisme engendre une pilosité nouvelle à la surface, si l'abrasion se prolonge les fibres peuvent être complètement extraites de la surface entraînant ainsi une diminution de la résistance mécanique du textile [30].

Les surfaces rugueuses s'usent généralement plus rapidement et ont un coefficient de frottement plus élevé que les surfaces lisses [31]. La rugosité d'une étoffe est quantifiée par les déviations verticales de celle-ci par rapport à sa forme idéale. Plus ces déviations sont importantes, plus la surface sera considérée comme rugueuse. Dans l'étude dirigée par Akgun, l'appareillage de Martindale a été utilisé pour simuler l'usure des étoffes. Il a ainsi été démontré qu'après 10 000 cycles d'abrasion, une pilosité de surface commence à se former ce qui détériore le toucher et l'apparence visuelle du tissu. En outre, plus le nombre de cycles d'abrasion augmente, plus la rugosité de l'étoffe a tendance à diminuer régulièrement.

Une étude plus récente a tenté de mettre en évidence une relation entre la rugosité de surface d'étoffes en polyester et leurs propriétés de frottement après abrasion [32]. Afin de former un panel d'étoffes de rugosité superficielle différentes, le procédé Martindale a été appliqué sur les étoffes de 1 250 à 50 000 cycles d'abrasion. La rugosité, ainsi que les coefficients de frottements statiques et dynamiques, ont été mesurés avant et après abrasion. Akgun *et al.* ont ainsi démontré que les paramètres de rugosité des étoffes ont tendance à décroître avec le nombre de cycle d'abrasion. Concernant les coefficients de frottement, des évolutions différentes sont à noter selon la direction d'observation. En effet, dans le sens chaîne, les coefficients de frottement (statique et dynamique) vont augmenter alors que dans le sens trame, ils diminuent. Au terme de cette étude, aucune correspondance précise entre la rugosité et les coefficients de frottement n'a pu être établie étant donné que les textiles sont des surfaces anisotropes.

La résistance à l'abrasion des vêtements a également fait l'objet de plusieurs études. Par exemple, la résistance des chaussettes a été étudiée en 2009 [33]. Différentes chaussettes ont été usées par le procédé Martindale et leur résistance à l'abrasion a été quantifiée. Ozdıl *et al* ont montré que le mercerisage entraîne une augmentation de cette résistance comme l'ajout de fils élastiques dans la structure de la chaussette. A l'inverse, l'utilisation d'adoucissants silicone diminuera la résistance à l'abrasion.

La résistance à l'abrasion dépend de nombreux paramètres intrinsèques à l'étoffe. Miguel *et al* [34] ont proposé de l'évaluer par l'intermédiaire de deux méthodes différentes : la méthode d'évaluation par perte de masse et celle par rupture de deux fils. Cette étude s'est portée sur la résistance à l'abrasion d'étoffe de laine usées par le procédé Martindale sous une pression de 12 kPa.

1.3.2 Entretien

L'abrasion n'est pas le seul vecteur d'usure des surfaces textiles. L'entretien de celles-ci à savoir le lavage et le séchage sont également à prendre en considération. Selon le domaine d'étude, le nombre de lavages subi par la surface textile au cours de son cycle de vie ne sera pas identique, par exemple pour le sport, on compte un lavage par semaine. De ce fait, il est communément admis que le cycle de vie d'un vêtement comporte en moyenne une quarantaine de lavages [35].

Les études menées par Agarwal *et al* ont surtout porté sur des tricots et l'influence des adoucissants sur leurs propriétés mécaniques. Dans un premier temps, l'influence des cycles de lavages, notamment après vingt cycles, sur les propriétés de drapé des tricots et sur les propriétés de flexion mesurées par la chaîne d'évaluation de Kawabata a été mise en évidence [36]. Par la suite, l'influence du lavage et de l'utilisation d'adoucissants a été étudiée sur des tricots 100% viscose et 100% PET. Pour cela, leurs propriétés mécaniques et leurs propriétés sensorielles tactiles ont été mesurées [37] [38]. Les tricots les plus sujets à des variations sont les tricots en viscose en particulier au niveau de leurs propriétés de flexion.

Ces changements de propriétés sensorielles ont été confirmées en 2015 par Abdelfattah [39]. Il a montré sur des tissus de type jeans que le lavage a tendance à améliorer la main de l'étoffe. Cette amélioration s'explique par la création progressive d'une pilosité superficielle engendrant ainsi une surface plus douce et plus volumineuse.

Dans la littérature, des études ont été menées afin de déterminer l'influence de cette usure sur les propriétés des étoffes mais très peu sur les bruits de frottement des étoffes. Au cours de cette

étude, nous nous sommes concentrés sur l'influence de l'abrasion et des lavages répétés. Les méthodes expérimentales qui nous ont permis de générer un panel d'échantillons présentant des degrés d'usure différents seront détaillées au Chapitre II.1.2.

Comme énoncé dans l'introduction, les bruits de frottements représentent le cœur de notre étude, il est donc important de connaître certaines généralités sur le son.

2. Généralités sur le son

Dans la littérature, il est admis que le son et le bruit sont le résultat des mêmes phénomènes physiques mais la distinction entre ces deux termes relève plutôt de la subjectivité. Cependant, ils peuvent être décrit de façon objective comme subjective et il est important de distinguer la description physique du stimulus sensoriel et la description plus subjective de la sensation auditive perçue par l'oreille humaine propre à chacun.

2.1 Distinction entre son et bruit

D'un point de vue physique, un son ou un bruit peut être défini comme une vibration mécanique qui se propage dans un fluide grâce à la déformation élastique de celui-ci. Cette perturbation se matérialise sous la forme d'une onde longitudinale. En effet, si l'on considère le mouvement vibratoire d'une source sonore, la source va engendrer le déplacement des molécules d'air qui vont osciller autour d'une position d'équilibre (de l'ordre de quelques micromètres). La perturbation va ainsi se propager de proche en proche à l'intérieur du milieu et créer des zones successives de compression (zone de forte densité moléculaire) et des zones de dépression (densité plus faible de molécules). Cette vitesse de propagation de l'onde au sein d'un fluide, appelée célérité du son est définie par l'équation suivante

$$c = \frac{1}{\sqrt{\chi\rho}} \quad (3)$$

Avec χ le module de compressibilité (exprimé en Pa^{-1}) et ρ la masse volumique du fluide. La célérité du son dans l'air, qui est assimilé à un gaz parfait, dépend de la température mais la valeur de $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ est communément admise.

Parmi les ondes sonores, une distinction est généralement faite entre son et bruit. Le paragraphe suivant introduit cette distinction.

2.1.1 Sons purs et complexes

Un son pur peut être défini comme une vibration sonore dont la pression va varier de manière sinusoïdale. Cette onde sonore simple et régulière va se répéter dans le temps de façon strictement identique (Figure 7a).

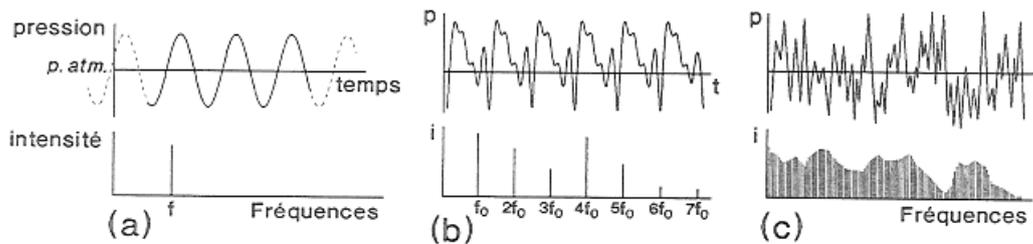


Figure 7 : Exemples de vibrations sonore et de leur spectre pour différents sons [18]

Si l'on considère le cas idéal où la vibration reste permanente, la variation de pression peut être définie par l'équation suivante :

$$p(t) = p_m \cdot \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

Où p_m représente la valeur maximale de la pression de la sinusoïde et f la fréquence de la vibration. Les paramètres de fréquence et d'intensité (liée à l'amplitude) permettent de caractériser le son.

Cependant, le son naturel pur étant très rare, les sons perçus par l'oreille humaine sont le plus souvent des sons complexes. Ils sont composés de plusieurs vibrations acoustiques et limitées dans le temps ce qui complexifie leur description. Deux catégories peuvent alors être différenciées : les sons complexes périodiques (variation de pression non sinusoïdale mais périodique), représentés sur la Figure 7b qui résulte d'une somme de son tonal pur, et les sons complexes non périodiques (Figure 7c).

Il est possible de démontrer mathématiquement qu'un son complexe est équivalent à la superposition de plusieurs sons purs. De ce fait, l'application du théorème de Fourier va permettre la description de n'importe quel son à partir des sons purs équivalents qui le composent puisque la fréquence et l'amplitude de chacun d'eux peuvent être déterminées.

Dans le cas des sons complexes périodiques, le motif de pression va se reproduire à l'identique dans le temps à intervalle régulier. La fréquence de répétition est appelée fréquence fondamentale, le plus souvent notée f_0 . Un tel son est donc la somme de plusieurs composantes

pures que l'on appelle les harmoniques, leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale ($n \times f_0$), Figure 7b. Les spectres d'amplitude sont la représentation graphique de tels sons (diagrammes présentés dans la partie inférieure de la Figure 7). Chaque composante est représentée par un trait vertical proportionnel à son amplitude, le tout formant un spectre de raies.

Les sons complexes non périodiques représentent la majeure partie des sons perçus par l'oreille humaine. Dans ce cas, la variation de pression n'est ni sinusoïdale ni périodique. Il est toujours possible d'appliquer le théorème de Fourier pour les décrire mais le nombre de composantes augmente de façon importante. De plus, leur fréquence n'étant plus des multiples entiers de la fréquence fondamentale, on parlera de partiels. Les composantes étant nombreuses et rapprochées, la représentation graphique montrera une enveloppe spectrale.

2.1.2 Définition du bruit

D'après les normes NF S30-101 [2] et NF S30-105 [3], le bruit peut être défini d'un point de vue purement physique comme la *vibration acoustique erratique, intermittente ou statistiquement aléatoire*. Cependant, c'est l'aspect psychophysiologique qui est le plus souvent considéré ; le bruit étant alors décrit comme *toute sensation auditive désagréable ou gênante*.

En effet, la plupart du temps lorsque des sons sont jugés indésirables et perturbent la communication ou l'écoute de l'environnement des individus, ils sont qualifiés de bruit. Par métonymie, toute sensation auditive que l'on jugera désagréable sera qualifiée comme telle.

On peut alors voir le son comme un support permettant la transmission d'information, comme c'est le cas pour la musique ou pour la parole, et le bruit sera lui perçu comme une nuisance. La majorité des bruits acoustiques possède des spectres continus non constants en fonction de la fréquence. Ainsi les bruits possèdent une répartition aléatoire des fréquences dans le domaine temporel. Dans notre étude, nous parlerons donc plutôt de bruit de friction.

En psychophysique, on distingue la valeur physique et la perception de celle-ci. Le son peut donc être décrit de manière physique notamment via son intensité et sa fréquence, mais aussi de manière plus subjective en terme de perception auditive. A chaque grandeur physique caractérisant le son, on peut associer une grandeur perceptive correspondante (lorsqu'elle existe) [40] [41].

2.2 Intensité acoustique

L'un des paramètres physiques les plus importants en terme de caractérisation du son est la notion d'intensité acoustique. Physiquement, l'intensité acoustique d'un son est la quantité d'énergie propagée par unité de temps et de surface, elle s'exprime donc en W/m^2 . En acoustique, la puissance acoustique (énergie propagée au cours du temps) et la pression acoustique efficace sont également des grandeurs physiques utilisées.

La puissance acoustique représente l'énergie $W(t)$ transportée par l'onde sonore en fonction du temps. Les paramètres p et v représentent respectivement la pression acoustique et la vitesse acoustique.

$$P(t) = \frac{dW}{dt} = p(x, t) \cdot S \cdot v(x, t) \quad (5)$$

L'intensité acoustique correspond à la puissance acoustique traversée par une unité de surface. Elle peut également être exprimée en fonction de l'impédance acoustique Z .

$$I(t) = \frac{P(t)}{S} = \frac{p^2(x, t)}{Z} \quad (6)$$

La pression acoustique efficace notée P_{eff} est le résultat de la moyenne quadratique temporelle des pressions acoustiques instantanées en un point d'un fluide et pour un intervalle de temps correct. De ce fait, cette pression dépend du temps et peut s'exprimer de la façon suivante :

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t p^2(t) dt} \quad (7)$$

L'ensemble de ces grandeurs physiques n'est pas suffisamment adapté pour caractériser la large gamme de sons perçus par l'oreille humaine. Si l'on considère le champ auditif humain, le seuil d'audibilité correspond à une intensité de $1 \text{ pW}/m^2$ soit une pression acoustique de $20 \text{ }\mu\text{Pa}$ et le seuil de douleur correspond, lui, à $1 \text{ W}/m^2$ soit 20 Pa . Afin de réduire les ordres de grandeurs entre ces deux valeurs limites, l'échelle des décibels (dB) a été introduite via un rapport logarithmique. Ainsi le niveau sonore d'un son peut être défini par l'équation (8), en sachant que par convention, $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ et $I_0 = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

$$L_p = 20 \times \log \frac{P_{eff}}{P_0} = 10 \times \log \frac{I}{I_0} \quad (8)$$

A titre indicatif, la Figure 8 présente quelques ordres de grandeurs de niveaux sonores de différentes sources.

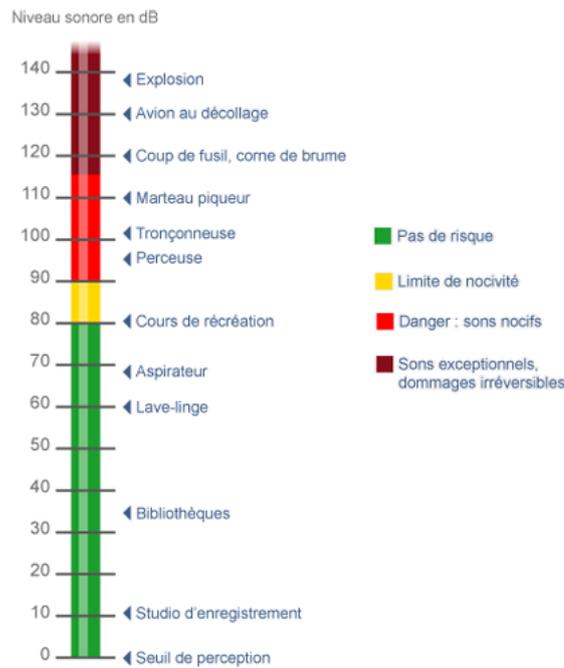


Figure 8 : Echelle de bruit de différentes sources sonores en dB [42]

L'échelle des décibels permet de mesurer un niveau de pression sonore. De ce fait, si l'on considère deux sons de pression acoustique identique mais de fréquences différentes, le niveau sonore sera le même. On parle alors de décibels linéaires (dB lin ou dB SPL) puisque la fréquence n'a pas d'influence sur le niveau en décibel du son.

En revanche, l'oreille humaine, de par son fonctionnement, ne perçoit pas de la même façon deux sons de niveau sonore identiques mais de fréquences différentes.

2.3 Perception du son

2.3.1 Anatomie de l'oreille humaine

L'oreille humaine est décomposée en trois parties : l'oreille externe, l'oreille moyenne et l'oreille interne (Figure 9). L'oreille externe permet de guider le son vers le conduit auditif, l'oreille moyenne de transformer l'onde sonore en vibration et l'oreille interne de convertir l'onde sonore en impulsions nerveuses [43].

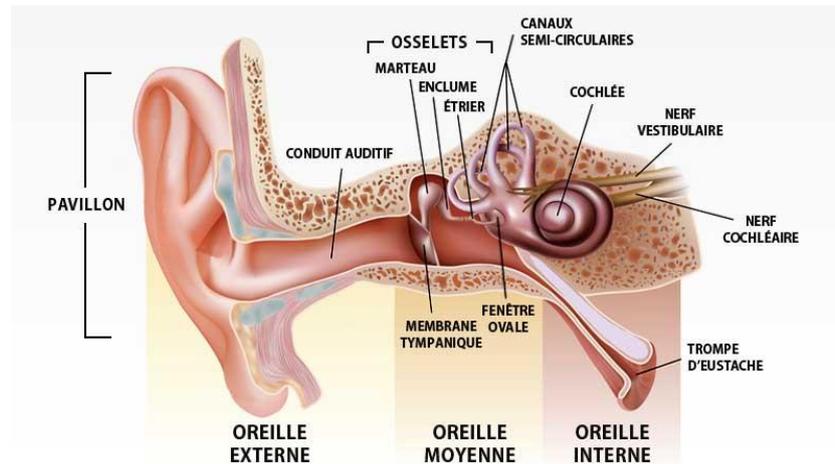


Figure 9 : Schéma du système auditif humain [44]

L'oreille externe, en plus de la partie visible, comprend deux segments : le pavillon et le conduit auditif externe fermé à son extrémité par la membrane du tympan. De part, sa géométrie et sa composition, l'oreille externe a une fonction de filtre et permet également d'amplifier les fréquences moyennes [43] [45].

Derrière la membrane du tympan, on retrouve l'oreille moyenne qui comprend également trois osselets appelés le marteau, l'enclume et l'étrier. La chaîne des osselets a pour rôle de transmettre les ondes sonores vers l'oreille interne via la fenêtré ovale tout en amplifiant le signal mécanique. Contrairement à l'oreille externe et moyenne, l'oreille interne est composée d'un milieu liquide d'où la nécessité d'amplifier le signal.

Située au sein de l'os temporal, l'oreille interne contient la cochlée, organe responsable de l'audition mais aussi le système vestibulaire qui est l'organe de l'équilibre. La cochlée se présente sous la forme d'un escargot, rempli d'un liquide appelé endolymphe qui permet de transformer les sons en signaux électriques. Ces signaux seront par la suite transmis au cerveau qui interprétera le stimulus sensoriel.

L'organe de Corti situé sur la membrane basilaire dans le canal de la cochlée compte environ 20 000 cellules ciliées. Ce sont des cellules sensorielles vulnérables et non renouvelables. Lorsque celles-ci sont endommagées par des sollicitations trop importantes, elles sont responsables d'un défaut d'audition. Leur rôle est d'assurer la transduction mécano-électrique en convertissant les impulsions mécaniques en impulsions bioélectriques qui seront ensuite enregistrées par le nerf auditif. L'ensemble de ces cellules est réparti en différents groupes qui correspondent chacun aux sons de certaines fréquences ou à une certaine largeur de bande de

fréquences. Les sons basse fréquence seront perçus par la partie postérieure de la cochlée alors que la partie antérieure percevra les sons haute fréquence.

Comme tout organe sensoriel, l'oreille humaine a ses limites. Les fréquences perceptibles par un organe jeune et sain sont comprises entre 20 et 20 000 Hz. Les fréquences que l'oreille humaine perçoit avec un maximum de sensibilité se situent entre 500 et 5000 Hz, c'est-à-dire la plage de fréquences correspondante à celle du langage (100 Hz – 5kHz).

A titre d'information le Tableau 1 présente la qualification des sons en fonction de leur fréquence.

Tableau 1 : Qualification des sons selon leurs fréquences

Plage de fréquences	Qualification
<16 Hz	Infrason ou infrabasse
De 16 à 150 Hz	Extrême grave
De 150 Hz à 250 Hz	Basse ou Grave
De 250 Hz à 1500 Hz	Médium
De 1500 à 3500 Hz	Aigu
De 3500 Hz à 16 000 Hz	Extrême aigu
> 16 000 Hz	Ultrason

2.3.2 Intensité physiologique

L'intensité physiologique ou sonie est la grandeur de perception utilisée pour estimer la force sonore ressentie. Elle nous permet de dire si un son est plus fort qu'un autre. La sonie dépend de l'intensité acoustique, de la fréquence et de l'étendue des bandes de fréquences.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'oreille humaine ne présente pas la même sensibilité pour toutes les fréquences. En effet, elle est plus sensible aux fréquences moyennes, c'est pourquoi deux sons de fréquences différentes mais de niveau de pression acoustique équivalent peuvent nous paraître d'intensités différentes. La variation de la sonie peut alors être évaluée par plusieurs méthodes afin de déterminer une échelle de sonie. Deux échelles différentes peuvent alors être définies :

- L'échelle des « phones » qui tend à comparer un son lambda à un son pur de fréquence 1 kHz

- L'échelle des « sones » basée sur l'estimation directe de l'intensité physique et sur la loi de Stevens.

Depuis les premiers travaux menés par Fletcher et Munson [45], des ensembles de courbes normalisées ont été établies pour définir les sons purs qui engendrent une sensation de force sonore identique. Pour cela, l'unité du *phone* a été définie. Par convention, un son de n phones est un son provoquant la même sensation qu'un son pur de fréquence 1kHz et de niveau sonore n dB. Ces réseaux de lignes isosoniques sont représentés en Figure 10, chacune des courbes correspond à une sensation d'intensité équivalente quel que soit la fréquence du son. La courbe isosonique de phone 0 correspond au seuil d'audibilité.

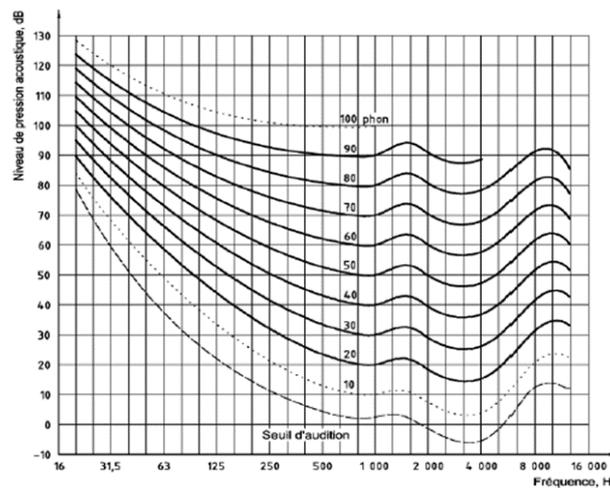


Figure 10 : Courbes isosoniques

On peut noter, que pour des niveaux d'intensité faible, les courbes isosoniques sont plus concaves, c'est-à-dire que la relation entre le niveau sonore et la sensation provoquée dépendra plus fortement de la fréquence [40]. En effet, il nous est plus facile de différencier deux sons de basses fréquences que deux sons dont les fréquences sont élevées.

L'augmentation de la sonie peut aussi être directement estimée à partir de l'intensité physique du son en appliquant la loi de Stevens. On définit ici l'échelle des sones, où 1 sone est la sonie d'un son pur de fréquence 1 kHz et de niveau sonore 40 dB.

Cette estimation d'amplitude décrite par Stevens est représentée en Figure 11 et définie par l'équation (9) qui approche une loi puissance. On peut donc retenir que la sonie double tous les 10 dB pour les sons de niveau sonore supérieur à 30 dB.

$$S = k \cdot p^{0.6} \quad (9)$$

Avec S représentant l'estimation de l'amplitude, k une constante et p la pression acoustique.

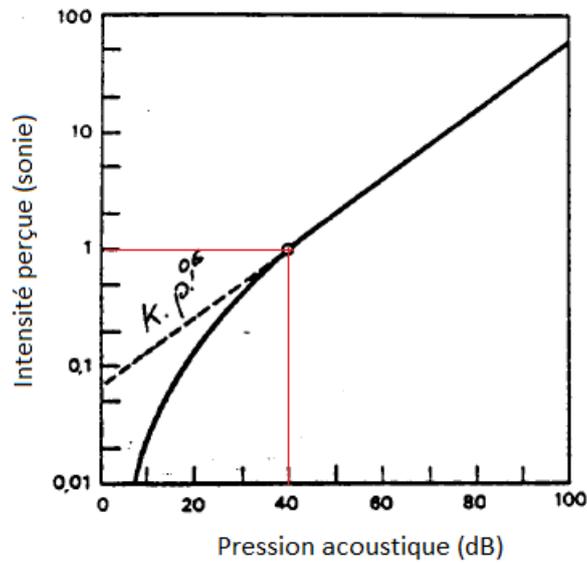


Figure 11 : Sonie en fonction du niveau sonore à la fréquence de 1000 Hz

D'après la figure, on constate que pour des niveaux sonores faibles, la sonie réelle est inférieure au modèle décrit par Stevens. Ce biais est courant dans de nombreux tests psychoacoustiques car nous avons tendance à essayer de deviner les propriétés de la source [40].

La nature du signal, sa durée, sa forme et son mode de présentation sont autant de facteurs pouvant influencer la sonie. La sonie d'un bruit large bande sera toujours perçue comme supérieure à celle d'un son pur, à intensité physique égale [40]. La durée d'un son est également essentielle pour la perception de la sonie, notamment si celle-ci est inférieure à 100 ms. Un son de durée très courte, par exemple 20ms, sera perçu comme plus faible qu'un même son de durée égale à 80 ms [46].

2.3.3 Système de pondération

Comme nous l'avons vu, la sensibilité de l'oreille joue un rôle important dans notre perception des sons. De ce fait, si l'on souhaite mesurer la sensation perçue par l'oreille, des filtres spécifiques doivent être ajoutés aux sonomètres. Ces filtres permettent d'atténuer les basses et les hautes fréquences de façon analogue à ce que fait naturellement l'oreille.

Il existe ainsi plusieurs courbes de pondération dites A, B et C, elles sont présentées à la Figure 12. On constate que l'atténuation du niveau sonore n'est pas la même selon la pondération choisie, ces niveaux d'atténuation sont fixés par des normes.

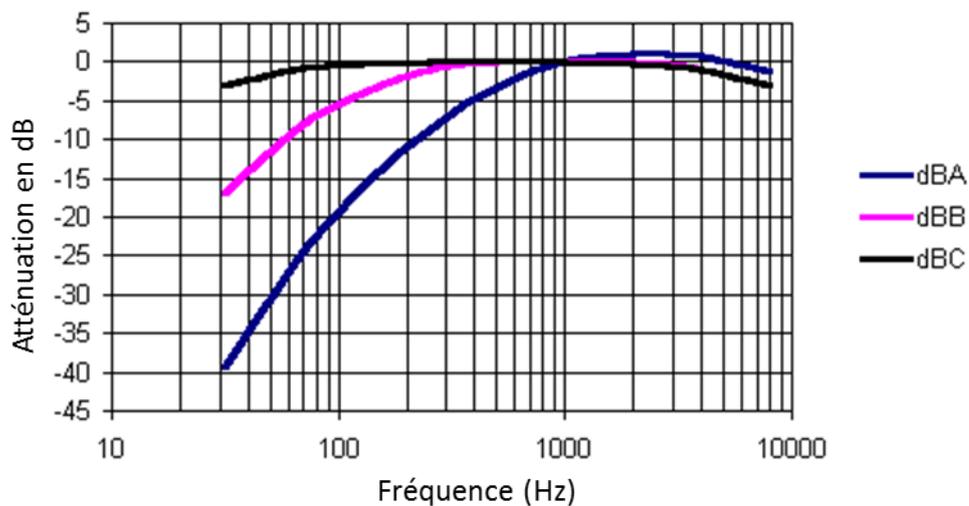


Figure 12 : Courbes de pondération A, B et C

La pondération A est la courbe de pondération la plus fréquemment utilisée car elle permet de mieux évaluer la gêne sonore perçue par l'oreille humaine. Elle est définie par la norme CEI 61672-1 [47] de façon à tenir compte de la sensibilité moyenne des personnes ayant une audition dite normale. De ce fait, elle couramment utilisée dans le cadre législatif afin de définir les limites de niveaux sonores.

A titre d'exemple, le Tableau 2 présente la pondération en A d'un bruit rose, c'est-à-dire un bruit qui possède une énergie constante dans chaque bande d'octave.

Tableau 2 : Exemple de pondération d'un bruit rose

Fréquence (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Niveau en dB	70	70	70	70	70	70	70	70
Pondération A	-26	-15,5	-8,5	-3	0	1	1	-1
Niveau pondéré en dBA	44	54,5	61,5	67	70	71	71	69

L'ensemble des paramètres caractérisant les bruits notamment le niveau sonore est obtenu après analyse des signaux.

3. Analyse des signaux sonores

Les signaux sonores obtenus à partir des bruits de frottements des étoffes peuvent être représentés, soit dans le domaine temporel, soit dans le domaine fréquentiel. Dans le premier cas, c'est la variation de l'amplitude en fonction du temps qui est observée alors que le second cas permet d'obtenir l'intensité des fréquences continues.

3.1 Analyse spectrale

L'analyse spectrale permet de décrire les signaux sonores dans le domaine des fréquences. Le principe de cette technique est de décomposer le signal sur des bandes de fréquence plus ou moins larges afin de déterminer le contenu fréquentiel du spectre sonore. On peut en distinguer deux types différents [48]:

- Avec Δf constant. Dans ce cas, la largeur de bande est systématiquement la même, par exemple des bandes de 1Hz [2]. Pour des signaux numériques on a $\Delta f = \frac{f_e}{N}$ où f_e est la fréquence d'échantillonnage et N est le nombre d'échantillons pour l'analyse. Pour avoir Δf petit il faut prendre une grande fenêtre d'analyse (N très grand).
- Avec $\Delta f/f$ constant. Il s'agit de l'analyse spectrale la plus souvent utilisée en acoustique car elle permet une analyse plus précise et prend également en compte la sensibilité de l'oreille humaine [21]. Le spectre va alors être divisé en bandes de fréquences de largeurs variables et définies (de plus en plus large quand on tend vers les hautes fréquences), on peut différencier les spectres par bandes d'octave, de tiers d'octave ...

Le spectre d'un signal quelconque, initialement représenté dans le domaine temporel, est le résultat du calcul d'un changement de base ; ce calcul permet de le représenter dans le domaine fréquentiel. Cette conversion temps-fréquence peut être réalisée par une transformation de Fourier.

3.2 Transformation de Fourier

L'analyse de Fourier est basée sur le théorème formulé par J. Fourier [50] qui stipule que *sous certaines conditions de dérivation et de continuité, tout signal à temps continu $s(t)$ périodique de période T_0 peut s'écrire sous la forme d'une somme de signaux sinusoïdaux*. Cette somme de fonctions peut être écrite sous une forme trigonométrique réelle (équation (10)) ou sous une forme complexe (équation (11)).

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (10)$$

La fonction $s(t)$ peut donc être considérée comme la somme d'un terme constant a_0 et d'un nombre infini de termes sinusoïdaux appelés harmoniques de rang n .

Il est également possible de traduire ce théorème en utilisant les coefficients de Fourier complexes, l'équation suivante est alors obtenue

$$s(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} C_n e^{-jn\omega t} \quad (11)$$

Les coefficients de Fourier C_n s'expriment selon l'équation suivante

$$C_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} s(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (12)$$

A partir des équations (10), (11) et (12), un spectre discret est tracé. Il est composé de raies dont la fréquence correspond à un multiple entier de la fréquence fondamentale f_0 .

La Figure 13 représente un signal périodique et son spectre d'amplitude, les raies de fréquence f_0 correspondent à la fondamentale et les autres raies représentent les harmoniques. L'intervalle séparant deux harmoniques successives est déterminée par la fréquence fondamentale ($f_0 = 1/T_0$).

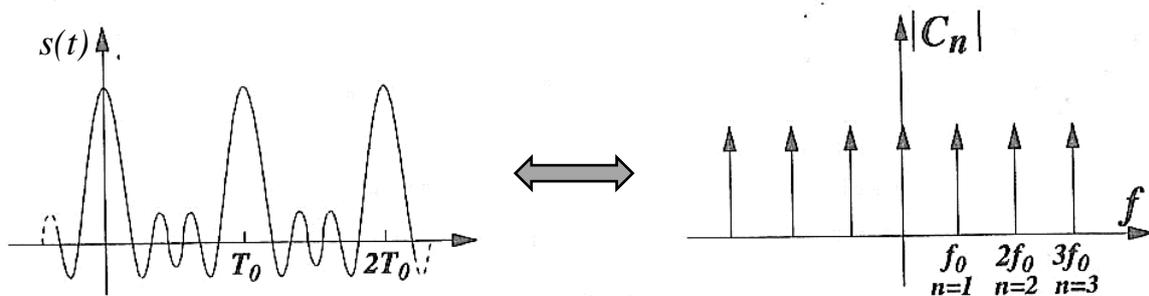


Figure 13 : Représentation d'un signal périodique et de son spectre discret après transformation de Fourier

Pour calculer la transformée de Fourier d'un signal non périodique, on l'assimile à un signal périodique de période T infinie. D'un point de vue mathématique, l'intégrale de Fourier peut alors s'écrire :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (13)$$

Contrairement aux signaux périodiques, l'intervalle entre les harmoniques va tendre vers zéro, ce qui permet d'obtenir un spectre continu. La fonction $X(f)$ peut être approximée par une transformée de Fourier Discrète (TFD). Elle se définit sous la forme d'une suite de N termes

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} \text{ avec } x_n = x(nT_e) \quad (14)$$

De manière générale, les N termes $x(n)$ correspondent aux N échantillons du signal analogique échantillonné étudié. La TFD est très couramment utilisée en traitement du signal puisqu'elle permet l'utilisation d'un algorithme optimisé de calcul nommé FFT (Fast Fourier Transform). Il permet notamment de réduire le temps de calcul à condition que le nombre d'échantillons soit équivalent à une puissance de deux (algorithme de Cooley et Tuckey [51]).

Cependant, avant d'appliquer la transformation de Fourier au signal, celui-ci doit être échantillonné et observé à travers une certaine fenêtre temporelle.

3.2.1 Échantillonnage

Dans le but d'analyser le signal, il est important de correctement fixer la fréquence d'échantillonnage. L'échantillonnage va permettre de représenter le signal analogique comme une suite de valeurs ponctuelles. Le calcul de ce spectre se fait sur un très grand nombre d'échantillons temporels (généralement équivalent à une puissance de deux). L'intervalle de temps entre deux échantillons temporels correspond à la période d'échantillonnage du signal définie par la relation (15)

$$T_e = \frac{1}{f_e} \quad (15)$$

Echantillonner un signal temporel revient à le multiplier par une suite d'impulsions de Dirac, nommé peigne de Dirac de période T_e . Dans le domaine fréquentiel, cela revient à un produit de convolution. Graphiquement, cette opération permet de répéter et de translater le spectre d'origine (après transformée de Fourier) ; la période de répétition est $1/T_e$. Si la fréquence d'échantillonnage n'est pas choisie avec soin, un phénomène de repliement du spectre peut se produire. Afin d'éviter cela, il suffit de respecter le théorème de Shannon, *la fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale au double de la fréquence du signal analogique. En deçà de cette limite théorique, il n'est pas possible de reconstituer le signal d'origine* [52].

La Figure 14 résume les opérations mathématiques permettant d'échantillonner un signal $s(t)$.

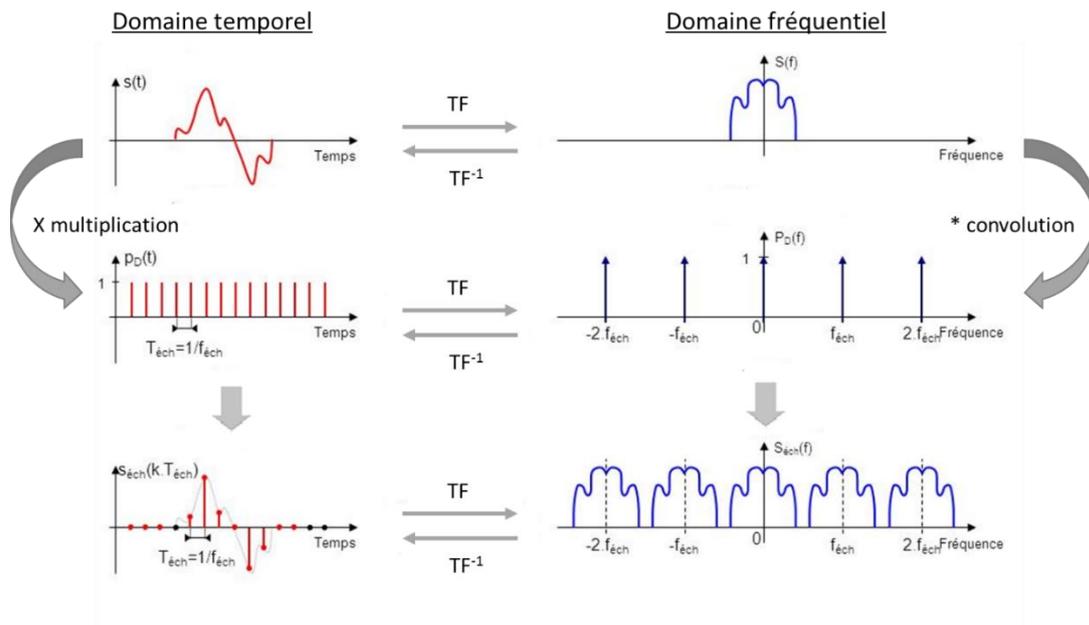


Figure 14 : Echantillonnage d'un signal dans le domaine temporel et fréquentiel

3.2.2 Fenêtrage

En pratique, le calcul de la transformée de Fourier ne peut être réalisé sur un temps infini, il s'effectue donc sur une durée d'observation réduite. Pour observer le signal, on le multiplie par une fonction de pondération afin que celui-ci soit nul en dehors de la fenêtre d'observation. Dans la littérature, il existe plusieurs fonctions de pondération classiquement utilisées, comme la fenêtre rectangulaire, de Hanning ou de Kaiser-Bessel [53]. Chacune de ces fenêtres modifie plus ou moins le spectre du signal, la fenêtre utilisée sera donc choisie en fonction du type de signal étudié.

3.3 Analyse en 1/nième d'octave

Une analyse fréquentielle sur une large bande peut engendrer une grande quantité d'informations à traiter. Cependant, si l'on cherche à connaître la répartition spectrale des niveaux de bruit, une analyse par octave ou par tiers d'octave est couramment utilisée en acoustique [54]. Cette analyse se traduit par le découpage du domaine fréquentiel en bandes de largeur relativement constante. De plus, elle permet de traduire la réponse de l'oreille aux signaux sonores. D'après les normes, l'octave est définie comme un domaine fréquentiel dont la fréquence limite supérieure est égale au double de la fréquence limite inférieure du domaine. Suite à ce type d'analyse, un spectre de bande, c'est-à-dire un histogramme représentant le niveau sonore par bandes d'octave dans le domaine fréquentiel est obtenu. Les fréquences

centrales sont normalisées. Dans le cadre d'une analyse par tiers d'octave, la bande de fréquence est définie telle que les relations (16) et (17) soient vérifiées

$$f \in [f_1, f_2] \text{ tel que } f_2 = 2^{1/3} f_1 \quad (16)$$

$$f_c = 2^{1/6} f_1 = 2^{-1/6} f_2 \quad (17)$$

Dans ce cas on a $\frac{\Delta f}{f} = \frac{f_2 - f_1}{f_c} = \frac{(2^{1/3} - 1)f_c}{2^{1/6} f_c} \approx 0,23$ qui est bien une constante.

Tableau 3 : Fréquences normalisées pour l'analyse par octave et tiers d'octave

Fréquences centrale (Hz)		Limites de bandes (Hz)	
Octave	Tiers d'octave	f_1	f_2
125	100	88	113
	125	113	141
	160	141	176
250	200	176	225
	250	225	283
	315	283	353
500	400	353	440
	500	440	565
	630	565	707
1000	800	707	880
	1000	880	1130
	1250	1130	1414
2000	1600	1414	1760
	2000	1760	2250
	2500	2250	2825
4000	3150	2825	3530
	4000	3530	4400
	5000	4400	5650
8000	6300	5650	7070
	8000	7070	8800
	10000	8800	11300

Le Tableau 3 reprend les fréquences normalisées du domaine audible de 100 à 10 000 Hz. Pour obtenir les autres fréquences, il suffit de multiplier par 10 et 100 ce premier cycle de base.

L'analyse par octave ou tiers d'octave sont les techniques les plus classiques et les plus utilisées, cependant n peut être supérieure à 3. Dans ce cas-là, $\Delta f/f$ est constante, les bandes de fréquences vont être équidistantes sur une échelle de fréquence logarithmique alors que sur une échelle linéaire, la largeur va augmenter de manière logarithmique. Ce phénomène est représenté schématiquement à la Figure 15.

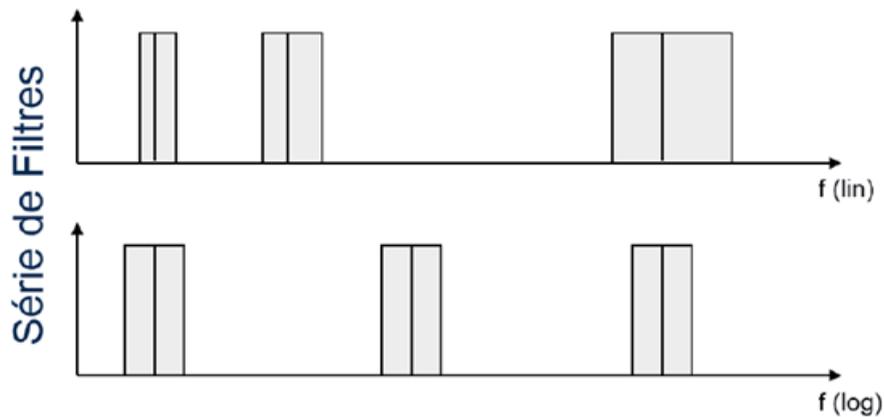


Figure 15 : Schéma de la largeur de bande sur une échelle linéaire et logarithmique

Lors de la représentation d'analyse d' $1/n$ -ième d'octave, il est important de préciser la largeur des bandes choisies puisque plus n est grand plus l'analyse est fine.. Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi une représentation en 1/6 d'octave ($\Delta f/f = 0,115$).

4. Analyse sensorielle

Selon la norme NF ISO 5492 [55], l'analyse sensorielle est décrite comme une science relative à l'étude des propriétés organoleptiques d'un produit. Elle regroupe l'ensemble des méthodes, des techniques et pratiques qui permettent d'évaluer les qualités d'un produit. Les qualités organoleptiques sont les caractéristiques propres à chaque produit faisant intervenir l'ensemble des sens de l'humain.

Il existe différentes méthodes d'analyse sensorielle, le choix de celle-ci s'effectue évidemment en fonction des objectifs de l'étude. La démarche sera différente selon que l'on cherche à établir une carte d'identité du produit ou que l'on cherche à déterminer la préférence des consommateurs entre plusieurs produits. Quelle que soit la méthode d'évaluation sensorielle choisie, l'évaluation des produits est toujours réalisée par un groupe de personnes recrutées,

entraînées, et dont les performances sont contrôlées. Comme la méthode repose sur l'appréciation des individus, il est important de rigoureusement suivre les protocoles d'expérience afin d'éviter tous biais. Pour cela, un ensemble de normes régit les méthodes d'évaluation sensorielles.

4.1 Méthodes d'analyse sensorielle

En analyse sensorielle, différentes méthodes peuvent être utilisées pour évaluer un produit en fonction d'un critère sensoriel précis : visuel, tactile, auditif ou encore olfactif. En fonction de l'objectif de l'étude et de la nature du produit, la méthode d'analyse ne sera pas la même. Il existe deux grandes familles d'analyse sensorielle : l'analyse objective et l'analyse subjective.

L'analyse objective permet de réunir des données objectives sur les propriétés sensorielles d'un produit. Elle est mise en œuvre par une analyse discriminative ou descriptive, le plus souvent elle est effectuée par des sujets entraînés. La seconde famille d'analyse sensorielle est l'analyse subjective, plus connue sous le nom d'analyse consommateurs. Elle permet notamment d'obtenir des données relatives à l'acceptabilité et d'établir la préférence des consommateurs pour tel ou tel produit. A l'inverse de l'analyse objective, elle est généralement réalisée par des sujets non entraînés.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi d'appliquer une analyse sensorielle objective avec des sujets entraînés. L'un des objectifs de cette étude étant de quantifier et d'identifier les différences qui peuvent être perçues entre les bruits de frottements des étoffes, nous nous sommes dirigés vers des tests descriptifs et non discriminatifs. En effet, les tests discriminatifs ont pour objectif principal d'évaluer les probabilités de similitudes ou de différences entre différents produits. Seule cette méthode sera donc décrite dans la suite.

Les tests descriptifs permettent d'obtenir des descriptions sensorielles complètes des produits [56], ils englobent à la fois la discrimination et la description sensorielle qualitative et quantitative des produits. Différentes familles de tests descriptifs peuvent être mises en œuvre mais toutes ne peuvent pas s'adapter à l'évaluation sensorielle des bruits de frottement des étoffes, comme par exemple la méthode du profil de flaveur qui ne trouve des applications que dans le domaine agroalimentaire. La méthode d'analyse descriptive quantitative, aussi appelée profil sensoriel, permet d'établir une description complète des produits grâce à une liste des descripteurs établie par le panel et son animateur. Ce type de méthode permet notamment d'évaluer plusieurs produits lors d'une même séance de caractérisation, de ce fait, on obtient

un jugement relatif des produits avec un degré correct de précision [56]. Dans le cadre d'une analyse sensorielle, il est intéressant d'obtenir un tel jugement puisque comme nous l'avons vu, il est plus facile de détecter une différence relative qu'une valeur absolue.

La Figure 16 présente un exemple de profil sensoriel d'un produit quelconque, celui-ci est caractérisé par neuf descripteurs sensoriels. Pour chacun de ces descripteurs un nombre x de panélistes a attribué une note correspondant à la sensation qu'ils ont perçus.

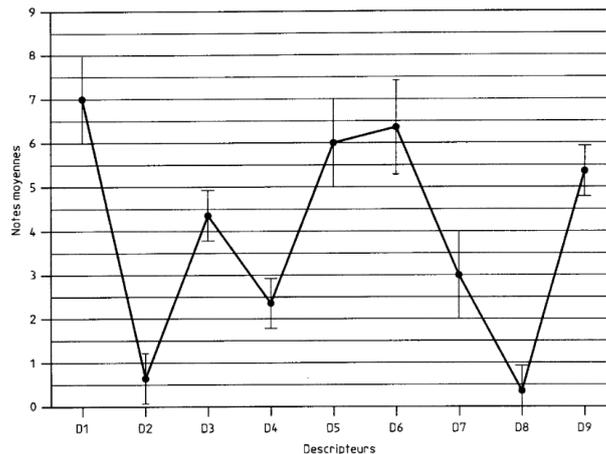


Figure 16 : Exemple de profil sensoriel [57]

De par le contrôle des performances des panélistes et le traitement statistique des données sensorielles, cette méthode d'analyse est considérée comme fiable, reproductible et objective. En outre, elle permet d'établir une carte d'identité du produit avec un minimum de descripteurs sensoriels.

4.2 Profil sensoriel conventionnel

Dans ce paragraphe, nous allons développer cette technique d'analyse sensorielle, déjà utilisé par Yosouf dans ces travaux. L'établissement de profils sensoriels conventionnels repose notamment sur la norme NF ISO 11035 [57] qui détaille les étapes clés de ce protocole. Celui-ci peut être résumé par la Figure 17. Lorsque l'ensemble de ces étapes a été réalisé, les sujets peuvent alors évaluer les produits.

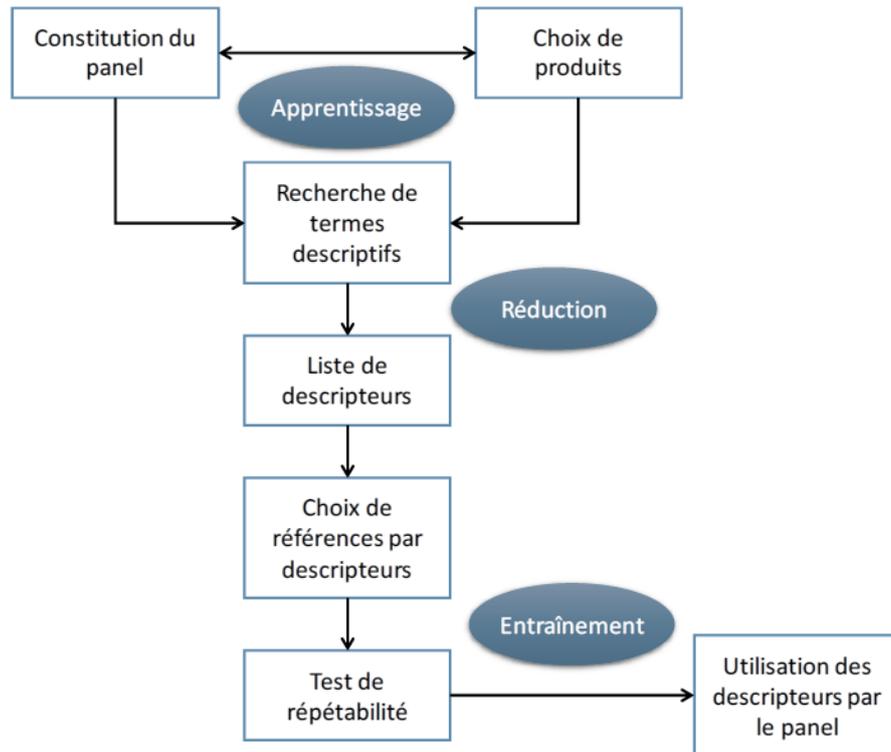


Figure 17 : Protocole de recherche et de sélection de descripteurs en vue de l'établissement de profil sensoriel conventionnel [57]

4.2.1 Choix des panélistes

La première étape de ce protocole est de recruter un certain nombre de panélistes afin de les entraîner avant de commencer la caractérisation des produits qui nous intéressent. La sélection, l'entraînement des individus ainsi que le contrôle de leurs performances sont explicités dans les normes NF ISO 8586-1 et NF ISO 8586-2 [58]. L'ensemble des individus recrutés pour des tests d'évaluation sensorielle vont former des panels à vocation qualitative ou quantitative. Dans les deux cas, les panels doivent tendre vers une certaine objectivité, ils doivent donc avoir des capacités de répétabilité, de reproductibilité et de justesse qui seront vérifiées par la suite.

Dans la littérature, les auteurs s'accordent sur un nombre optimal d'une dizaine de personnes [56]. Les individus recrutés pour de telles analyses peuvent être qualifiés de :

- Naïfs, ces sujets ne répondent à aucun critère spécifique et n'ont jamais participé à des essais sensoriels.
- Initiés, ces sujets ont déjà participé à un essai d'analyse sensorielle.
- Qualifiés, ces sujets sont choisis pour leur aptitude à effectuer un essai sensoriel.

- Experts, ce sont des sujets possédant une excellente acuité sensorielle, entraînés à l'utilisation des profils sensoriels. De plus, ils sont capables de réaliser de façon fiable l'analyse sensorielle de divers produits.

Le recrutement des panélistes peut être interne comme externe à l'entreprise ou au laboratoire, les avantages et inconvénients de ces deux types de recrutement sont exposés dans la norme NF ISO 8586. Quel que soit le groupe constitué, il est nécessaire de s'assurer de la motivation des panélistes et de vérifier leur capacité sensorielle. Cette étude portant sur les bruits de friction des textiles, il sera donc important de vérifier l'acuité auditive des panélistes.

4.2.2 Etablissement de la liste des descripteurs

La liste de descripteurs peut être établie de deux manières possible soit au préalable soit par consensus entre les panélistes sélectionnés et l'animateur. L'utilisation d'une liste préétablie c'est-à-dire sans que les panélistes ne soient impliqués dans le choix des termes, permet de raccourcir considérablement la durée de cette étape. Cependant, si on privilégie l'établissement d'une liste par consensus, le panel possède une meilleure compréhension des termes puisque les panélistes ont activement participé à leur sélection [59].

La norme NF ISO 11035 décrit les cinq étapes permettant l'établissement d'une telle liste :

- 1) Recherche du plus grand nombre de descripteurs
- 2) Premier tri qualitatif
- 3) Deuxième tri quantitatif
- 4) Troisième tri statistique
- 5) Entraînement du panel à la liste réduite

Lors de la première séance, un travail individuel est demandé aux panélistes. Il leur est demandé de proposer autant de termes qu'ils le souhaitent afin de traduire les sensations qu'ils perçoivent lors de l'écoute des sons de friction. Par la suite, une mise en commun de ces termes est faite et des discussions entre le groupe et l'animateur permettent de les analyser. A la fin de cette étape, une liste d'une centaine de descripteurs différents est généralement obtenue. Lors de cette étape, l'animateur choisit la gamme et le mode de présentation des produits. Il peut les présenter de façon simultanée ou monadique, chaque méthode ayant ses avantages.

Le premier tri quantitatif est effectué lors des premières séances, il permet notamment de supprimer les termes hédoniques, c'est-à-dire les termes qui traduisent la satisfaction du panéliste, comme par exemple, le terme *agréable*. Les termes quantitatifs et non pertinents dans

le cadre d'une évaluation donné sont également retirés. Par exemple, dans une étude acoustique les termes *son fort ou faible* ne seront pas retenus.

Suite à cela, une réduction quantitative sera effectuée afin d'éliminer les termes qui ne permettent pas de réellement différencier les produits. Pour cela, on demande au panel de réévaluer les produits avec l'ensemble des descripteurs en attribuant à chacun une valeur comprise entre 0 et 5 ; cela traduit l'intensité perçue par les panélistes. Afin de procéder à la réduction des termes, la moyenne géométrique de chaque descripteur est déterminée, ils seront ensuite classés selon la valeur de celle-ci. La moyenne géométrique que l'on note M se traduit par l'équation suivante:

$$M = \sqrt{F \cdot I} \quad (18)$$

Avec F le nombre de citations du descripteur par rapport au nombre total de citations possibles et I le rapport de la somme des intensités perçues par le panel sur la somme des intensités maximales possibles. Les deux paramètres F et I sont exprimés en pourcentage[7] [60]. Au regard de ce classement, les descripteurs qui représentent moins de 10% de l'information seront supprimés de la liste.

Enfin, une Analyse en Composantes Principales (ACP) ou une Classification Ascendante Hiérarchique permettra de réduire une dernière fois la liste par la mise évidence des termes synonymes (corrélations positives entre eux) et des termes antonymes (corrélations négatives). Les termes antonymes mis en évidence peuvent être regroupés sous un seul terme que l'on qualifiera de descripteur bipolaire. L'objectif de ce dernier tri est d'obtenir une liste réduite qui selon les recommandations de la norme NF ISO 11035 ne doit pas dépasser la quinzaine de descripteurs pertinents.

Lors de la dernière étape, on va s'assurer que l'ensemble des panélistes ait la même compréhension des descripteurs et qu'ils appréhendent de la même manière la méthode de caractérisation sensorielle. Afin de quantifier les sensations de façon numérique, des échelles de notation sont définies, notamment par la norme NF ISO 4121 [61]. Dans le cadre de l'analyse descriptive quantitative, deux types d'échelles sont essentiellement utilisées : les échelles structurées et les non structurées.

A noter que dans notre étude, cette étape fastidieuse et importante ne sera pas mise en pratique puisque nous allons utiliser la liste de descripteurs sensoriels définie par Yosouf lors de ses travaux de thèse [7].

Une fois le recrutement des panélistes effectué et la liste de descripteurs établie, une phase d'entraînement est essentielle afin que les sujets puissent s'habituer à la méthode, se familiariser avec les descripteurs et mémoriser les références. La validation de cette étape se traduit par un contrôle au niveau des performances individuelles des panélistes ainsi qu'au niveau du groupe.

4.2.3 Contrôle des performances du panel

Le contrôle de ces performances est orienté selon trois critères différents : la répétabilité, le pouvoir de discrimination et l'homogénéité des réponses des panélistes.

a) Répétabilité des panélistes

L'évaluation sensorielle des produits étant réalisée sur plusieurs séances, il est important de vérifier la répétabilité des panélistes. L'évaluation d'un produit par le panéliste doit être la même entre les différentes séances de caractérisation. Pour cela, plusieurs séances d'entraînement sont nécessaires. D'après Stone et Sidel [56], quatre répétitions sont suffisantes pour obtenir une bonne répétabilité. La répétabilité peut être évaluée pour chaque panéliste mais également au niveau du groupe.

Pour mesurer la répétabilité des panélistes, deux méthodes sont possibles. La première consiste à calculer l'écart-type des réponses sensorielles pour chaque descripteur. Une valeur d'écart-type faible indiquera une bonne répétabilité du panéliste considéré [41]. La deuxième méthode est basée sur une analyse de variance à un facteur produit (ANOVA). L'erreur résiduelle, c'est-à-dire l'écart entre deux séances d'évaluation sensorielle est notée ε et est définie par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{CMR_{intra}}{\bar{X}}} \quad (19)$$

Où CMR_{intra} est le carré moyen résiduel dû à l'effet du produit. Il représente la somme des variances entre les produits pour un descripteur évalué pendant deux séances successives. Et \bar{X} représente la moyenne des notes données par un panéliste lors de deux séances successives pour un descripteur donné.

On peut fixer une erreur de répétabilité critique ($\varepsilon=1$), en dessous de laquelle le panéliste sera considéré comme répétable. Si l'erreur est trop importante pour un descripteur donné alors des séances supplémentaires d'entraînement sont nécessaires.

En ce qui concerne la répétabilité au niveau du groupe, elle peut être évaluée pour chaque descripteur en comparant la note moyenne du panel entre les différentes séances d'évaluation.

b) Pouvoir de discrimination

Le deuxième critère pour juger des performances des panélistes est l'étude de leur pouvoir de discrimination. Il s'agit donc de déterminer si les panélistes sont capables de différencier deux produits différents pour un descripteur donné [63]. Les panélistes n'ayant pas les mêmes sensibilités, ils peuvent être plus ou moins discriminants, il est donc souvent intéressant de comparer le nombre de descripteurs pour lesquels les panélistes sont discriminants.

Répétabilité et pouvoir de discrimination ne sont pas nécessairement liés. En effet, un panéliste qui attribue une note nulle à chaque session, est certes fortement répétable mais ne différencie en aucun cas les produits. Dans l'optique d'évaluer ce pouvoir de discrimination, une analyse de variance à un facteur produit est appliquée. La probabilité du facteur, notée P-value, va nous renseigner sur l'existence d'une différence significative entre deux produits. La discrimination entre deux produits est acceptée avec un risque de 5 ou 10%. Par conséquent, si la probabilité P-value est inférieure à 0,05 ou 0,1 alors on considère que le panéliste a la capacité de différencier les produits pour un descripteur donné.

c) Homogénéité des réponses

Le dernier critère à évaluer est l'homogénéité des réponses des panélistes au cours de leur entraînement. Celle-ci a été jugée en utilisant une ANOVA à deux facteurs, produit et sujet. De façon analogue à l'étude du pouvoir discriminant des panélistes, nous allons nous intéresser à la valeur de P-value :

- Si P-value d'interaction est inférieur à 5% ou 10% : le test est significatif et les panélistes n'évaluent pas les produits de la même manière. Les panélistes ne sont pas en accord pour la compréhension des descripteurs et par la suite leur réponse n'est pas homogène.
- Si P-value interaction est supérieure à 5% ou à 10% : le test n'est pas significatif et les panélistes sont en accord pour l'évaluation du bruit de frottement des étoffes pour les descripteurs en question.

Lorsque l'interaction (sujet \times produit) est significative, une analyse en composantes principales (ACP) permet de mettre en évidence les panélistes qui ne sont pas en accord avec le groupe pour chaque descripteur. La position des panélistes sur le cercle de corrélation permet de savoir lesquels d'entre eux ne sont pas véritablement en accord avec les termes de chaque descripteur.

4.3 Applications de l'analyse sensorielle

La majorité des applications décrites dans la littérature concernent le domaine agro-alimentaire. En effet, cette technique d'analyse a essentiellement été développée pour répondre aux besoins de ce domaine. L'un des objectifs majeurs est d'évaluer les désirs et les préférences des consommateurs pour tel ou tel produit [64]. Pour cela, on cherche à déterminer les aspects positifs et négatifs des produits.

Par la suite, l'analyse sensorielle s'est amplement développée et fait aujourd'hui partie intégrante de la stratégie commerciale et marketing des entreprises [65]. Des référentiels sensoriels ont été mis au point comme le référentiel visuel Pantone® créé en 1963 par Lawrence Herbert ou le référentiel olfactif nommé Le champ des odeurs® inventé par Jean-Noël Jaubert en 1983 [66].

Même s'ils n'en sont pas toujours conscients, l'ensemble des critères sensoriels joue un rôle important auprès des consommateurs, c'est pourquoi l'analyse sensorielle est maintenant utilisée pour de nombreux produits industriels (cosmétiques, automobile ...). Si l'on prend le cas du secteur automobile, de nombreuses études ont été menées, que ce soit au niveau de l'odeur qui est l'un des premiers stimulus sensoriel perçu lorsque la portière s'ouvre [67], au niveau du son engendré par le claquement de la portière [68], ou encore au niveau du toucher et de la vision [69].

Dans le secteur textile, l'analyse sensorielle est principalement appliquée à l'évaluation du toucher. L'une des premières études visant à évaluer le toucher des textiles a été menée par Bogaty *et al.* en 1956 [70], qui ont travaillé sur la perception de la rugosité des étoffes et l'influence des propriétés de celle-ci, telles que le diamètre des fibres sur le toucher textile. En 2002, Thongsoume-Philippe [62] a étudié lors de sa thèse les effets des apprêts, tels que des traitements adoucissants ou silicone sur le toucher des étoffes ; des différences significatives ont été mises en évidence.

Dans le domaine acoustique, des études ont été menées afin d'évaluer la qualité sonore des produits comme le croustillant de certains aliments, le son de mastication en fonction de la texture (Dacremont [71]) ou encore les bruits émis par des installations industrielles ou par le trafic automobile. Ces dernières études s'inscrivent dans le cadre de la lutte anti-bruit.

Les études concernant l'évaluation des bruits de friction des étoffes sont relativement récentes et datent des années 2000. Une grande partie des études ont été menées sur le dispositif MAFN décrit le paragraphe 2.1. L'une des premières études mettant en évidence l'influence des bruits

de frottement textiles sur les perceptions sensorielles a été menée par Cho *et al* en 2001 [72]. Au cours d'une deuxième étude [73], ils ont cherché à comparer les bruits de friction d'étoffes en polyester, en soie et en laine. Les descripteurs utilisés pour décrire les bruits de frottements étaient les suivants : « *softness, loudness, sharpness, clearness, roughness, highness et pleasantness* ». Une échelle différentielle sémantique a été choisie pour l'évaluation. Ils ont ainsi montré que chaque type d'étoffe provoque une sensation différente chez les sujets et que les bruits de frottement des étoffes en soie sont décrits comme plaisants et doux. En 2005, Cho *et al* ont réalisé une étude similaire afin de constater l'influence de la structure de tricots polyesters sur les bruits de friction et de mettre en évidence l'impact des liages sur leurs propriétés.

En 2002, Kim *et al* [74] ont travaillé sur l'influence de l'armure des étoffes et le type de fils utilisé sur les paramètres psychoacoustiques dits de Zwicker (*sharpness, loudness, roughness et fluctuation strength*). Ces quatre paramètres sont définis par la norme NF S30-102 [75]. Au regard de leurs résultats, ils ont mis en évidence une relation entre l'armure du tissu et l'énergie spectrale tandis que le type de fil influe plutôt sur la forme du spectre. Ils se sont par la suite intéressés à l'influence de la section des fibres sur les bruits de frottement [76] d'étoffes de polyester. Des fibres de section circulaire, triangulaire, cruciforme, en forme de U et creuse ont été utilisées pour cette étude. Les spectres des bruits de frottements ainsi que leurs propriétés psychoacoustiques (i.e. les paramètres de Zwicker cités précédemment) ont permis de mettre en évidence que ce sont les fibres creuses qui induisent le bruit de friction le plus important. Concernant les paramètres de Zwicker, la section des fibres joue un rôle important sur deux des quatre paramètres (*loudness et sharpness*).

Lorsque l'on étudie les bruits de frottements des étoffes, un des paramètres les plus importants est le niveau sonore de ceux-ci. En 2007, Cho *et al* ont regardé l'influence de ce niveau sonore compris entre 40 et 60 dB sur les paramètres psychoacoustiques de Zwicker sur un panel non entraîné [77]. Un de leurs résultats majeurs a permis de montrer que si l'on augmente le niveau sonore de 10 dB, le paramètre de *loudness* double. De plus, les différences de perception sont plus importantes si l'on compare des bruits de 40 et 50 dB que lors de la comparaison de bruits de 50 et 60 dB. Lors de ces travaux, les perceptions ont été décrites à l'aide de sept descripteurs bipolaires sur une échelle linéaire allant de -3 à 3.

Les recherches les plus récentes en termes d'analyse sensorielle acoustique ont été menées au sein du LPMT par Yosouf en 2016 [7]. Il a caractérisé les sons de friction d'étoffes d'armures

différentes grâce à quinze descripteurs, et ce pour deux vitesses de frottements. Pour la plupart des armures testées, la vitesse de frottement ne modifie pas de façon significative la perception des sons des panélistes.

Même si les analyses sensorielles sont objectives, des études ont montré l'existence de biais culturels. Par exemple en 1997, Kuwano *et al* ont prouvé que le jugement sonore d'un même produit n'est pas évalué de la même façon selon la culture du panéliste [78]. En 2003, Na *et al* ont comparé les réponses sensorielles de sujets de deux nationalités différentes (américaine et coréenne) [79]. De plus, les volontaires étaient d'âges, de genre et de domaine d'activité différents. Que ce soit l'âge, le genre ou encore le domaine d'activités, les sujets ne ressentent pas les mêmes sensations face aux bruits de friction. Mais c'est la différence de nationalité qui influe le plus sur le ressenti des sujets. Ainsi, les Américains seront plus sensibles aux bruits de frottement d'étoffes en laine et les Coréens auront une préférence pour les bruits de frottement des étoffes en soie.

5. Traitement statistiques des données

Dans le cadre de cette étude, les données instrumentales et sensorielles ont été analysées à l'aide de différents outils statistiques. L'ensemble de ces outils est détaillé dans ce paragraphe.

5.1 Outils statistiques

Dans un premier temps, l'homogénéité des variances a été vérifiée par une analyse de variance sur les données brutes. Dans le domaine textile, le paramètre le plus souvent utilisé pour déterminer la cohérence des résultats est le coefficient de variation CV% déterminé par l'équation suivante :

$$CV\% = 100 \times \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad \text{avec } \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (20)$$

Avec σ l'écart-type relatif de la population et \bar{x} la moyenne de celle-ci. Ce coefficient permet de calculer la dispersion relative des résultats, plus la valeur du coefficient sera élevée, plus la dispersion autour de la moyenne sera grande. Les matériaux textiles étant des surfaces hétérogènes, la valeur du CV% peut être relativement importante, cela traduit la variabilité de ces matériaux.

De plus, afin d'évaluer la précision de l'estimation d'un paramètre mesuré sur un échantillon, la Limite Pratique d'Erreur (LPE) dans l'intervalle de confiance IC a été calculée. L'intervalle de confiance et la limite pratique d'erreur s'expriment selon les équations suivantes :

$$IC = ts \times \frac{\sigma}{\sqrt{N-1}} \quad (21)$$

$$LPE = 100 \times \frac{IC}{\bar{x}} \quad (22)$$

Avec ts la valeur de la variable t-Student issue des tables statistiques pour une probabilité α fixée à 5%, σ représente l'écart-type de la population statistique considérée. Le paramètre N est le nombre de mesures réalisées et \bar{x} la moyenne de la population.

Pour que les résultats soient statistiquement valables, notamment dans le cas des mesures effectuées avec le Kawabata Evaluation System, un nombre suffisant de mesures est nécessaire. La Figure 18 présente l'évolution du coefficient de variation et de la limite pratique d'erreur en fonction du nombre de mesures réalisées.

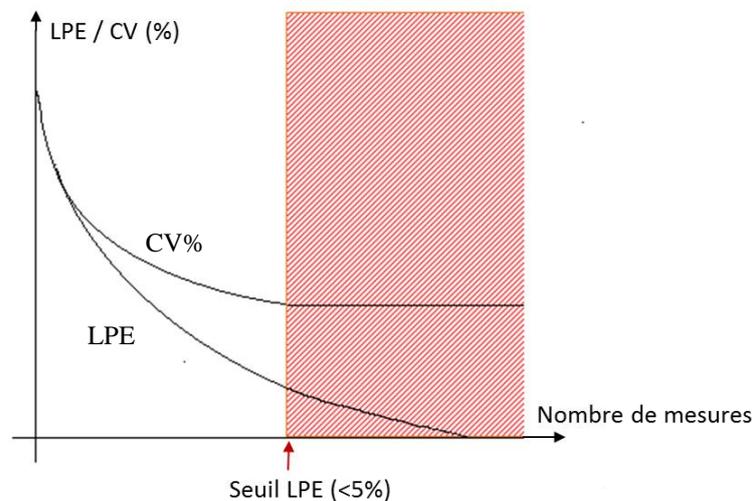


Figure 18 : Evolution des paramètres de LPE et du CV en fonction du nombre de mesures réalisées

Lorsque la valeur seuil de la LPE est atteinte, le nombre de mesures est satisfaisant et par conséquent, le coefficient de variation est statistiquement représentatif. Préférentiellement, le seuil de la LPE est fixé à 3% mais les résultats sont acceptables dès que celle-ci est inférieure à 5%.

5.2 Analyse de corrélation

Afin de pouvoir comparer les bruits de frictions entre eux, on propose d'estimer la corrélation entre deux courbes à l'aide du coefficient défini comme suit :

$$COR(X, Y) = \sqrt{\frac{Covariance(X, Y)^2}{Variance(X) \cdot Variance(Y)}} \quad (23)$$

Où X et Y représentent deux spectres sonores différents. Le coefficient a été arbitrairement déterminé sur le domaine fréquentiel [900 Hz-10kHz]. Ce domaine correspond au domaine fréquentiel des bruits de frottements des étoffes. De plus, la comparaison ne s'effectue que pour les fréquentielles où le bruit du système de mesure n'est pas prépondérant. Plus la valeur du coefficient sera proche de 1, plus la corrélation entre les deux courbes sera grande.

5.3 Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est une méthode d'analyse statistique qui permet de comparer les moyennes sur plusieurs échantillons. Cette méthode est généralement utilisée lorsque le nombre de produits à étudier est supérieur ou égale à 3. Dans le cadre de l'analyse sensorielle, cette méthode permet essentiellement de savoir si des produits sont significativement différents au seuil de probabilité α ou si les panélistes discriminent correctement les différents descripteurs [7] [60]. L'ANOVA à un facteur et l'ANOVA à deux facteurs (produits et sujets) sont les deux modèles utilisés au cours de cette étude.

Le principe de l'analyse de la variance à un facteur est défini comme suit, on note

$x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n_1}$ les n_1 résultats mesurés pour le produit 1

$x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n_2}$ les n_2 résultats mesurés pour le produit 2

$x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn_k}$ les n_k résultats mesurés pour le produit k

La moyenne \bar{x}_i et la variance estimée σ_i^2 caractérisent le produit i et l'hypothèse que les σ_i^2 sont à peu près égaux est posée. La variance intra-population estimée par le carré moyen résiduel (CMR) et la variance inter-population donnée par le carré moyen dû à l'effet produit (CMP) sont ensuite calculées selon les équations suivantes :

$$CMR = \frac{\sum_{i,j}(x_{i,j} - \bar{x}_i)^2}{n-k} \quad \text{avec } n = \sum_1^k n_i \quad (24)$$

$$CMP = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}{k - 1} \quad (25)$$

Le calcul du rapport de la variance inter-population sur la variance intra-population F permet de montrer s'il existe une différence significative ou non entre les produits (équation (26)). Une fois la valeur F obtenue, elle est comparée à la valeur critique lue dans les tables statistiques de Fisher avec un risque α (le plus souvent égal à 5%) et avec les degrés de liberté correspondants (k-1 et n-k).

$$F = \frac{CMP}{CMR} \quad (26)$$

Deux cas sont alors possibles, soit $F_{calc} \leq F_{\alpha}$ alors cela signifie que la dispersion des résultats à l'intérieur des populations est plus importante que celles entre les moyennes et donc que les produits sont identiques ; soit $F_{calc} > F_{\alpha}$ alors les produits présentent des différences significatives au seuil de probabilité α .

Dans le cas de l'analyse à deux facteurs, appliquée à l'analyse sensorielle, les deux facteurs considérés sont les produits et les sujets (panélistes). A chaque répétition, les panélistes ont fourni des résultats sur les produits permettant d'évaluer l'interaction produit x sujet. Cette interaction permet de conclure sur la compréhension ou non des descripteurs par les panélistes à partir de la valeur F de Fischer

5.4 Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes principales (ACP) est une méthode descriptive multidimensionnelles qui permet de synthétiser l'information lorsque l'on a de nombreuses données quantitatives à interpréter. De plus, une représentation graphique des variables est possible afin de visualiser les corrélations existantes. Appliquée à un tableau de données composé de i observations ou unités statistiques et j variables [18], elle permet de le décrire et de le résumer tout en mettant en évidence les ressemblances entre individus et les liaisons entre les variables tout en minimisant la perte d'information. L'utilisation d'une ACP permet donc de réduire l'espace d'étude des variables et d'explicitier les corrélations inter-variables, inter-individus et variables-individus. De plus, l'analyse peut être menée sur des données centrées réduites, ce que l'on appelle l'ACP normée.

Le principe de cette méthode est basé sur une transformation linéaire des variables initiales dans un espace de faible dimension. Les variables d'origine sont ainsi remplacées par de nouvelles

variables de variance maximale non corrélées deux à deux. Ces nouvelles variables sont appelées composantes principales et définissent des plans factoriels permettant la représentation graphique des variables initiales. Le pourcentage de variance cumulée permet de sélectionner le nombre adéquat de composantes principales. De façon générale, des pourcentages de l'ordre de 70 à 90% sont conseillés [80].

En ACP normée, les variables sont projetées sur le plan factoriel défini à l'intérieur d'un cercle de rayon unité. De manière générale, plus une variable sera projetée vers le bord du cercle, mieux la variable sera représentée et donc plus elle sera significative. La valeur au carré du cosinus de l'angle (\cos^2) entre le vecteur de la variable et la composante principale de la projection permet d'évaluer objectivement la qualité de représentation de la variable sur le cercle [60]. Si deux variables correctement représentées sont proches l'une de l'autre, alors elles seront positivement corrélées. A l'inverse, si elles s'opposent sur le cercle, alors elles seront négativement corrélées. A noter qu'une orthogonalité entre deux variables traduira une absence de corrélation linéaire. Un exemple de représentation graphique des résultats d'une ACP [81] est présenté en Figure 19, d'après celui-ci on peut en conclure que :

- Les variables de l'ensemble étant proche du centre du cercle unité, elles ne sont pas considérées comme significatives (regroupement E).
- Chaque regroupement de variables représente un ensemble de variables positivement corrélées, comme c'est le cas, par exemple, pour les regroupements A ou B.
- Une opposition de groupes de variables par rapport à un axe (groupe A et B ou C et D) traduit une corrélation négative entre celles-ci.
- Lorsque les groupes sont opposés selon les deux axes, exemple des groupes B et F, l'axe choisi est celui dont les groupes sont le plus près. Dans le cas des groupes B et F, on choisira donc l'axe horizontal.

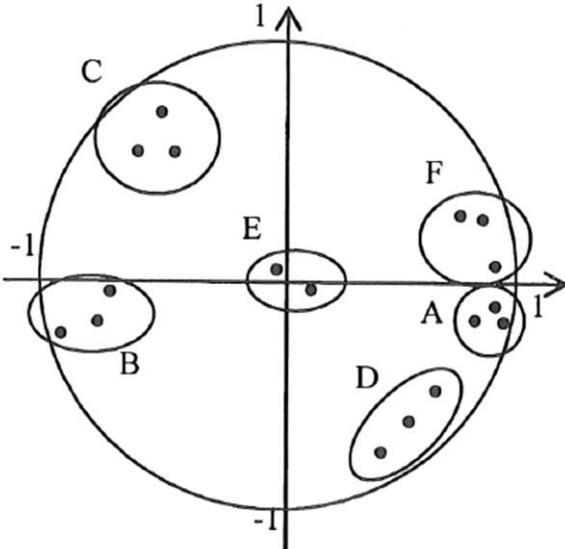


Figure 19 : Exemple de représentation graphique des variables en ACP [81]

Chapitre II. Matériels et Méthodes

Dans ce chapitre, les étoffes sélectionnées pour l'étude et leurs principales caractéristiques sont présentées. Dans un deuxième temps, les méthodes d'usure des échantillons et les protocoles associés sont exposées. Pour finir, le dispositif expérimental de génération et d'enregistrement des bruits de frottement est présenté. Enfin, la méthode d'analyse descriptive quantitative utilisée en analyse sensorielle est décrite.

1. Caractérisation des étoffes testées

1.1 Présentation des étoffes

Lors de notre étude, nous nous sommes concentrés sur l'étude des bruits de friction des étoffes techniques représentatives des tissus militaires. Pour cela, nous avons sélectionné quatre étoffes différentes dont les caractéristiques principales sont présentées dans le Tableau 4. L'ensemble de ces caractéristiques a été déterminé après avoir conditionné les étoffes au moins 24 heures dans une atmosphère standardisée (température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humidité relative de $65\% \pm 5\%$) comme le stipule la norme NF EN ISO 139 [82]. La contexture des tissus, ainsi que leur masse surfacique, ont été déterminées en suivant la procédure des normes NF EN 1049-2 [83] et NF G 07-150 [84]. Pour chaque paramètre, le nombre de mesure a été déterminé de façon à ce que la limite pratique d'erreur (LPE) soit inférieure à 3% et au moins cinq mesures ont été réalisées.

Tableau 4 : Caractéristiques des étoffes étudiées

Etoffe	Matière	Armure	Compte (fils/cm)	Duitage (fils/cm)	Titre en chaîne (tex)	Titre en trame (tex)	Masse surfacique (g/m ²)
1	Polyester/coton	Sergé 3	24	20	63	60	$258 \pm 0,54$
2	Kermel	Toile	27	23	34	25	$202 \pm 0,88$
3	Kermel	Toile	28	27	22	19	$180 \pm 0,64$
4	Kermel	Sergé 3	26	21	36	34	$213 \pm 0,49$

Les armures des étoffes analysées lors de cette étude sont présentées en Figure 20. Les armures ont été observées à l'aide d'une loupe binoculaire.

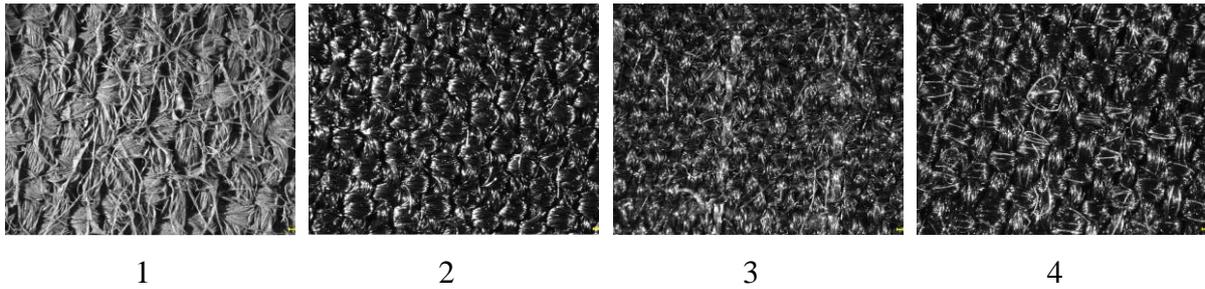


Figure 20 : Armures des étoffes analysées

1.2 Données mesurées par la chaîne d'évaluation KES-FB

1.2.1 Mesures des paramètres physiques

Comme expliqué précédemment, la structure même de l'étoffe est une source de bruit lorsqu'elle est soumise à un frottement, il est donc essentiel de connaître ses caractéristiques. Les étoffes textiles sont caractérisées par de nombreux paramètres mécaniques et physiques. La résistance à l'abrasion ou encore à la déchirure sont des paramètres mécaniques qui peuvent être évalués par l'intermédiaire de différents dispositifs.

Pour de nombreux dispositifs, l'évaluation des paramètres mécaniques engendre une rupture de l'étoffe, ce qui ne traduit pas les sollicitations réelles auxquelles est soumis un vêtement lorsqu'il est porté. Dans le cadre de notre étude, nous avons donc utilisé la chaîne de mesure Kawabata Evaluation System (KES-FB)[23]. Cette dernière permet de mesurer les propriétés mécaniques d'une étoffe sous de faibles contraintes mécaniques et surtout ses capacités de sollicitation et de relaxation [23] [45]. En effet, l'étoffe va être soumise à de faibles déformations qui se rapprochent des sollicitations liées à l'usage de cette dernière. L'ensemble des paramètres mesurés est décrit dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Paramètres mesurés par le système Kawabata Evaluation System

Module	Propriétés	Symbole	Unités	Unités SI
Compression FB-3	Linéarité de compression	LC	-	-
	Energie de compression	WC	gf.cm/cm ²	J.m ⁻²
	Résilience de compression	RC	%	%
	Epaisseur sous 50 Pa	T ₀	mm	mm
	Epaisseur sous 5 kPa	T _M	mm	mm
Surface FB-4	Coefficient de frottement	MIU	-	-
	Moyenne quadratique de MIU	MMD	-	-
	Rugosité géométrique	SMD	μm	μm
Flexion FB-2	Rigidité de flexion	B	gf.cm ² /cm	N/m
	Hystérésis du moment de flexion	2HB	gf.cm/cm	N/m
Cisaillement FB-1	Rigidité de cisaillement	G	gf/cm.deg	N/m.rad
	Hystérésis de cisaillement pour 0,5°	2HG	gf/cm	N
	Hystérésis de cisaillement pour 5°	2HG5	gf/cm	N
Traction FB-1	Linéarité de la courbe traction-allongement	LT	-	-
	Energie d'extension pour 5cN/cm	WT	gf.cm/cm ²	J.m ⁻²
	Résilience de traction	RT	%	%
	Elongation pour 5 cN/cm	EMT	%	%

Au cours de cette étude, nous nous sommes uniquement concentrés sur les propriétés de compression et de surface de l'étoffe mesurées par les modules FB-3 et FB-4 de la chaîne de Kawabata puisque lors de ses travaux, Yosouf [7] a démontré que seules ces propriétés avaient une influence sur les bruits de frottement des étoffes.

a) Propriétés de compression

L'épaisseur d'une surface textile en fonction de la pression exercée sur celle-ci évolue de façon exponentielle [86] (Figure 21). Le début de la courbe caractérise la pilosité de la surface textile : plus la pente à l'origine sera faible, plus l'étoffe sera pileuse. Au fur et à mesure que la pression augmente, la courbe tend vers une asymptote dont la valeur dépend du matériau. Cela correspond au moment où l'air est chassé de la structure et où les fibres sont déformées sous la pression exercée.

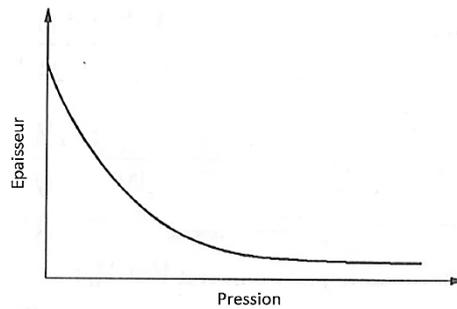


Figure 21 : Courbe de compression

Le module de compression du KES-F, présenté à la Figure 22, permet de réaliser un test en dynamique afin de déterminer les propriétés de compression des surfaces textiles. La Figure 24 nous montre le principe d'une mesure de compression. Le palpeur de compression va progressivement comprimer l'échantillon sur une surface circulaire de 2 cm². Lorsque la pression de compression atteint sa valeur limite de 5 kPa, le moteur s'inverse et le palpeur remonte. La vitesse d'essai doit être adaptée à l'épaisseur de l'étoffe testée. Pour des épaisseurs standards inférieures à 5 mm la vitesse est de 0,02 mm/s. Pour des épaisseurs plus importantes de 5 à 50 mm, la vitesse d'essai sera fixée à 0,2mm/s.

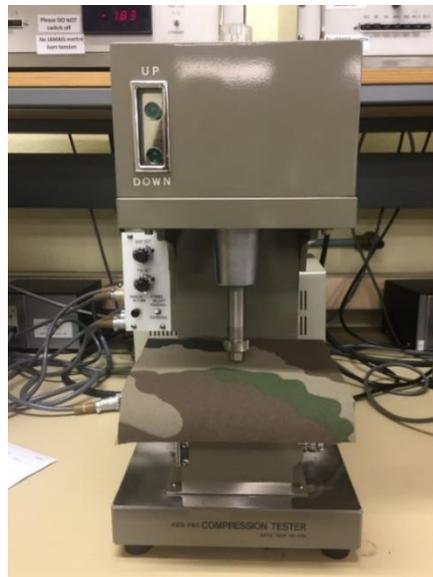


Figure 22 : Module KES - FB3

La courbe de compression et de décompression forment le diagramme de compression dont un exemple est présenté en Figure 23.

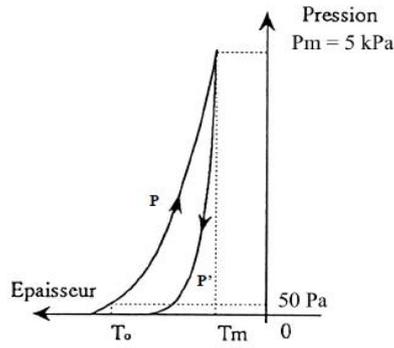


Figure 23 : Diagramme de compression et de relaxation donné par le KES-FB3

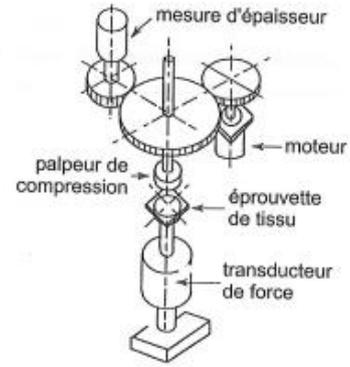


Figure 24 : Mécanisme du module de compression FB-3

Pour rappel, les paramètres donnés par ce module sont la linéarité de compression (LC), l'énergie de compression (WC), la résilience (RC), T_0 et T_M les épaisseurs de l'étoffe respectivement sous 50 Pa et 5 kPa. A partir du diagramme de compression, les différents paramètres mesurés sont définis comme suit :

$$WC = \int_{T_0}^{T_M} P \cdot dx \quad (\text{cN.cm/cm}^2) \quad (27)$$

$$RC = \frac{WC'}{WC} \times 100 \quad (\%) \quad (28)$$

$$WC' = \int_{T_0}^{T_M} P' \cdot dx \quad (\text{cN.cm/cm}^2) \quad (29)$$

$$LC = \frac{WC}{\frac{P}{2}(T_0 - T_M)} \quad (30)$$

Où P représente la pression de compression, P' la pression de relaxation, x le déplacement du palpeur. A partir des deux valeurs d'épaisseur de l'étoffe, le facteur de compressibilité EMC peut être défini selon l'équation (31).

$$EMC = \frac{T_0 - T_M}{T_0} \times 100 \quad (\%) \quad (31)$$

b) Propriétés de surface

Les propriétés de surface ont été évaluées à partir du module FB4 de la chaîne KES-F, présenté en Figure 25. Ce dispositif nous permet de mesurer deux grandeurs de l'état de surface d'une étoffe par l'intermédiaire de deux capteurs inductifs.

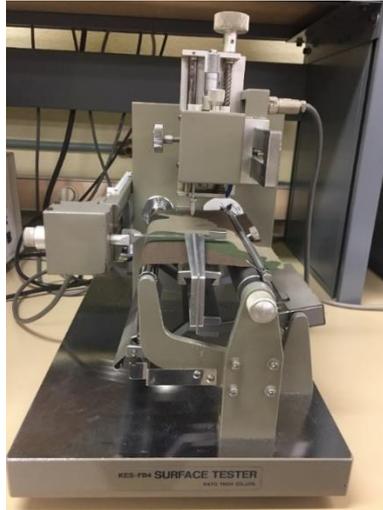


Figure 25 : Module KES – FB4

Ces deux capteurs ont été conçus, l'un pour simuler la surface d'un doigt et l'autre l'angle de celui-ci. Le premier est un capteur de frottement et le deuxième un capteur de rugosité. La friction est mesurée par le déplacement de l'étoffe sur une zone de 3 cm dans un sens puis dans l'autre et la vitesse d'essai est fixée à 1mm/s. Cependant, il faut noter que le calcul de la rugosité et du coefficient n'est réalisé que sur 2 cm (dans les deux sens), cette zone correspondant à une zone de stabilité du système de mesure. Le principe de mesure est représenté en Figure 26 ainsi que le diagramme décrivant l'état de surface du tissu.

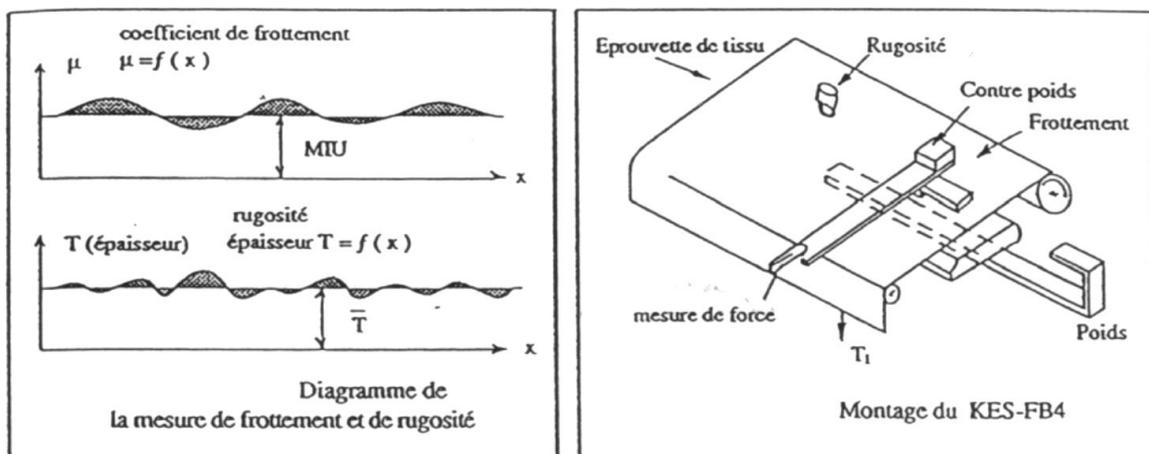


Figure 26 : Diagramme décrivant l'état de surface d'une étoffe et principe de mesure du dispositif

Suite à la mesure, trois paramètres sont déterminés : le coefficient de frottement (MIU), la moyenne quadratique du coefficient de friction (MMD) et la rugosité géométrique (SMD). Les paramètres sont définis par les équations suivantes :

$$MIU = \frac{1}{x} \times \int_0^x \mu \cdot dx \quad (32)$$

$$SMD = \frac{1}{x} \times \int_0^x |T - \bar{T}| \cdot dx \quad (\mu\text{m}) \quad (33)$$

$$MMD = \int_0^x |\mu - \bar{\mu}| \cdot dx \quad (34)$$

L'évolution des paramètres μ et T en fonction du déplacement x du capteur est présenté au diagramme, Figure 26. Ils correspondent respectivement au coefficient de frottement et à l'épaisseur de la surface textile.

2. Méthodes d'usure des étoffes

Comme énoncé dans l'introduction, dans cette étude nous nous sommes intéressés à l'influence de l'usure de la surface textile sur les bruits de frottement. A partir des étoffes précédemment citées, et grâce à deux méthodes différentes d'usure, deux jeux d'étoffes vont être créés. La première méthode consiste à laver de manière répétée les étoffes et la deuxième à user la surface textile par abrasion.

2.1 Méthode de lavage

Les lavages successifs d'un vêtement contribuent à son usure progressive. Dans l'optique de créer notre jeu d'étoffes, chaque étoffe a subi 50 lavages identiques. Nous parlons ici de méthodes de lavage et de séchage domestiques. Les lavages successifs des éprouvettes ont été réalisés dans des conditions proches de la norme NF ISO 6330 [87], afin que le lavage des échantillons soit similaire à un lavage ménager classique.

Les lavages sont réalisés à l'aide d'un lave-linge à chargement frontal Doméos LF 1206 SI en programme synthétique court à 40°C. La norme nous fournit des critères à respecter en ce qui concerne la charge d'appoint et le détergent utilisés.

En effet, la masse sèche totale de la charge du lave-linge, c'est-à-dire la masse des éprouvettes plus celle de la charge d'appoint, doit être de $2,0 \pm 0,1$ kg. Une charge de type I composée de carrés d'étoffe tissée unie en coton est utilisée.

Le détergent utilisé est un détergent sans phosphate, sans azurant optique et sans enzyme (détergent de référence n°3 dans la norme), dont la composition est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Composition du détergent de référence n°3[43]

Composition	Détergent de référence 3 %
Alkyle-benzène sulfonate de sodium, linéaire (longueur moyenne de chaîne alcane, C11-5)	7,5 (± 0,5)
Alcool gras éthyloxylé C ₁₂₋₁₈ (7EO)	4,0 (± 0,3)
Savon de soude (longueur de chaîne C ₁₂₋₁₇ 46 %; C ₁₈₋₂₀ 54 %)	2,8 (± 0,2)
Antimousse (DC-42485)	5,0 (± 0,3)
Silicate d'aluminium et de sodium zéolithe 4A	25,0 (± 1,0)
Carbonate de sodium	9,1 (± 1,0)
Sel de sodium d'un copolymère d'acide acrylique et maléique	4,0 (± 0,2)
Silicate de sodium (SiO ₂ :Na ₂ O = 3,3:1)	2,6 (± 0,2)
Carboxyméthylcellulose (CMC)	1,0 (± 0,1)
Diéthylène penta triamine (acide méthylphosphonique)	0,6
Sulfate de sodium	6,0 (± 0,5)
Eau	9,4
Perborate de sodium tétrahydraté (en tant qu'ajout séparé)	20,0
Tétra-acétyl-éthylène-diamine (TAED) (actif 100 %) (en tant qu'ajout séparé)	3,0
Total	100,0

Pour une meilleure homogénéisation du mélange, les composants sont mélangés à sec dans les proportions suivantes :

- 77 g de détergent ECE sans phosphates, qui est la base détergente
- 20 g de perborate de sodium tétrahydraté
- 3g de tétra-acétylène diamine

Lors des lavages, le détergent est utilisé sous forme liquide avec une concentration de 100 g/L et un dosage de 150 mL.

En ce qui concerne le séchage des étoffes, nous avons choisi d'appliquer le séchage sur fil. Comme précisé dans la norme, les étoffes une fois lavées sont alors suspendues par les deux coins et le sens chaîne de l'étoffe doit être placé à la verticale. De plus, dans la mesure où nos échantillons seront par la suite testés, le séchage se déroule en atmosphère conditionnée conformément à la norme NF ISO 139 [82].

2.2 Abrasion par procédé Martindale

La résistance à l'usure ou à l'abrasion des produits textiles est généralement évaluée par le procédé Martindale. Cela permet de simuler l'usure naturelle du produit, que ce soit un vêtement ou textile d'ameublement. La méthode Martindale est régie par la série de normes NF ISO 12947, partie 1 à 4 [88].

Au cours de notre étude, nous avons travaillé sur un Martindale série 1300, modèle 1302 James HealTM. Le dispositif est présenté en Figure 27.

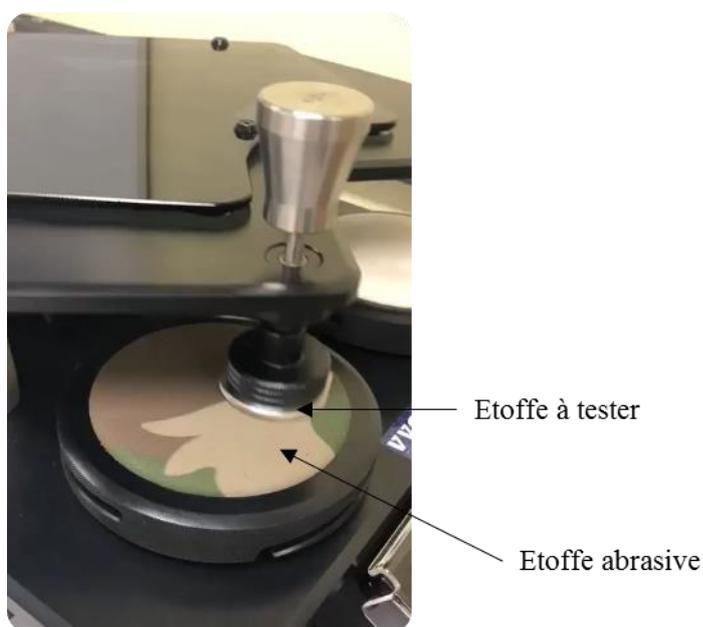


Figure 27 : Dispositif Martindale

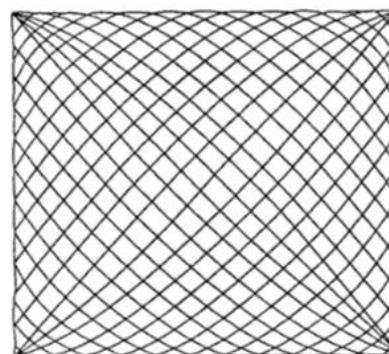


Figure 28 : Courbe de Lissajous

Lors des essais, une éprouvette circulaire est soumise à une charge définie (9 kPa ou 12 kPa selon le type d'étoffe testé) et à l'action de frottement d'une étoffe de laine normalisée qui sera l'élément abrasif. Les caractéristiques de cette étoffe de laine sont détaillées dans la norme NF ISO 12947-1 [88]. Le frottement s'effectue selon un mouvement de translation formant une courbe de Lissajous, présentée en Figure 28. Il est important de noter qu'un cycle d'abrasion regroupe l'ensemble des mouvements abrasifs formant la courbe de Lissajous. Cette courbe est générée progressivement par 16 frottements abrasifs. De plus, l'éprouvette est soumise à l'usure abrasive d'un nombre de frottements préalablement défini.

Dans le cadre de notre étude, nous souhaitons simuler l'usure d'un vêtement engendrée par le frottement répétitif du bras sur le haut du corps. De ce fait, l'élément abrasif sera remplacé par la même étoffe que celle à tester ; une abrasion étoffe contre étoffe sera alors réalisée.

De manière générale, on peut estimer qu'une personne réalise en moyenne 10 000 pas sur une journée et donc que le vêtement est sujet à autant de frottements. Pour chacune des étoffes, le nombre maximal de cycles d'abrasion a été fixé en fonction du nombre de cycles nécessaires à l'observation de la rupture de l'étoffe. Le Tableau 7 présente la gamme des cycles d'abrasion considérée pour chacune des étoffes étudiées.

Tableau 7 : Gamme des cycles d'abrasion pour chacune des étoffes

Étoffe	Gamme de cycles d'abrasion
1	De 0 à 25 000
2	De 0 à 10 000
3	De 0 à 12 000
4	De 0 à 10 000

La gamme des cycles d'abrasion pour chacune des étoffes indique qu'elles n'ont pas les mêmes résistances à l'abrasion. En effet, la rupture des étoffes 2, 3 et 4 se produit pour un nombre de cycles du même ordre de grandeur alors que plus du double de cycles est nécessaire pour observer la rupture de l'étoffe 1.

La Figure 29 illustre l'exemple de la rupture d'une étoffe, ici de l'étoffe 2, qui se produit après une longue abrasion. Sur cette photographie, on distingue nettement la rupture des fils et la formation d'un trou.



Figure 29 : Illustration de la rupture de l'étoffe

Ces deux méthodes vont donc nous permettre d'obtenir des échantillons dont la surface ne présente pas le même degré d'usure et ainsi par la suite étudier leur bruit de frottement.

3. Mesure instrumentale des bruits de friction

Cette partie détaille la méthode de génération et d'enregistrement des bruits de frottement. Le dispositif expérimental et les modifications apportées à celui-ci sont également décrites.

3.1 Dispositif expérimental

Le bruit de frottement des étoffes a été généré et enregistré en utilisant le dispositif expérimental conçu par Latroch [6]. Il est présenté en Figure 30.

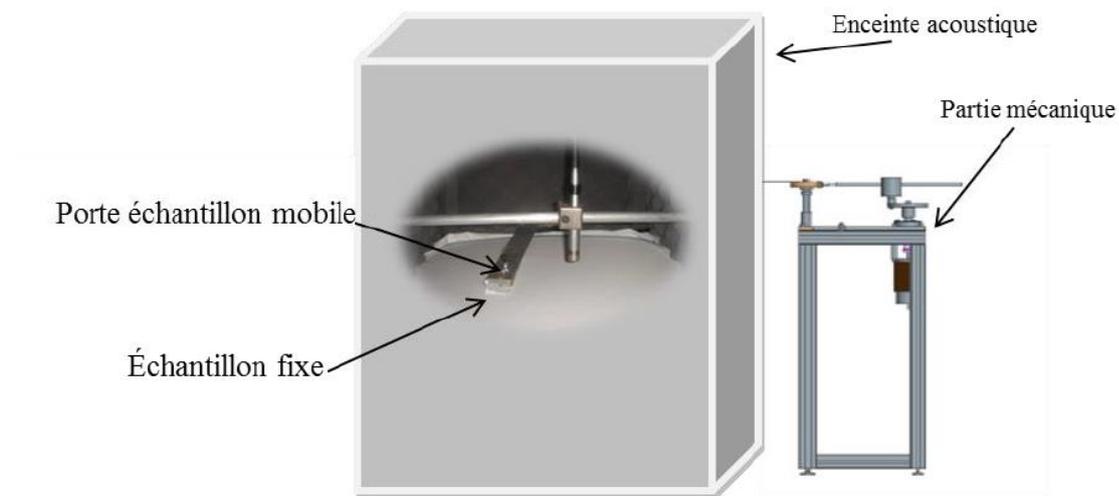
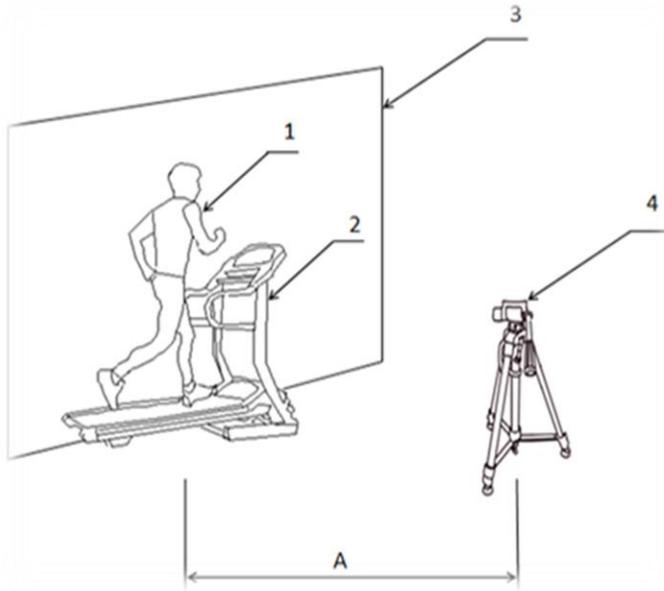


Figure 30 : Dispositif expérimental

La conception de ce dispositif a nécessité plusieurs études. Les conditions du frottement (étoffe contre étoffe) ont été déterminées par l'analyse vidéo du déplacement de volontaires sur un tapis de course. La méthode, présentée en Figure 31, a permis de déterminer la vitesse et la surface de frottement pour trois modes de déplacements différents : la marche, le footing et la course.



- 1- Volontaire
- 2- Tapis de course
- 3- Fond blanc de dimension 190x180 cm²
- 4- Caméra

Figure 31 : Méthode d'analyse du mouvement du bras [6]

Afin de déterminer la surface de frottement du bras contre le buste, une peinture à l'eau a été appliquée sur la surface intérieure du bras des volontaires. Au cours du mouvement, la peinture se transfère progressivement sur le vêtement (Figure 32). Le logiciel de traitement d'image Inkscape® permet de déterminer la position et l'aire de la surface de frottement. On constate sur cette figure que la surface de frottement dépend de la vitesse de déplacement du sujet.



Figure 32 : Exemples d'empreinte de peinture pour deux vitesses de déplacement

Lors de ses travaux, Yosouf [27] a introduit comme condition supplémentaire la pression existante entre le bras et le haut du corps lors du mouvement. Pour mesurer ce paramètre, il a utilisé un capteur de pression piézo-résistif (capteur FlexiForce™ A401) collé au-dessous du

bras et au centre de la zone de frottement (Figure 33). Les connecteurs ont été placés le long des coutures du vêtement.



Figure 33 : Positionnement du capteur de pression

L'ensemble des conditions de génération des bruits de friction est résumé dans le Tableau 8. On remarque que la vitesse du bras, la surface de frottement ainsi que la force d'appui augmentent avec la vitesse de déplacement du sujet.

Tableau 8 : Conditions expérimentales de frottement

Mode de mouvement	Vitesse moyenne du bras (m/s)	Surface de frottement (cm ²)	Pression appliquée (kPa)
Marche	0,56	90	1,67
Footing	0,94	120	2,35
Course	1,64	170	3,85

Le dispositif expérimental conçu par Latroch permet de simuler le mouvement d'une personne en mouvement tout en enregistrant les bruits de frottements générés. Ce système est composé de trois blocs distincts : une partie mécanique, une enceinte d'isolation acoustique et une partie « enregistrement ».

La partie mécanique du système assure la conversion de mouvement de rotation du moteur électrique en un mouvement de balancement d'angle 18°. En jouant sur la tension appliquée aux bornes du moteur, nous pouvons adapter la vitesse de frottement au type de mouvement que l'on souhaite étudier. Afin d'éviter que des bruits extérieurs ne perturbent les enregistrements, une isolation acoustique a été mise en place sous la forme d'une caisse parallélépipédique en médium d'épaisseur 10 mm, et ayant pour dimension 88x88x150cm³. L'intérieur de ce coffre est recouvert d'une mousse polyuréthane de 30 mm d'épaisseur collée

sur les parois. La chaîne d'acquisition permettant l'enregistrement des bruits de friction est composée d'un microphone Brüel&Kjaer, d'un amplificateur Brüel&Kjaer type 2690 ainsi qu'un système d'enregistrement et d'acquisition de données TEAC LX-10.

A l'intérieur de l'enceinte, deux échantillons d'étoffes de même nature sont mis en contact, une des éprouvettes sera mobile alors que l'autre sera fixe. L'étoffe fixe est placée sur un porte échantillon au-dessus d'une plaque de silicone permettant de modéliser la peau. Le porte échantillon est lui-même placé sur un trépied qui nous permet de facilement ajuster la hauteur de celui-ci dans le but de contrôler la pression appliquée entre les deux étoffes. La deuxième étoffe est accrochée à un bras métallique qui effectue le mouvement de balayage.

3.2 Modifications apportées au dispositif

Dans le but d'améliorer les conditions de génération des bruits de frottement des étoffes, nous avons apporté quelques modifications au dispositif existant. Dans les travaux réalisés par Latroch et Yosouf, seul l'échantillon fixe était placé au-dessus d'une plaque en silicone modélisant la peau. Cependant, le mouvement du bras étant celui que l'on cherche à reproduire, il nous a semblé pertinent de placer également l'échantillon fixe au-dessus d'une couche de silicone simulant la peau. Pour cela, nous avons ajouté à l'extrémité du bras mécanique une petite plaque de silicone de même épaisseur que celle utilisée pour l'échantillon fixe. Concernant les dimensions de celle-ci, nous avons fait en sorte de garder la même surface de frottement que précédemment.

De plus, lors des premiers tests, nous nous sommes aperçus que la partie mécanique, notamment le moteur, engendrait un bruit relativement important malgré l'enceinte d'isolation acoustique. Pour pallier ce problème, nous avons choisi d'installer un capot en Depron autour du moteur afin d'atténuer les bruits liés à la rotation de celui-ci.

La Figure 34 présente en détail le dispositif expérimental modifié.

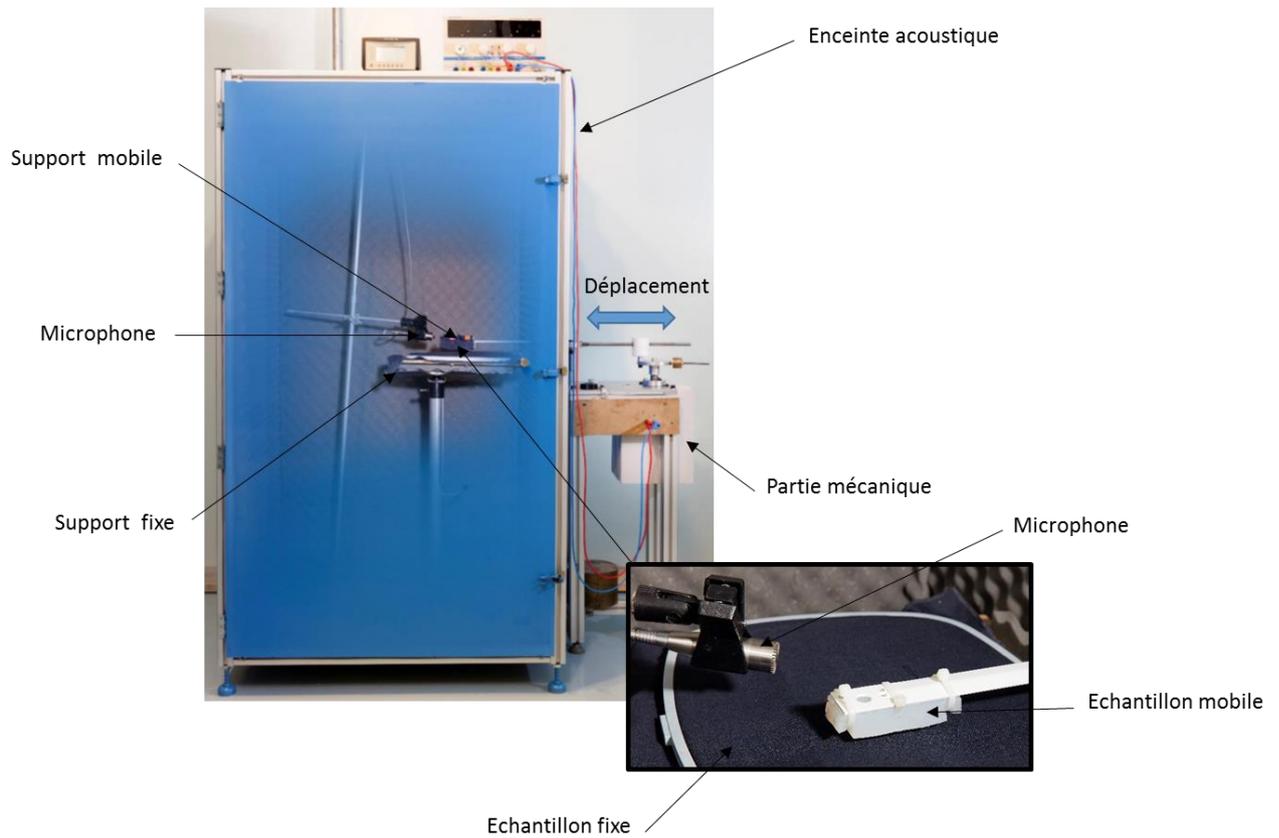


Figure 34 : Dispositif expérimental de génération du bruit des étoffes

3.3 Etalonnage et répétabilité des mesures

Suite à ces modifications, un nouvel étalonnage du dispositif a été nécessaire afin de déterminer la tension à appliquer aux bornes du moteur. Pour cela, nous avons filmé l'extrémité du porte échantillon, préalablement marqué, pour des valeurs de tensions différentes. L'enregistrement vidéo est ensuite décomposé image par image afin de déterminer le temps de balayage puis la vitesse de frottement. La courbe d'étalonnage obtenue est présentée à la Figure 35, elle nous permet de déterminer la tension à appliquer selon le type de mouvement que l'on souhaite étudier.

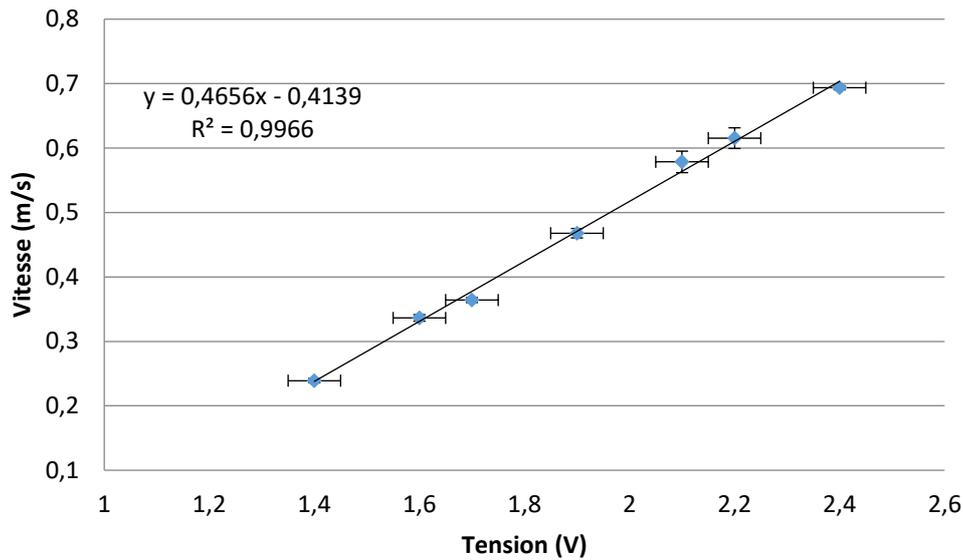


Figure 35 : Courbe d'étalonnage du moteur

Avant d'effectuer les mesures acoustiques, le microphone doit être calibré. Pour cela, un étalonnage est réalisé par l'intermédiaire d'un pistonphone. Celui-ci émet un signal sonore de fréquence fixe et de niveau sonore fixe donné par le constructeur. Dans notre cas, la fréquence d'étalonnage est de 250 Hz et le niveau sonore de l'ordre de 124 dB. Lors de notre étude, le microphone sera calibré avec une sensibilité de 316 mV/Pa.

Dans un deuxième temps, il est nécessaire de s'assurer de la répétabilité et de la reproductibilité de nos mesures expérimentales. De ce fait, nous avons vérifié la répétabilité des mesures sur un unique échantillon puis entre différents échantillons. Pour cela, nous avons préparé trois échantillons différents issus d'une même étoffe selon le plan d'échantillonnage de prélèvement présenté en Figure 36.

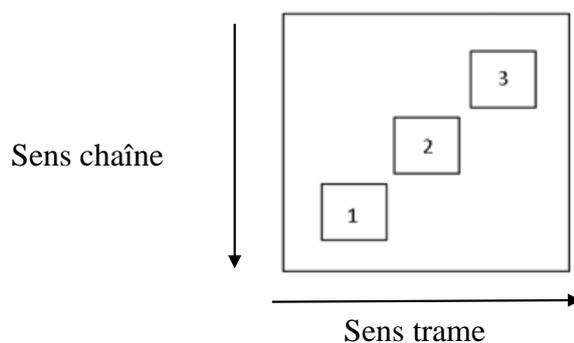


Figure 36 : Plan d'échantillonnage

L'échantillon n°1 nous a permis de mettre en évidence la répétabilité des mesures acoustiques sur un échantillon puis nous avons comparé les résultats des trois échantillons.

Sur le premier échantillon, quinze mesures acoustiques ont été réalisées sur plusieurs jours. Avant chaque mesure, l'ensemble des paramètres est à nouveau fixé. Les spectres sonores de chacune de ces mesures sont présentés en Figure 37. D'après l'ensemble de ces courbes, une forte ressemblance est constatée entre les spectres sonores.

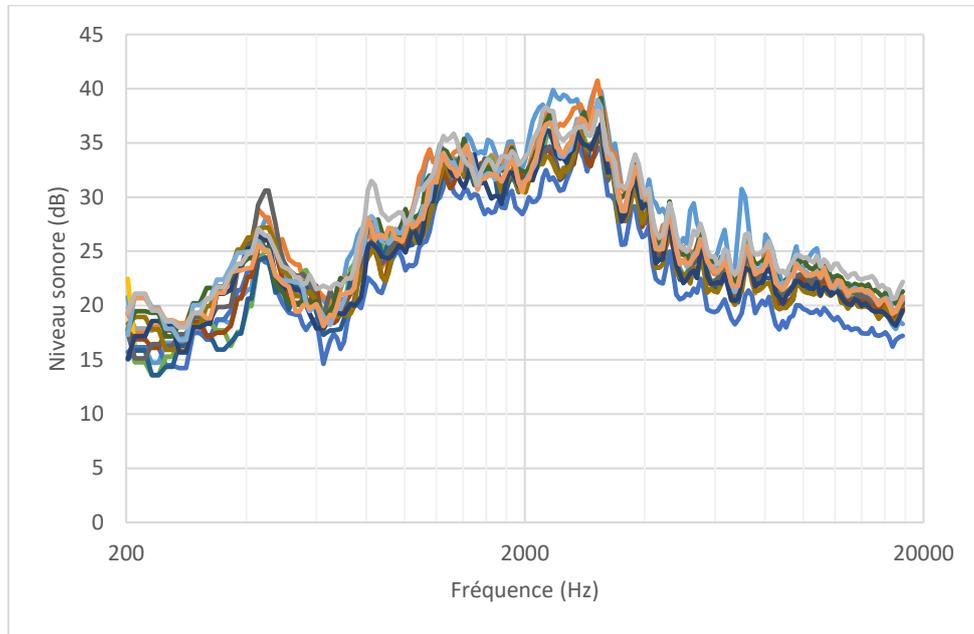


Figure 37 : Spectres sonores des 15 mesures (échantillon 1)

Cependant, afin de comparer de manière plus objective l'ensemble des courbes entre-elles, nous avons calculé un coefficient de corrélation (relation (23)) entre la mesure 1 et les autres mesures. L'ensemble des coefficients est présenté dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Coefficients de corrélation entre les mesures

Mesure i	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cor(1,i)	0,97	0,97	0,99	0,94	0,95	0,94	0,95	0,94	0,94	0,95	0,94	0,95	0,95	0,95

D'après l'ensemble de ces résultats, une forte corrélation entre les courbes est avérée puisque le coefficient de corrélation est au moins supérieur à 94%. Ce résultat nous indique donc une bonne répétabilité de nos mesures.

Par la suite, nous avons cherché à vérifier que les résultats obtenus ne dépendent pas de l'échantillon prélevé mais qu'ils sont représentatifs de l'étoffe. Pour cela, nous avons mesuré puis comparé les bruits de frottement des trois échantillons. Pour chaque échantillon, 15 mesures ont été réalisées, puis les spectres moyens, représentés à la Figure 38, ont été déterminés.

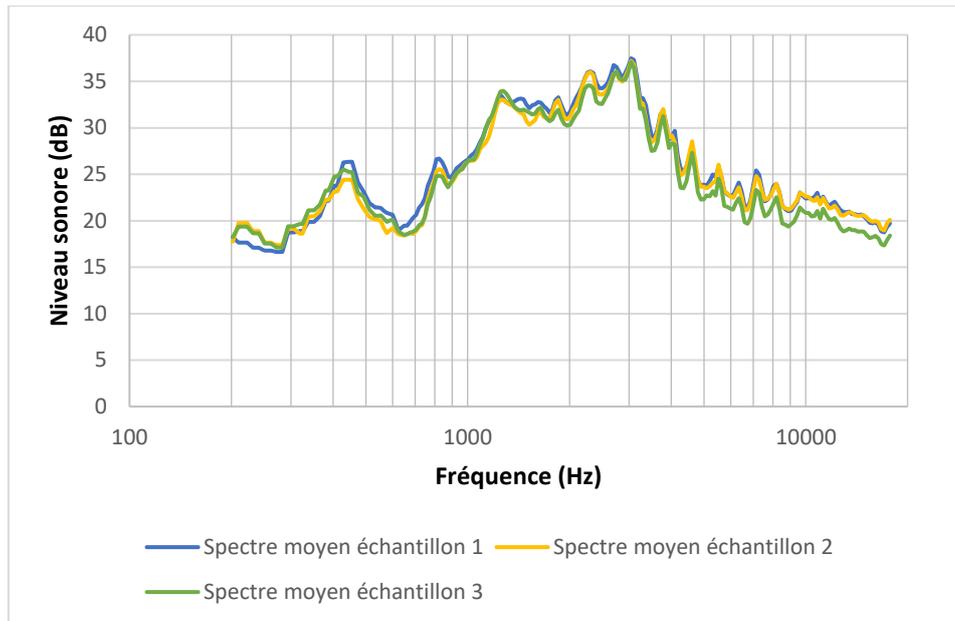


Figure 38 : Spectres moyens des trois échantillons

Comme précédemment, nous avons calculé le coefficient de corrélation entre les trois spectres sonores moyens. Une corrélation supérieure à 96 % a été obtenue, ce qui nous assure de la bonne répétabilité et reproductibilité de nos mesures.

3.4 Déroulement des essais expérimentaux

3.4.1 Enregistrement du bruit

Yosouf [7] s'étant concentré sur l'influence de la vitesse de frottement sur les bruits lors de ses travaux, il a montré qu'une vitesse plus élevée rend l'allure acoustique des bruits de frottement plus riche mais garde le même profil. De plus, la différence de niveau sonore entre deux vitesses n'est pas toujours significative. De ce fait, nous avons choisi de réaliser nos essais pour une seule vitesse de frottement, à savoir celle de la marche.

Avant chaque mesure acoustique, les paramètres permettant de simuler le mouvement du bras sont rigoureusement ajustés et la vitesse de frottement est fixée en ajustant la tension aux bornes du moteur par l'intermédiaire d'un multimètre selon la courbe d'étalonnage présentée précédemment. La pression à appliquer entre les deux échantillons est déterminée par le capteur de pression Flexiforce™ placé en-dessous de l'échantillon fixe. Le microphone est placé 1 cm au-dessus du porte-échantillon mobile et la sensibilité de l'amplificateur est fixé à 316 mV/Pa. Les bruits de frottement sont enregistrés pendant une vingtaine de secondes.

3.4.2 Analyse du bruit

Une fois les bruits de frottement générés et enregistrés, nous pouvons extraire différents paramètres acoustiques qui permettront d'analyser les signaux sonores des échantillons textiles. A partir du signal sonore brut, une transformée de Fourier est appliquée afin d'obtenir le spectre sonore avec une fréquence d'échantillonnage de 48 000 Hz. Le bruit sonore enregistré peut-être décomposé en deux parties :

- Le bruit de frottement de l'étoffe
- Le bruit de fond, notamment le bruit lié au moteur

En considérant que les deux sources sont non corrélées, il nous est possible de soustraire les pressions acoustiques efficaces au carré afin de supprimer les composantes du spectre liées au bruit de fond et d'obtenir uniquement le spectre sonore du bruit de frottement. Un exemple de ces trois spectres est représenté en Figure 38.

Par la suite, une analyse en 1/6 d'octave est réalisée (Figure 39). Cette analyse nous permettra de comparer les spectres de différents échantillons textiles entre eux, dans la mesure où elle permet de réduire le nombre de points et de pics d'amplitude. De plus, cette représentation correspond mieux à la perception du son de l'oreille humaine.

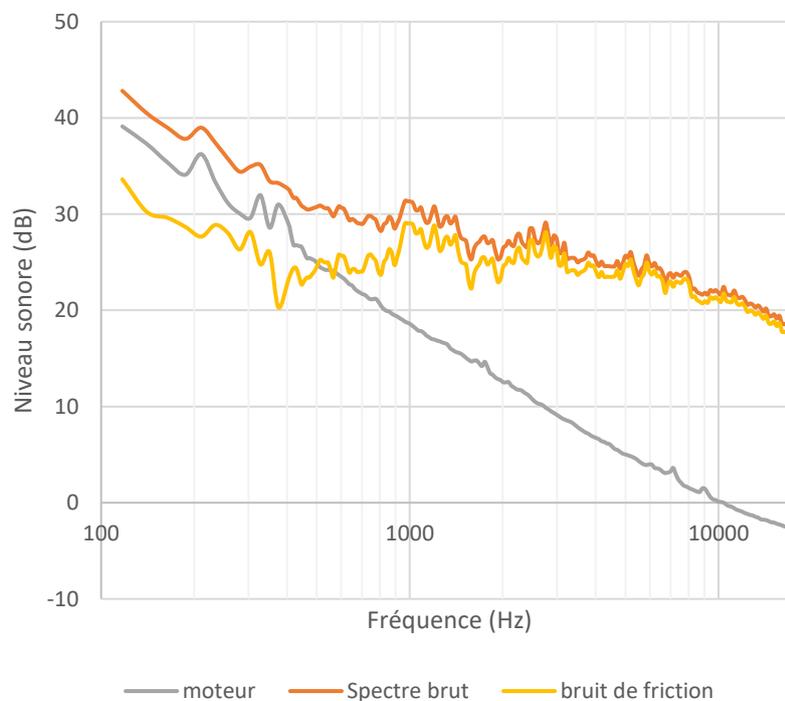


Figure 39 : Obtention du spectre sonore du bruit de frottement

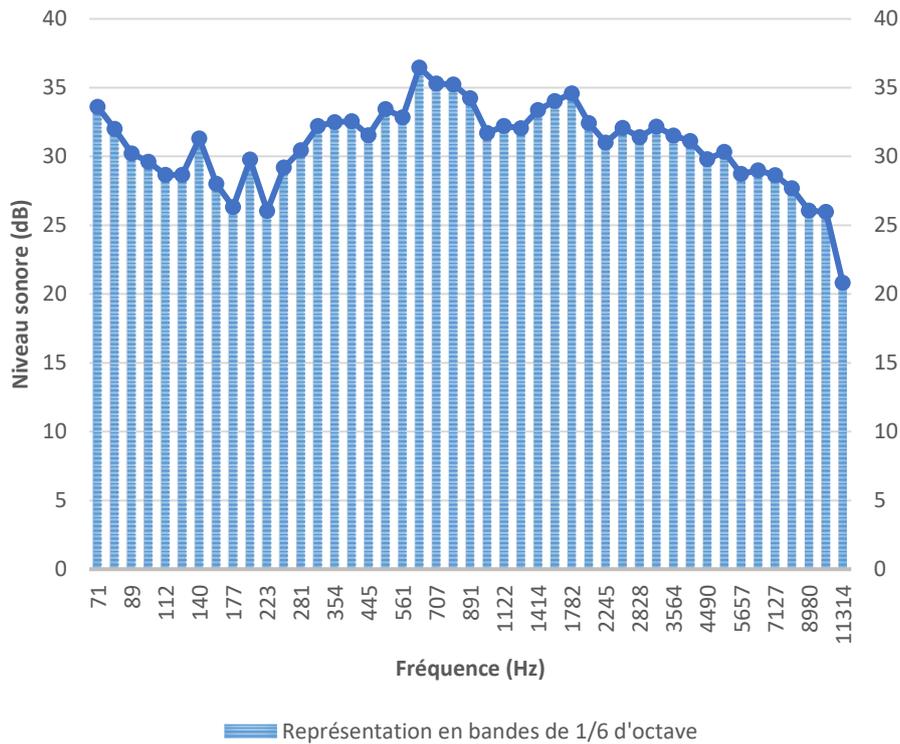


Figure 40 : Représentation en sixième d'octave

De ce spectre sonore, nous pouvons extraire différents paramètres acoustiques. Dans notre étude, nous nous intéressons aux paramètres détaillés ci-dessous.

- Le niveau sonore global L_g en dB. Il est défini comme suit

$$L_g = 10 \times \log\left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}}\right) \quad (35)$$

Où L_n représente le niveau sonore de chaque bande n du spectre sonore. Ce paramètre est l'un des plus utilisés en acoustique, il va nous permettre de comparer les bruits de frottement des différentes étoffes et de déterminer si une étoffe est plus bruyante qu'une autre.

- La signature acoustique, qui représente la variation de la pression acoustique d'un signal sonore brut en fonction du temps. Cette signature acoustique est obtenue grâce au logiciel Audacity®.
- L'amplitude du maximum du niveau sonore que l'on note L_m qui s'exprime en dB, ainsi que la fréquence correspondante, notée f_{max} . Ces paramètres nous permettent de déterminer le maximum d'amplitude dans la zone fréquentielle afin de voir s'il se situe dans l'intervalle des fréquences les plus perceptibles par l'oreille humaine.

- La plage d'amplitude notée ΔL . Ce critère nous permet essentiellement d'indiquer si le bruit de frottement est homogène et monotone. Il est décrit par l'équation ci-dessous :

$$\Delta L = L_g - L_m \quad (36)$$

- La bande passante du spectre sonore. Par définition, elle correspond à la plage de fréquence déterminée par l'intersection du spectre sonore et de la ligne droite d'équation suivante :

$$y = Lm - 10 \quad (37)$$

4. Analyse sensorielle

Concernant l'analyse sensorielle, nous avons choisi d'appliquer la méthode d'analyse descriptive. Pour cela, nous avons suivi la méthode appliquée par Yosouf lors de ses travaux [7] ainsi que les directives des normes BP X10-040 [89] et BP X10-043 [43].

4.1 Etude réalisée par Yosouf

Ce paragraphe synthétise une partie des résultats obtenus par Yosouf lors de ses travaux notamment concernant l'établissement de la liste des descripteurs et l'entraînement des panélistes.

a) Choix des descripteurs

En analyse sensorielle, l'une des étapes clés est l'établissement de la liste de descripteurs qui permet de décrire le bruit de frottement des étoffes. Cette liste est établie et validée par consensus par les panélistes lors de plusieurs séances.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de reprendre la liste de descripteurs établie par Yosouf. Pour l'établissement cette liste de descripteurs, il a travaillé sur les bruits de frottement de 14 étoffes de matière et d'armure différentes. L'ensemble de ces bruits a été présenté aux panélistes de façon monadique sur trois séances successives afin de générer une première liste de descripteurs. Une liste de 114 termes a ainsi été établie. Trois tris successifs ont été réalisés afin de réduire fortement le nombre de descripteurs. Le premier est un tri qualitatif permettant de supprimer les termes non pertinents, non descriptifs et ne s'appliquant pas au domaine du textile. Par la suite, un tri quantitatif, puis un tri statistique par l'intermédiaire d'une analyse en composantes principales ont été effectués. Ces tris ont permis de mettre en évidence la présence

de termes antagonistes et d'établir la liste définitive de descripteurs. Les différentes étapes d'élaboration de cette liste sont amplement détaillées dans les travaux de thèse de Yosouf [7].

Le Tableau 10 présente la liste des 15 descripteurs dont 6 bipolaires validée par Yosouf et que nous allons utiliser dans notre étude.

Tableau 10 : Liste des descripteurs établie par Yosouf [7]

Descripteurs bipolaires	Descripteurs simples
Grave - Aigu	Sciage
Lent - rapide	Abrasif
Monotone - Polyphonique	Grinçant
Homogène - Disharmonique	Chuintant
Peinant - Energique	Couinant
Sourd - Intensif	Sifflant
	Résonnant
	Rythmé
	Grattage

b) Entraînement mené par Yosouf

Une fois la liste établie, Yosouf a entraîné un panel à l'utilisation de cette liste. Cette étape s'est déroulée sur six séances. Lors de la première séance, les panélistes ont évalué un unique bruit de frottement. Les résultats ont montré une forte hétérogénéité des notes ce qui est attendu pour une première séance. Au fur et à mesure des sessions, l'évaluation des panélistes se développe et s'améliore. Cette amélioration est objectivement quantifiée par trois critères, mentionnés au Chapitre I.4.2.3, c'est ce que l'on appelle le contrôle des performances du panel. Il s'effectue sur cinq séances successives pendant lesquelles la répétabilité, le pouvoir de discrimination et l'homogénéité des réponses des panélistes est étudiée par une analyse de variance ANOVA à un ou deux facteurs. Suite à ces ANOVA, Yosouf a pu valider l'entraînement de son panel sensoriel.

La norme préconise une nouvelle phase d'entraînement lorsqu'une longue période sépare les études et/ou lorsque de nouveaux panélistes intègrent le groupe. Nos essais sensoriels n'ayant pas immédiatement fait suite aux travaux de Yosouf, en amont de l'analyse sensorielle des bruits de frottement, une nouvelle phase d'entraînement a été nécessaire, de même qu'un contrôle des performances des panélistes. Pour cela, nous avons appliqué la même méthode que

Yosouf [7], la sélection des panélistes et l'entraînement que nous avons effectués sont détaillés dans les paragraphes suivants.

4.2 Choix des nouveaux panélistes

Pour cette étude, le nouveau panel est composé de 10 personnes (6 femmes et 4 hommes) issues du laboratoire mais de secteurs d'activité et 35 ans d'âge moyen. Afin de vérifier leur capacité auditive comme le conseillent les normes, nous avons réalisé pour chacun d'eux un test d'audiométrie au casque selon la méthode de Békésy [90]. Il s'agit donc de dresser un bilan auditif de chaque panéliste grâce à l'analyse de leur audiogramme.

Les audiogrammes de chaque panéliste ont été tracés par l'intermédiaire d'un audiomètre Madsen Astera². L'audiomètre va balayer six octaves du spectre sonore des basses fréquences vers les hautes fréquences, de 125 Hz à 8 000 Hz afin de mesurer le seuil d'audition en fonction de la fréquence. Le sujet, qui est équipé d'un casque, détient un bouton poussoir qui va lui permettre de jouer sur l'intensité des sons qu'il entend. Dès qu'il perçoit le son, il appuie sur le bouton ce qui va automatiquement diminuer l'intensité du son de manière progressive. Lorsque le sujet ne le perçoit plus, il relâche le bouton poussoir afin que l'intensité remonte. L'instant t où le son n'est plus perçu correspond au seuil d'audition qui est représenté par un point sur l'audiogramme. On débute le test par l'oreille droite, puis la gauche est testée.

La sensibilité de l'ouïe a tendance à diminuer avec l'âge et la perte d'audition est généralement plus rapide dans les hautes fréquences que dans les basses fréquences. De plus, selon les individus, cet effet peut grandement varier. Nous allons donc comparer les seuils d'audition de chaque panéliste aux seuils d'auditions normaux. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les courbes de référence à 10 et 90% décrites dans la norme NF ISO 7029 [68]. La figure ci-dessous présente un exemple de ces courbes de références.

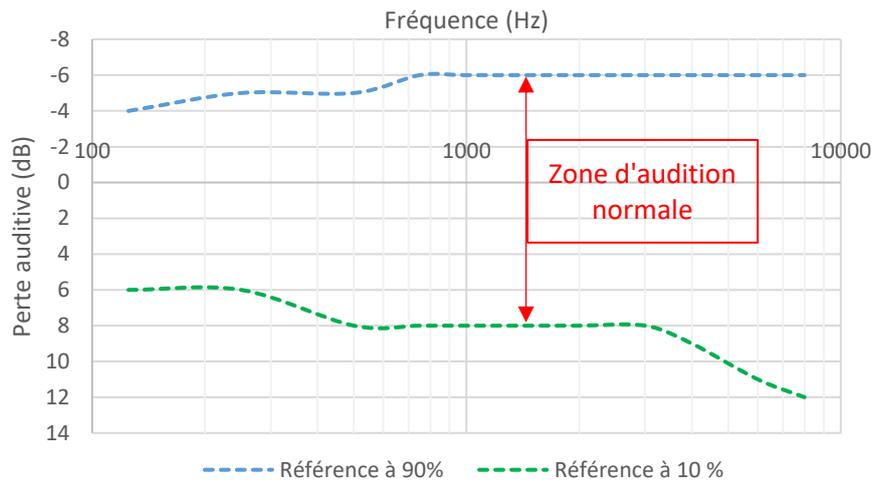


Figure 41 : Courbes références à 10 et 90 % des seuils d'audition d'un homme de 30 ans données par la norme

Comme représenté à la Figure 41, la zone située entre les courbes référence correspond aux seuils d'audition de 80% de la population et donc à une audition normale. De plus, cette norme introduit une distinction entre les hommes et les femmes mais les différences de seuils audiométriques sont beaucoup plus importantes en fonction de l'âge. La Figure 42, qui représente les courbes référence à 90% en fonction des groupes d'âges, illustre ces différences. On constate que les pertes auditives sont beaucoup plus importantes dans les hautes fréquences que dans les basses.

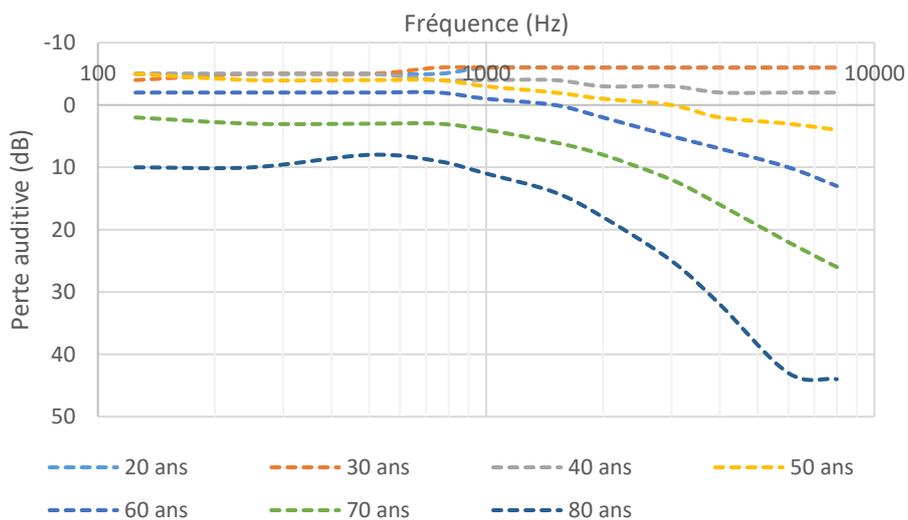


Figure 42 : Evolution des seuils audiométriques pour les hommes en fonction de l'âge

Chaque panéliste a réalisé un test audiométrique nous permettant de connaître les seuils d'audition de chacune des oreilles. A titre d'exemple, la Figure 43 nous présente l'audiogramme d'un panéliste, les audiogrammes de l'ensemble des panélistes sont présentés en Annexe A.

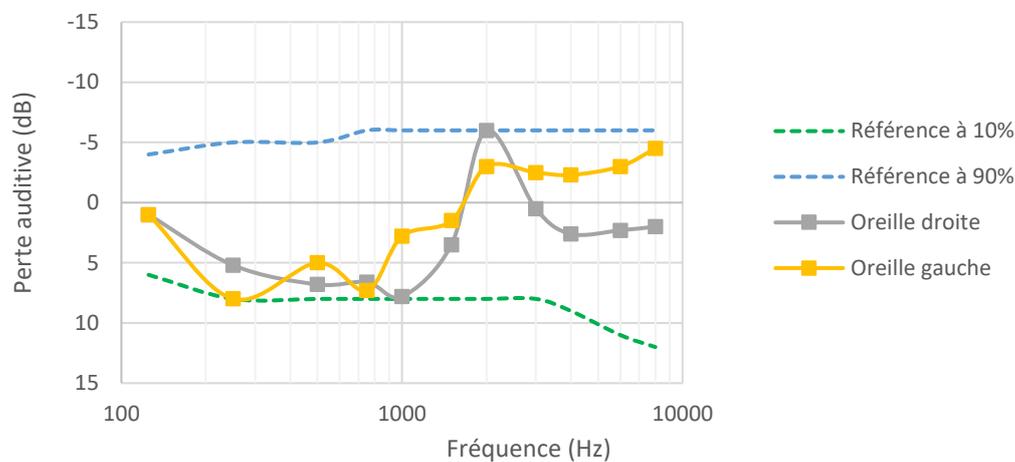


Figure 43 : Exemple d'un audiogramme d'un panéliste (26 ans)

D'après cet audiogramme, nous pouvons observer que ce sujet présente une audition normale et symétrique. De la même manière, les audiogrammes individuels, présentés en Annexe A, nous permettent de confirmer par l'analyse de la moyenne des seuils d'audition de chaque panéliste qu'ils possèdent tous une audition normale par rapport à leur âge respectif.

4.3 Entraînement des panélistes

Les panélistes sélectionnés pour cette étude vont être entraînés à l'évaluation des bruits de frottement par l'intermédiaire de la liste de descripteurs établie par Yosouf. Cet entraînement est composé de plusieurs séances de caractérisation durant lesquelles les performances des panélistes seront étudiées.

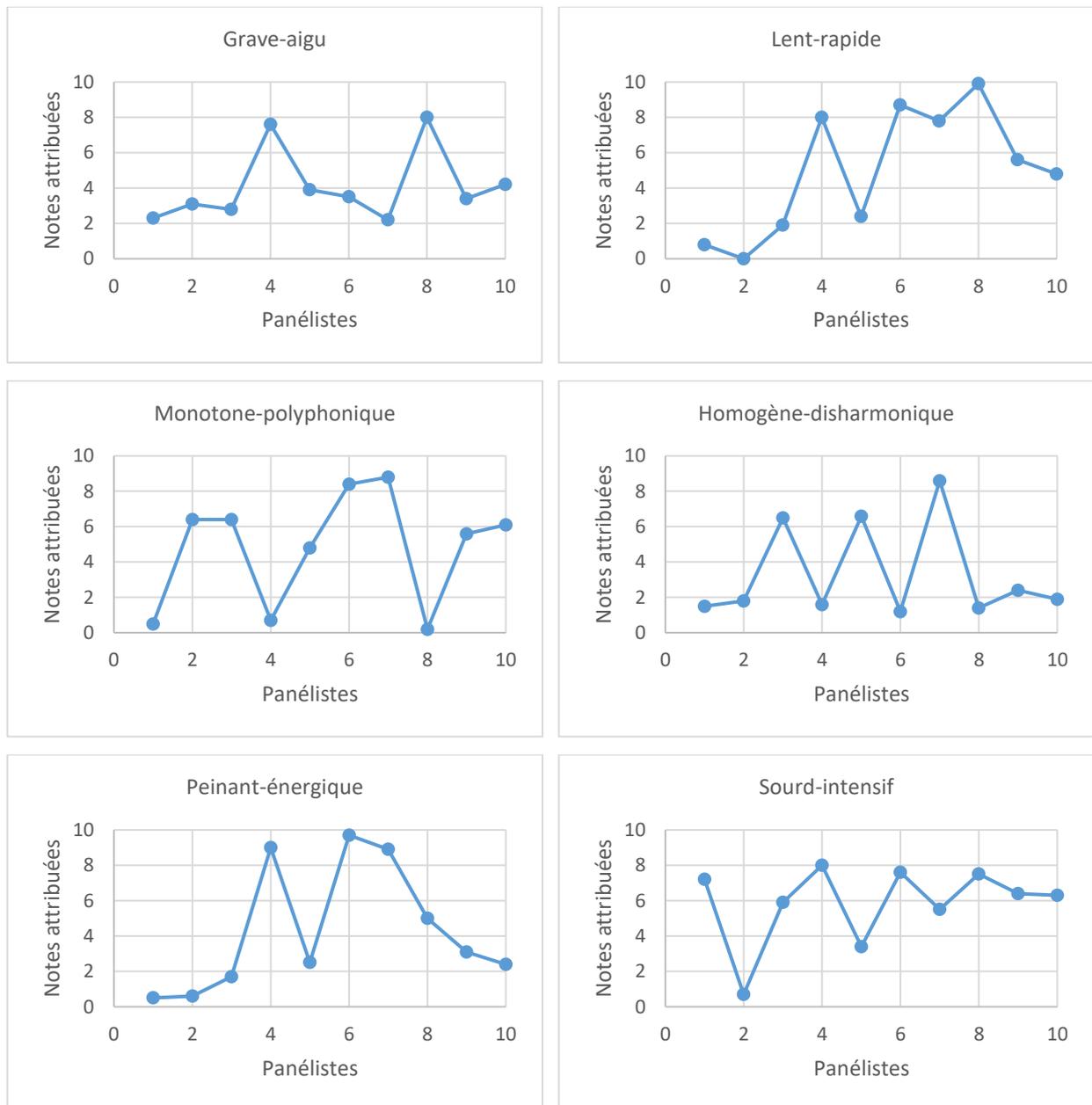
4.3.1 Première séance d'entraînement

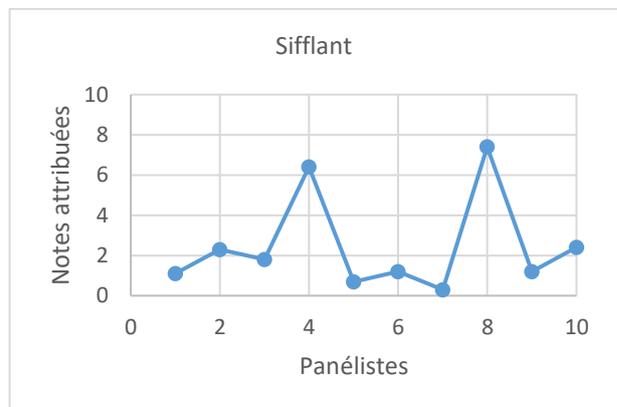
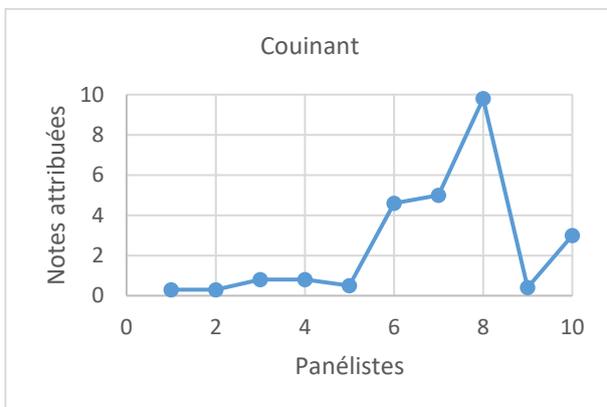
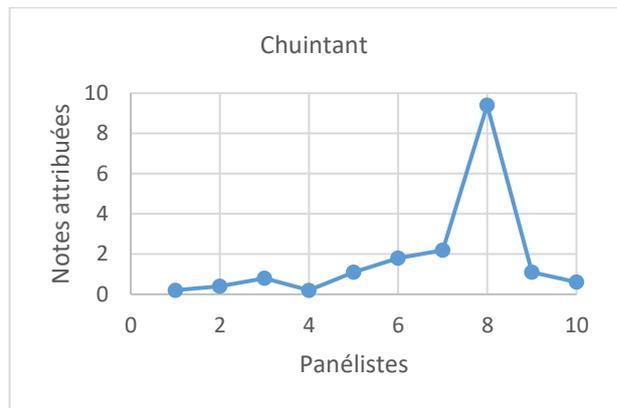
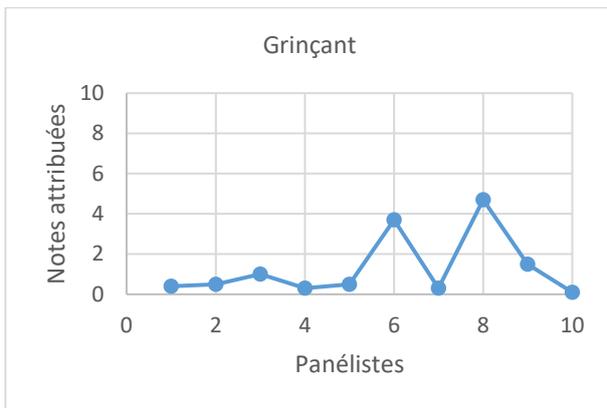
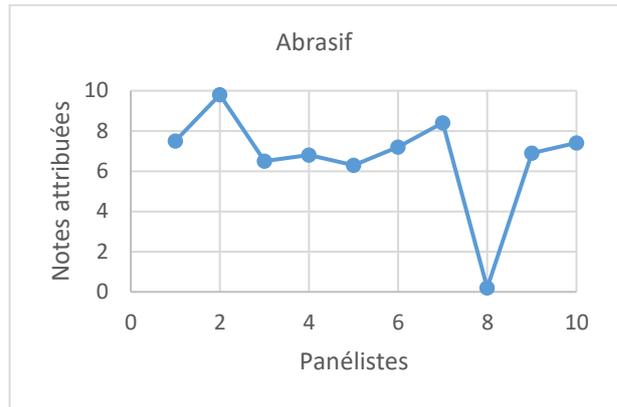
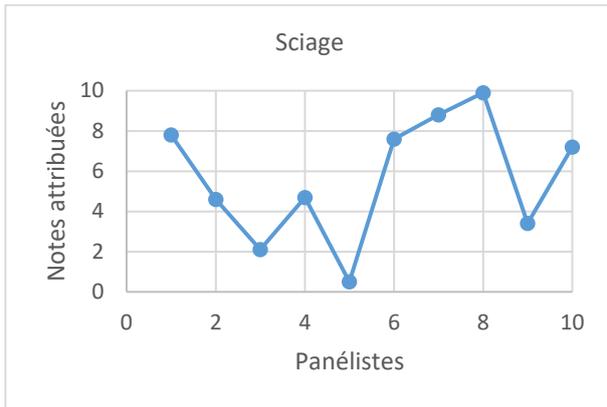
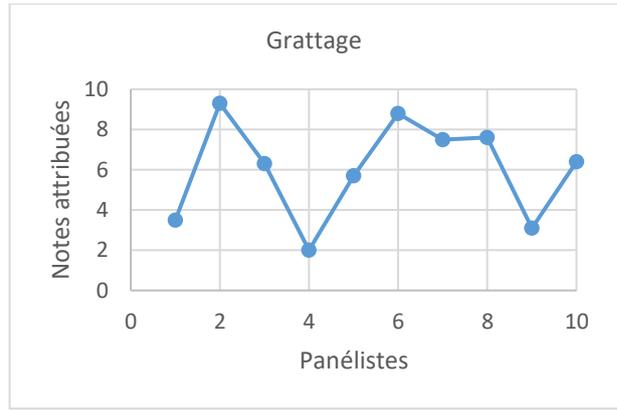
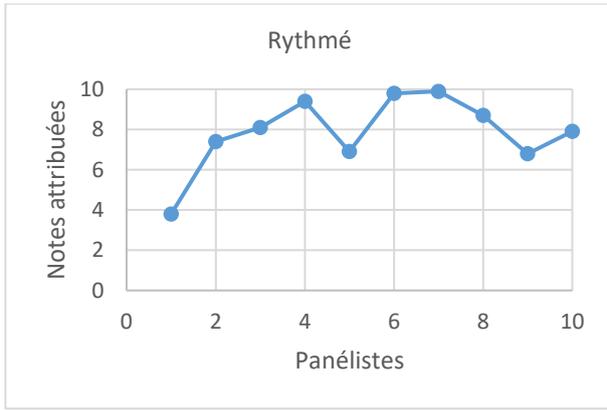
Dans un premier temps, nous avons demandé aux panélistes de caractériser le bruit de frottement d'un échantillon textile afin de constater les variations des notes attribuées par les panélistes pour chacun des descripteurs. De plus, cette première séance d'évaluation va permettre aux panélistes de se familiariser avec cette méthode de caractérisation.

Lors des séances d'évaluation sensorielle, les panélistes écoutent autant de fois qu'ils le souhaitent l'enregistrement des bruits de frottement à l'aide d'un casque de type Sennheiser HD 280 Pro. Les tests se déroulent dans une atmosphère calme afin d'éviter tous biais. De plus,

chaque échantillon est assimilé à un code afin que les panélistes ne puissent pas savoir de quel échantillon il s'agit. Le formulaire d'évaluation sensorielle, présenté en Annexe B, est composé de quinze échelles linéaires non structurées allant de 0 à 10.

La réponse de chaque panéliste lors de la première séance et pour chacun des descripteurs est présenté en Figure 44 sous la forme d'un profil « serpent ».





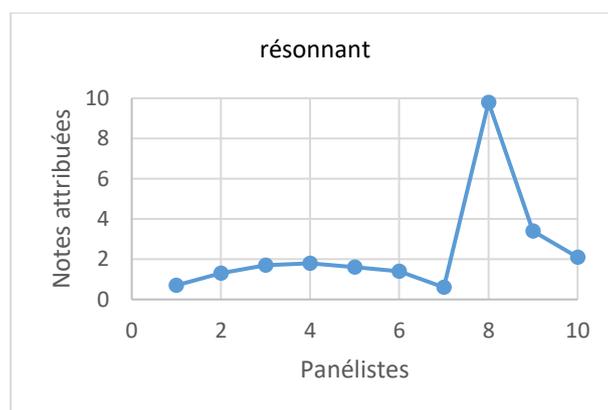


Figure 44 : Notes attribuées à l'ensemble des descripteurs lors de la première séance pour chaque panéliste

Etant donné que les panélistes ne sont pas encore entraînés à l'évaluation des bruits de frottement, il est normal de constater une certaine hétérogénéité des réponses des panélistes. D'après la Figure 44, on constate que la variation des notes n'est pas la même pour tous les descripteurs. En effet, pour certains descripteurs les notes attribuées sont assez resserrées ; par exemple, le descripteur *abrasif* est évalué de la même façon par l'ensemble du panel (de 6,3 à 9,7) à l'exception du panéliste P8 (0,7). C'est également le cas du descripteur *grave-aigu* pour lequel les notes vont de 2,2 à 3,9 si l'on écarte les panélistes P4 et P8. Concernant le panéliste P8, nous pouvons constater qu'il attribue des notes extrêmes pour la plupart des descripteurs. Il est donc important de discuter avec lui afin de s'assurer qu'il comprenne les descripteurs de la même façon que le groupe. Pour le descripteur *homogène-disharmonique*, deux groupes de panélistes se distinguent dans l'évaluation de ce critère, d'un côté les panélistes P1, P2, P4, P6, P8, P9 et P10 ont accordé des notes inférieures à 2,4 alors que les autres panélistes P3, P5 et P7 ont attribué des notes supérieures à 7. De plus, nous constatons que plusieurs panélistes ont attribuées des notes très basses pour les descripteurs *grinçant*, *chuintant* et *couinant*. Après discussion, il s'est avéré que les panélistes avaient du mal à comprendre ces termes et à évaluer la sensation associée. De ce fait, une discussion avec l'ensemble du groupe et un rappel des définitions des descripteurs a été nécessaire.

4.3.2 Contrôle des performances des panélistes sur les séances suivantes

La phase d'entraînement des panélistes se déroule sur cinq séances. Pendant celles-ci, nous allons vérifier les performances des panélistes selon les critères que nous avons déjà mentionnés dans le chapitre précédent.

a) Répétabilité des panélistes

La répétabilité des panélistes est déterminée grâce à une analyse de variance ANOVA pour un facteur produit. Lors de cette analyse, l'erreur ε produite pour chaque répétition de jugement

est calculée d'après l'équation (19). Une erreur critique pour juger de la répétabilité d'un panéliste est fixée à 1 ; au-dessus de cette valeur, le panéliste ne sera pas considéré comme répétable pour un descripteur donné.

Pour chacun des panélistes, l'erreur ε est calculée pour quatre répétition et pour chacun des descripteurs. Une répétition représente deux évaluations des bruits de frottement au cours de deux séances différentes successives. Les Figures 31 et 32 présentent des exemples de répétabilité des panélistes.

La Figure 45 présente la répétabilité du panéliste P3 au cours des cinq séances d'évaluation. Nous pouvons constater que ce panéliste est répétable dès la première répétition malgré une erreur proche de 1 pour le descripteur *homogène-harmonique*. Sur l'ensemble des descripteurs, nous remarquons que l'erreur de jugement est plus faible lors de la quatrième répétition, ce qui nous montre que le panéliste donne des réponses de plus en plus similaires d'une séance à l'autre.

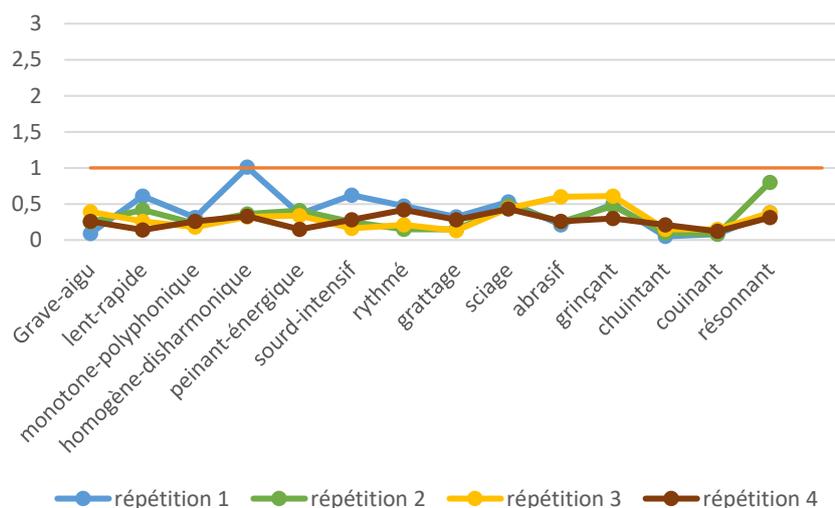


Figure 45 : Répétabilité du panéliste P3

La répétabilité du panéliste P6 est présentée en Figure 46. Lors de la première répétition, nous constatons que l'erreur commise par le panéliste est assez importante et supérieure à 1 pour plusieurs descripteurs car le panéliste n'est pas encore entraîné. Lors des répétitions suivantes, nous constatons que l'erreur de jugement devient de plus en plus faible et le panéliste devient donc de plus en plus répétable. Lors de la quatrième répétition, nous remarquons que l'erreur calculée pour chaque descripteur est inférieure à celle déterminée lors des précédentes répétitions excepté pour les descripteurs *grattage et sifflant*. Cependant, l'erreur obtenue étant

strictement inférieure à 1 pour l'ensemble des descripteurs, nous pouvons considérer que ce panéliste est également répétable.

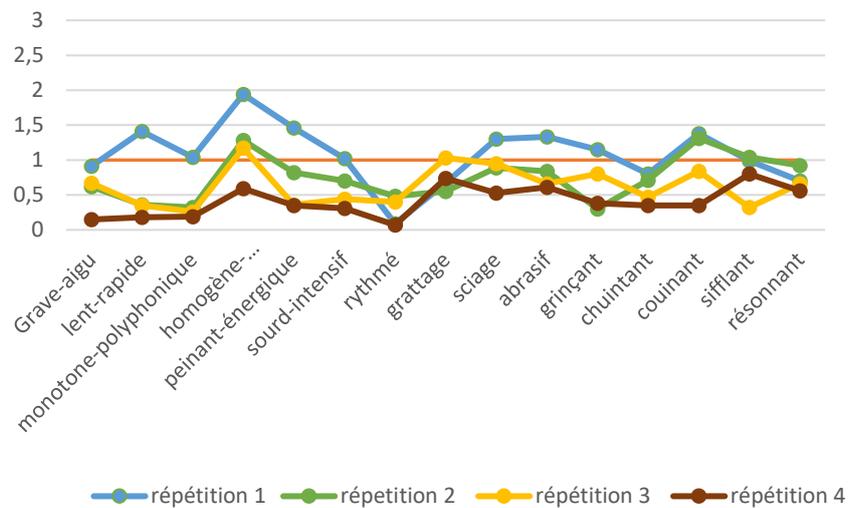


Figure 46 : Répétabilité du panéliste P6

A partir du calcul de l'indice moyen de répétabilité, nous allons pouvoir comparer la répétabilité des panélistes sur l'ensemble des sessions d'entraînement. Le Tableau 11 présente l'indice de répétabilité de l'ensemble des panélistes pour chacun des descripteurs. Les valeurs grisées représentent les valeurs supérieures à 1, pour ces descripteurs les panélistes ne sont pas répétables et il est donc nécessaire de discuter avec eux afin de comprendre pourquoi et d'ainsi améliorer leur évaluation. La Figure 47 présente l'histogramme des indices moyens de répétabilité de chaque panéliste.

D'après ce tableau, à l'exception du panéliste P9, les indices moyens de répétabilité sont strictement inférieurs à 1 ce qui confirme la répétabilité des panélistes pour l'ensemble des descripteurs. Le panéliste P9 ayant un indice moyen de répétabilité trop élevé, nous décidons de ne pas prendre en compte ses réponses pour la suite. Sur l'ensemble du groupe, les panélistes P3 et P10 sont les plus répétables tandis que le panéliste P7 est considéré comme le moins répétable.

Tableau 11 : Indice de répétabilité des panélistes

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Grave-aigu	0,54	0,41	0,25	0,42	0,32	0,59	0,69	0,15	0,96	0,30
Lent-rapide	0,43	0,56	0,36	0,45	0,38	0,58	0,68	0,18	0,93	0,10
Monotone-polyphonique	0,53	0,39	0,25	0,73	0,35	0,45	0,91	0,19	1,27	0,42
Homogène-disharmonique	1,17	0,69	0,51	1,07	0,38	1,25	0,91	0,59	1,07	0,18
Peinant-énergique	0,69	0,74	0,32	0,51	0,16	0,75	0,55	0,35	0,65	0,13
Sourd-intensif	0,88	0,57	0,33	0,59	0,48	0,62	0,41	0,31	0,67	0,24
Rythmé	0,70	0,37	0,31	0,73	0,28	0,26	0,33	0,07	0,78	0,26
Grattage	1,96	0,22	0,22	0,49	0,40	0,75	1,57	0,74	1,99	0,58
Sciage	0,89	0,57	0,47	0,54	0,78	0,92	0,71	0,53	0,80	1,40
Abrasif	1,56	0,36	0,33	0,54	0,78	0,86	0,55	0,61	0,78	0,61
Grinçant	0,17	0,27	0,47	0,68	0,45	0,66	0,66	0,38	0,81	0,27
Chuintant	0,13	0,29	0,13	1,13	0,68	0,58	0,77	0,35	0,99	0,43
Couinant	0,11	0,22	0,11	1,07	0,47	0,97	0,96	0,35	1,26	0,61
Sifflant	0,27	0,24	0,14	0,45	0,25	0,79	0,58	0,80	0,69	0,20
Résonnant	0,49	0,93	0,47	0,89	0,41	0,71	1,23	0,56	1,56	0,15
Indice moyen de répétabilité	0,70	0,45	0,31	0,68	0,44	0,71	0,77	0,41	1,01	0,39

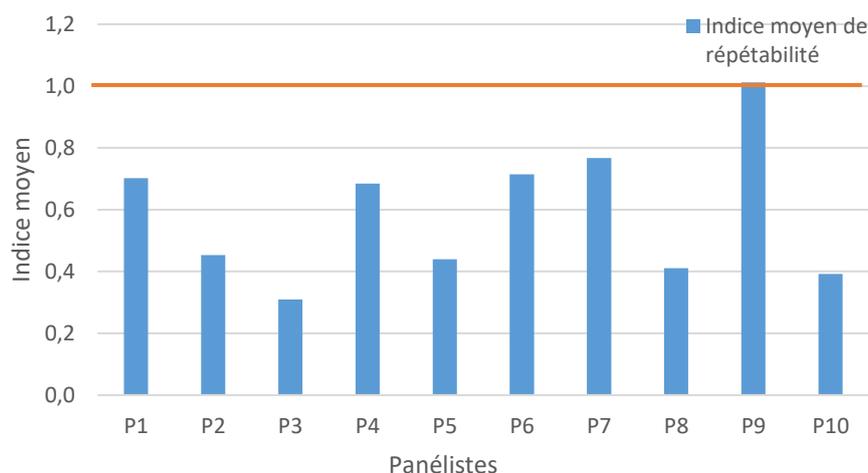


Figure 47 : Indice moyen de répétabilité des panélistes

Après avoir analysé la répétabilité individuelle de chaque panéliste, nous pouvons regarder la répétabilité du groupe sur l'ensemble des sessions d'entraînement. Pour cela, nous avons comparé les notes moyennes attribuées par le panel lors des deux dernières séances d'évaluation pour une étoffe précise. La Figure 48, qui présente le profil sensoriel de l'étoffe lors des deux séances d'évaluation, permet d'observer qu'il y a très peu de différence entre les notes données. La différence la plus importante a été faite sur le descripteur *résonnant*, celle-ci peut s'expliquer par une mauvaise répétabilité individuelle d'un panéliste.

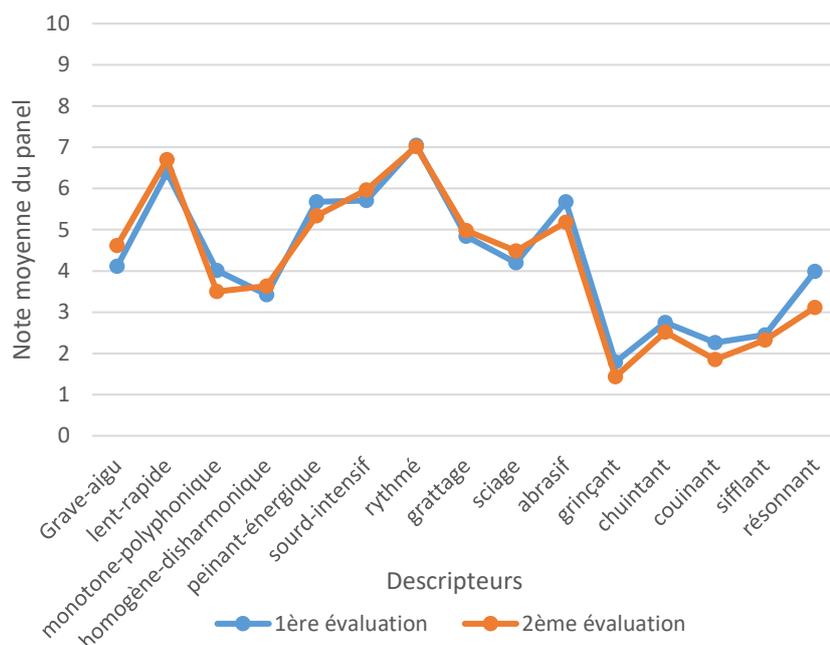


Figure 48 : Répétabilité du panel pour une étoffe

La même étude a été menée sur les autres bruits de frottement utilisés pour la phase d’entraînement et des résultats similaires ont été obtenus. Dans l’ensemble, les écarts entre les notes accordées sur deux séances d’évaluation sont relativement faibles ce qui valide la bonne répétabilité de notre panel.

b) Pouvoir de discrimination

Comme pour la répétabilité, le pouvoir de discrimination des panélistes est évalué par une analyse de variance ANOVA à un facteur (produit). Pour cela, l’analyse est réalisée pour chaque descripteur sur l’ensemble des notes sensorielles données par un panéliste pendant les cinq séances d’évaluation.

Le Tableau 12 présente la valeur P-value déterminée par ANOVA pour chaque descripteur et pour chaque panéliste. En fonction de cette valeur, nous pouvons évaluer la capacité d’un panéliste à différencier les bruits de friction ; si celle-ci est inférieure à 0,05 nous considérerons que le panéliste est discriminant à 5%. Les valeurs grisées indiquent que le pouvoir de discrimination du panéliste n’est pas suffisant.

Tableau 12 : Pouvoir de discrimination des panélistes

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Grave-aigu	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0
Lent-rapide	0	0	0,04	0	0	0	0,04	0	0,03	0
Monotone-polyphonique	0,26	0,05	0,68	0,26	0	0	0,55	0	0,72	0,04
Homogène-disharmonique	0,32	0,11	0,01	0,40	0,01	0,01	0,01	0,01	0,92	0
Peinant-énergique	0	0	0	0	0	0	0	0	0,31	0
Sourd-intensif	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0
Rythmé	0	0	0	0,07	0	0	0	0	0,30	0
Grattage	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0,56	0
Sciage	0,18	0,03	0	0,34	0,09	0,09	0	0	0,48	0,03
Abratif	0,30	0	0	0,15	0,15	0	0	0	0,64	0
Grinçant	0,71	0,70	0,69	0,41	0,13	0,02	0,25	0,46	0,11	0,60
Chuintant	0,87	0,58	0,85	0,19	0	0	0,39	0,58	0,58	0,48
Couinant	0,90	0,54	1,00	0,70	0,16	0,16	0,27	0,85	0,49	0,16
Sifflant	0,27	0,77	0,16	0,38	0	0,12	0,16	0,11	0,77	0,44
Résonnant	0,03	0,04	0,00	0,06	0	0,02	0,04	0,03	0,28	0,00
Indice moyen de discrimination	0,31	0,19	0,23	0,20	0,04	0,03	0,11	0,14	0,42	0,12
Nb de descripteurs discriminants	6	10	10	5	11	12	10	11	3	11

D'après ces résultats, nous pouvons observer que les panélistes P5, P6, P8 et P10 ont un meilleur pouvoir de discrimination que les autres panélistes. En revanche, le panéliste P9 est celui qui arrive le moins à différencier les bruits de friction les uns des autres, car il n'est discriminant que pour trois descripteurs. La réponse de ce panéliste ne sera donc pas prise en compte lors de la caractérisation sensorielle.

On constate également que l'ensemble du panel n'arrive pas être suffisamment discriminant pour les descripteurs *grinçant*, *chuintant*, *couinant* et *sifflant*. Lors de l'étude de la répétabilité, la difficulté à évaluer ces sensations avait déjà été mise en avant puisque les panélistes avaient tendance à leur attribuer des notes proches de 0.

L'indice de discrimination peut également être calculé sur l'ensemble du panel pour juger du pouvoir discriminant à partir d'une ANOVA à un facteur. Le panel peut être discriminant à 5 ou 10%, plus la valeur P-value sera faible, plus les panélistes auront la capacité à différencier un bruit de frottement d'un autre. Le Tableau 13 présente le pouvoir discriminant du panel lors de la première et de la dernière répétition pour chaque descripteur. Les valeurs grisées indiquent que le panel n'est pas suffisamment discriminant pour le descripteur donné.

Tableau 13 : Indice de discrimination du panel pour la première et la dernière répétition

	1 ^{ère} répétition	4 ^{ème} répétition
Grave-aigu	0,003	0
Lent-rapide	0,10	0
Monotone-polyphonique	0,14	0,08
Homogène-disharmonique	0,281	0,088
Peinant-énergique	0,09	0
Sourd-intensif	0,08	0,002
Rythmé	0,342	0,004
Grattage	0,09	0,035
Sciage	0,487	0,021
Abrasif	0,801	0,088
Grinçant	0,6	0,43
Chuintant	0,65	0,125
Couinant	0,75	0,663
Sifflant	0,33	0,135
Résonnant	0,09	0

D'après ces résultats, on constate que pour certains descripteurs, comme par exemple *grave-aigu*, les panélistes sont discriminants dès la première répétition, alors que pour d'autres ils ont des difficultés à discriminer les bruits. Dans l'ensemble, on remarque que le pouvoir de discrimination du panel est meilleur à la fin de la phase d'entraînement qu'au début puisque le panel est discriminant pour onze descripteurs.

Concernant les descripteurs *grinçant*, *chuintant*, *couinant* et *sifflant*, nous constatons qu'ils ne sont pas discriminants pour l'ensemble des panélistes. Si l'on regarde les réponses sensorielles individuelles, nous pouvons remarquer que les panélistes ont majoritairement attribués des notes extrêmes à ces descripteurs. De ce fait, les panélistes sont répétables pour ces descripteurs mais non discriminants. Pour la caractérisation des bruits de friction, nous allons donc écarter ces descripteurs qui n'apportent pas d'informations supplémentaires à la caractérisation des bruits de frottement.

c) Homogénéité des réponses des panélistes

Le dernier critère à évaluer en ce qui concerne le contrôle des performances des panélistes est l'homogénéité de leurs réponses. La valeur P-value d'interaction issue d'une ANOVA à deux facteurs va être utilisée afin de déterminer si les réponses des panélistes sont en accord ou non. De façon analogue à l'étude du pouvoir discriminant, les réponses des panélistes seront jugées homogènes si le test statistique se révèle non significatif

Si la valeur P-value est inférieure à 10% alors le test est significatif c'est-à-dire que les panélistes ne comprennent pas les descripteurs de façon similaire. L'ensemble de leurs réponses est par conséquent hétérogène. A l'inverse, si cette valeur est supérieure à 10%, les panélistes sont en accord et évaluent les bruits de frottement de la même manière. Le Tableau 14 présente les valeurs de P-value pour l'ensemble des descripteurs, et ce pour la première et la dernière répétition. Les valeurs grisées indiquent les descripteurs pour lesquels les panélistes ne sont pas en accord.

Tableau 14 : Homogénéité des réponses des panélistes (valeur P-value ANOVA à deux facteurs)

	1ère répétition	4ème répétition
Grave-aigu	0,08	0,474
Lent-rapide	0,014	0,418
Monotone-polyphonique	0,630	0,41
Homogène-disharmonique	0,024	0,122
Peinant-énergique	0,246	0,208
Sourd-intensif	0,171	0,314
Rythmé	0,220	0,461
Grattage	0,40	0,433
Sciage	0,325	0,158
Abrasif	0,928	0,137
Grinçant	0,134	0,001
Chuintant	0,013	0,07
Couinant	0,034	0,004
Sifflant	0,067	0,042
Résonnant	0,014	0,254

D'après les résultats du Tableau 14, on constate que pour la première répétition, les réponses des panélistes ne sont pas suffisamment homogènes sur l'ensemble des descripteurs comme c'est le cas pour les termes *grave-aigu* ou encore *lent-rapide*. Afin d'améliorer l'homogénéité des réponses, une discussion avec le panel a été nécessaire afin de leur rappeler les définitions des termes. Nous nous sommes également appuyés sur les bruits de frottement référence établis par Yosouf [7]. Ces références positives et négatives sont présentées dans le Tableau 15 pour aider les panélistes à avoir la même compréhension des descripteurs.

Tableau 15 : Références positives et négatives des descripteurs

	Référence positive	Référence négative
Grave-aigu	Polyamide toile	Coton satin 5 (écru)
Lent-rapide	Polyamide toile	Non tissé
Monotone-polyphonique	Polyamide toile	Coton satin 5 (écru)
Homogène-disharmonique	Lin toile	Coton satin 5 (écru)
Peinant-énergique	Polyamide toile	Non tissé
Sourd-intensif	Polyamide toile	Coton satin 5 (écru)
Rythmé	Polyamide toile	Non tissé
Grattage	Polyamide/polyuréthane toile	Coton chevron (écru)
Sciage	Coton toile	Coton satin 5 (écru)
Abrasif	Coton satin 5	Coton satin 5 (écru)
Grinçant	Coton satin 5	Coton chevron (écru)
Chuintant	Lin toile (écru)	Coton toile (écru)
Couinant	Soie toile	Coton satin 5 (écru)
Sifflant	Polyamide toile	Lin toile (écru)
Résonnant	Lin toile (écru)	Coton satin 5 (écru)

De plus, une ACP, présentée en Figure 49, a été réalisée afin de mieux comprendre les panélistes qui étaient en accord ou non. Pour cela, nous avons pris en compte la réponse moyenne de panélistes pendant les cinq sessions de d'évaluation.

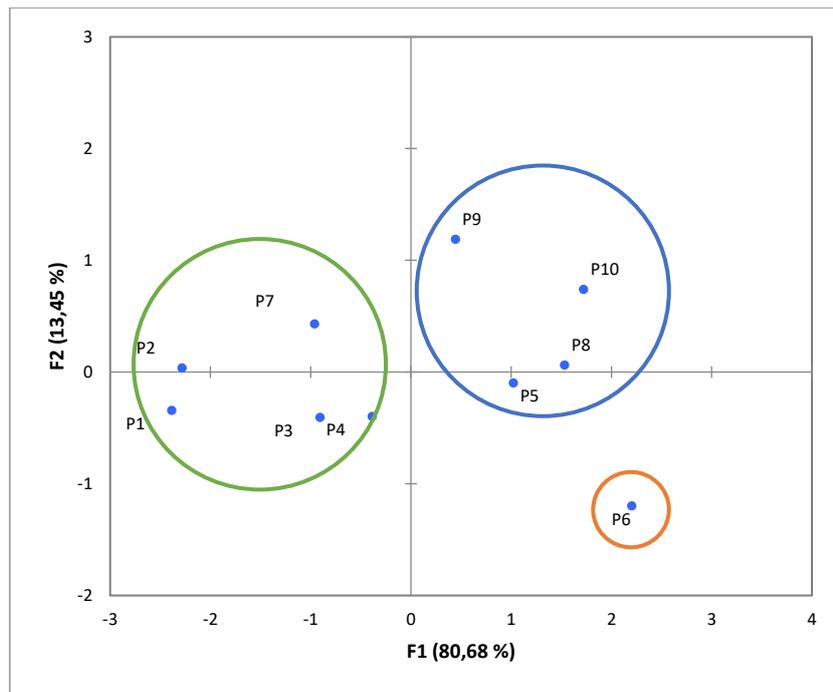


Figure 49 : ACP des réponses sensorielles moyennes des panélistes lors de l'entraînement

D'après la Figure 49, on constate que les panélistes sont principalement divisés en 2 groupes, le groupe des panélistes P1, P2, P3, P4 et P7 puis le groupe formé de P5, P8, P9 et P10. On peut également remarquer que le panéliste P6 n'est pas en accord avec les deux groupes.

Après discussion et présentation des références, on constate d'après la Figure 50, que les réponses du panel sont plus homogènes lors de la quatrième répétition à l'exception de quatre descripteurs pour lesquels les panélistes ne sont toujours pas en accord.

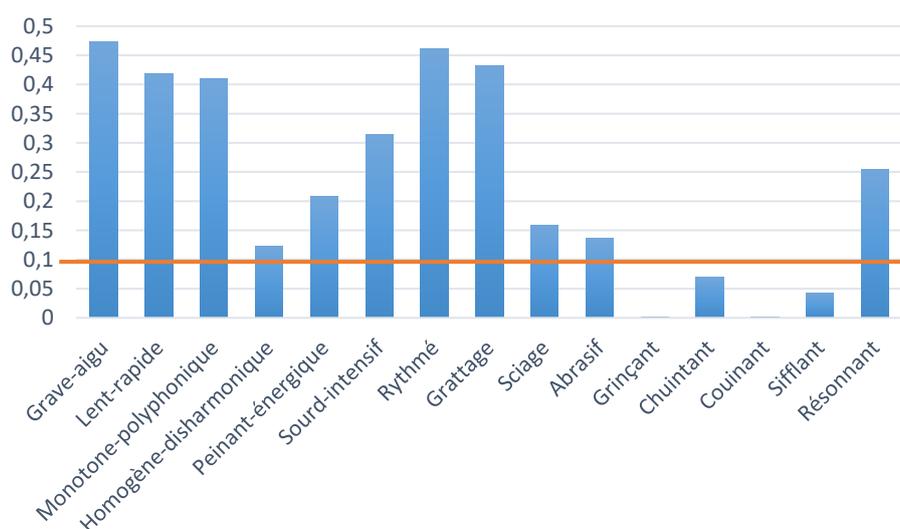


Figure 50 : Indice d'homogénéité des panélistes à la fin de la phase d'entraînement

Après avoir contrôlé les performances des panélistes à la fin de la phase d'entraînement, nous observons que l'ensemble du panel est répétable, possède un bon pouvoir de discrimination et l'homogénéité de leurs réponses est correcte. Cependant, après analyses statistiques, nous avons choisi de supprimer les descripteurs *grinçant*, *chuintant*, *couinant* et *sifflant* car les panélistes éprouvent des difficultés à évaluer ces sensations de manière fiable pour ce type de test. Le Tableau 16 présente la liste définitive de 11 descripteurs dont 6 bipolaires et qui sera utilisée afin de caractériser les bruits de frottement dans la suite cette étude.

Tableau 16 : Liste des descripteurs utilisée pour la caractérisation sensorielle

Descripteurs bipolaires	Descripteurs simples
Grave - Aigu	Rythmé
Lent - rapide	Abrasif
Monotone - Polyphonique	Sciage
Homogène - Disharmonique	Grattage
Peinant - Energique	Résonnant
Sourd - Intensif	

Chapitre III. Etude de l'influence de l'entretien des étoffes

L'un des objectifs de cette étude est d'étudier l'impact de l'usure sur les bruits de frottement. Pour plus de facilité de lecture, les résultats ont été scindés en deux, la première partie traitant de l'influence de l'entretien et la deuxième de l'influence de l'abrasion.

Ce chapitre concerne donc l'influence de l'entretien et plus particulièrement l'impact des lavages sur les bruits de frottement. Dans un premier temps, nous présenterons dans le détail la caractérisation de l'étoffe 1, puis les résultats obtenus seront généralisés à l'ensemble des étoffes.

1. Caractérisation de l'étoffe n°1

Les résultats présentés dans ce paragraphe ne concernant que l'étoffe n°1, un code a été attribué à chaque échantillon lavé (Tableau 17) pour plus de lisibilité.

Tableau 17 : Dénomination des échantillons lavés

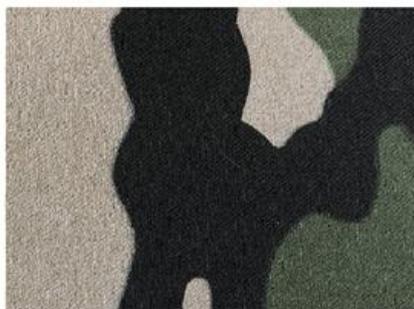
Echantillons lavés x fois	0	5	10	20	30	40	50
Dénomination	Ech 0	Ech 5	Ech 10	Ech 20	Ech 30	Ech 40	Ech 50

1.1 Caractérisation physique

Comme nous l'avons vu précédemment, le lavage est un vecteur majeur du vieillissement des surfaces textiles notamment des vêtements. Des observations simples nous permettent de mettre en évidence l'impact de ce phénomène.

1.1.1 Premières observations de la dégradation de l'étoffe

L'une des premières conséquences des lavages successifs sur l'étoffe est une dégradation visuelle de la surface.



a. Ech 0



b. Ech 50

Figure 51 : Observation de la dégradation de la surface de l'étoffe

En ce qui concerne l'étoffe 1, cette dégradation de la couleur est particulièrement visible en raison du motif camouflage du tissu (Figure 51).

On observe également que les cycles de lavages successifs ont tendance à créer une fine pilosité. Dans le but de mettre en évidence l'impact physique des lavages, la masse moyenne d'un échantillon de dimensions 20x20 cm² a été calculée après chaque lavage. La masse moyenne a été déterminée pour cinq échantillons et n'a été effectuée que pour les 30 premiers lavages. En effet, comme indiqué sur la Figure 52, la masse de la surface textile se stabilise au bout d'une vingtaine de lavages. L'existence de ce palier peut s'expliquer par une stabilisation de la surface textile et de sa pilosité superficielle.

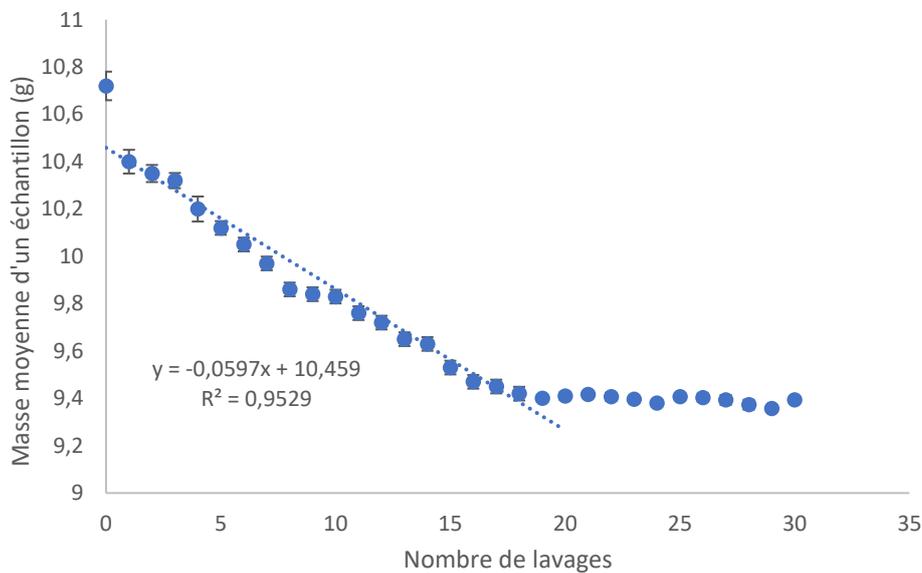


Figure 52 : Perte de masse de l'étoffe au cours des cycles de lavages successifs

Chaque lavage étant réalisé dans des conditions strictement identiques, la décroissance de la masse moyenne suit une loi linéaire durant les vingt premiers lavages avant d'atteindre un palier.

1.1.2 Analyse de la surface de l'étoffe

Dans l'optique de mettre en avant l'influence des lavages successifs sur l'étoffe, la surface des échantillons a été observée à la loupe binoculaire.

La Figure 53 présente la surface de l'étoffe brute et des échantillons lavés 5, 10 et 50 fois pour un grandissement de la loupe fixé à 20. Les photos obtenues mettent en évidence la présence d'une pilosité de surface.

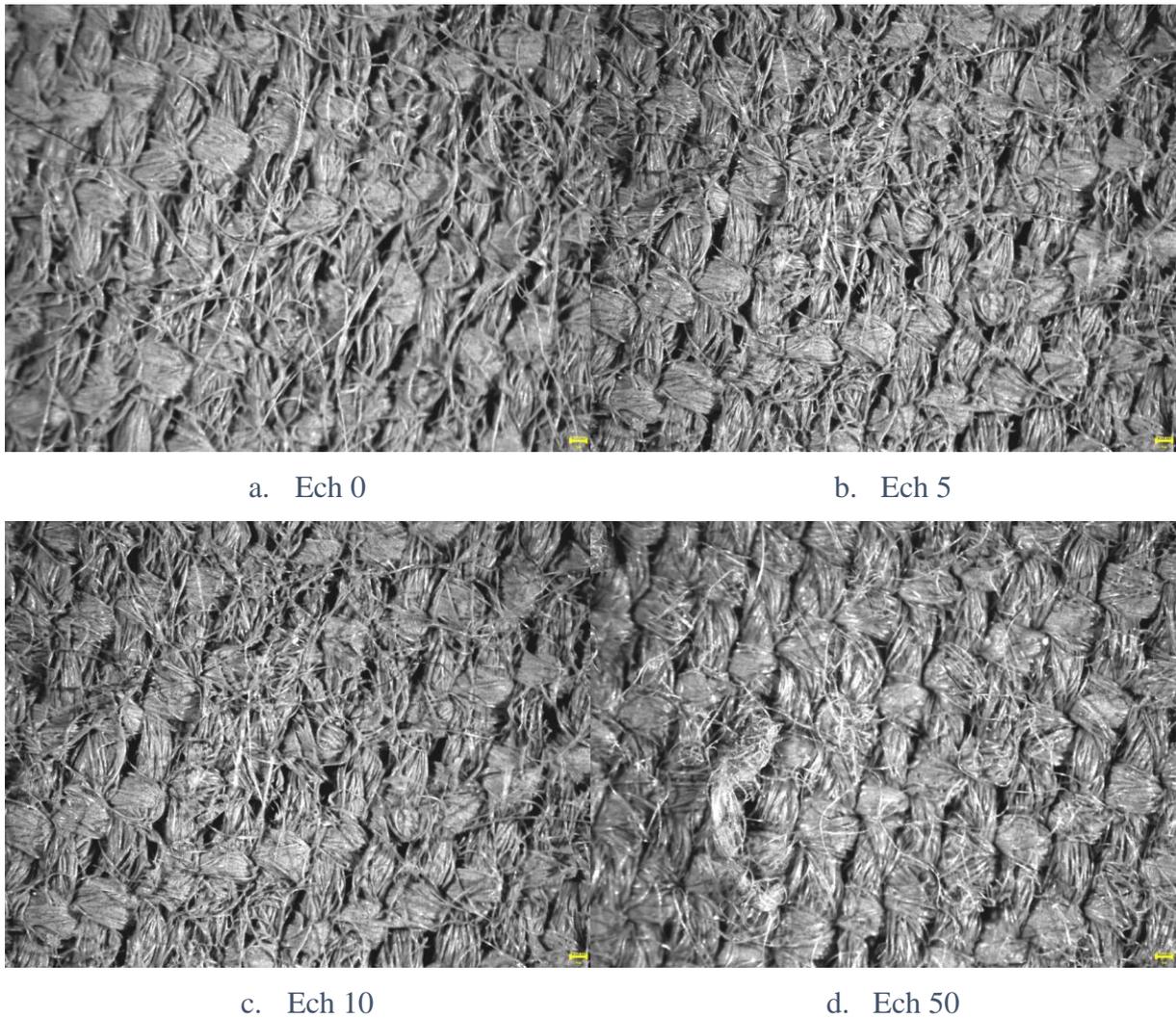


Figure 53 : Photo de la surface des échantillons

Les photos des échantillons montrent une forte pilosité superficielle, de nombreuses fibres sont enchevêtrées et bloquent totalement la structure. On peut remarquer que la pilosité de surface est plus importante pour les échantillons Ech 0 et Ech 5 (figure (a) et (b)), les lavages suivants tendent à la réduire (photo (d)). Selon la pilosité de l'étoffe, les propriétés physiques de celle-ci ne seront pas équivalentes.

1.1.3 Propriétés de compression et de surface

Comme nous l'avons expliqué antérieurement (Chapitre I.1.3.2), l'entretien des surfaces textiles impacte également les propriétés de compression et de surface des étoffes. Ces propriétés ont été mesurées avec le KES-F et sont décrites par les Figure 54 et Figure 55.

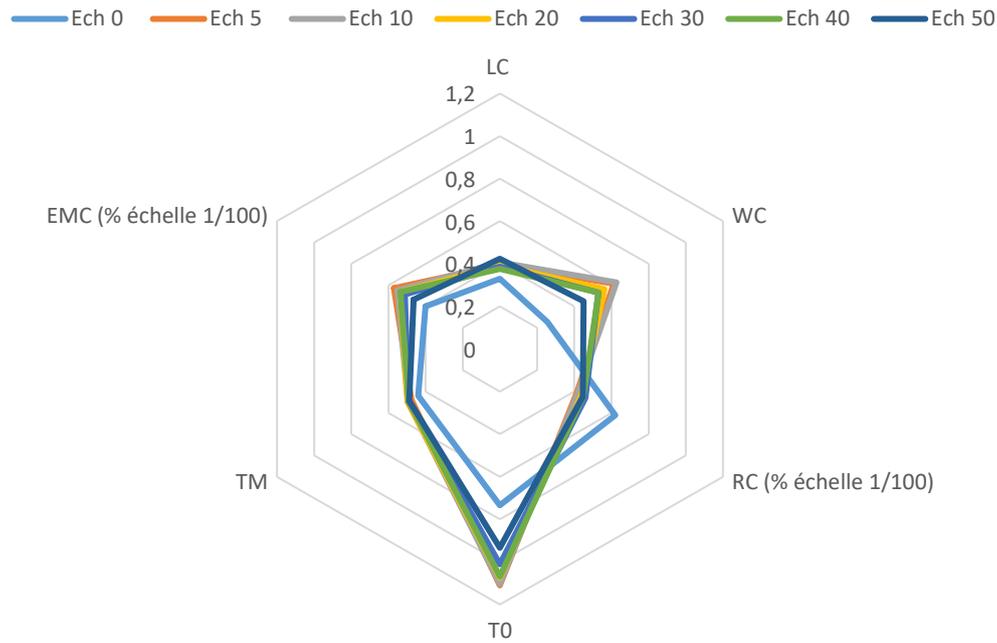


Figure 54 : Comportement en compression des échantillons lavés (éttoffe 1)

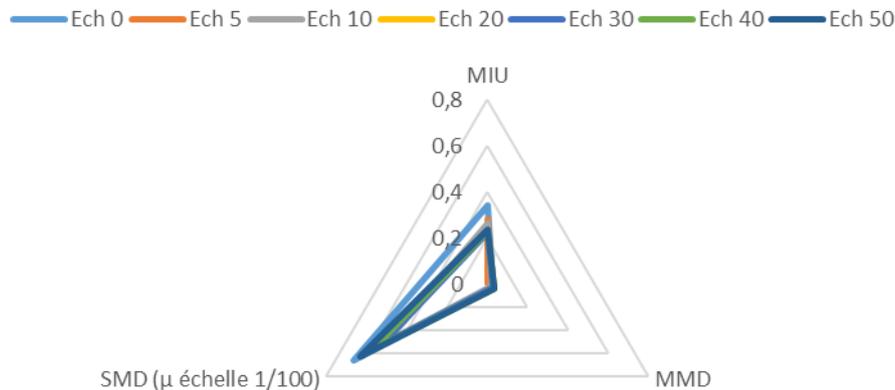


Figure 55 : Paramètres de surface de Kawabata des échantillons (éttoffe 1)

D'après les figures, les lavages successifs affectent les propriétés de compression et de surface des échantillons surtout durant les premiers lavages. En effet, que ce soit le comportement en compression ou la description de l'état de surface, les courbes des Ech 5, 10, 20, 30, 40 et 50 sont proches. On peut observer que la résilience en compression RC ou le coefficient de frottement MIU des échantillons présentent des différences plus significatives entre les étoffes Ech 0 et Ech 5. Pour ces deux paramètres, une rapide décroissance de propriétés est observée après plusieurs lavages avant que leurs valeurs moyennes ne se stabilisent. En effet, la valeur du coefficient de frottement diminue avant d'atteindre un palier à partir du vingtième lavage.

Concernant la valeur de la résilience, celle-ci décroît fortement entre le premier et le cinquième lavage, les lavages suivants n'ayant aucune influence. De plus, on peut remarquer que l'épaisseur T_0 présente également une évolution particulière puisque sa valeur moyenne augmente fortement après les premiers lavages puis diminue par la suite.

1.2 Caractérisation instrumentale

La première partie de la caractérisation menée sur cette étoffe est la description du signal sonore et la détermination de ses propriétés. Dans un premier temps, les signatures acoustiques des bruits de frottement vont être observées puis les spectres sonores seront analysés.

1.2.1 Signature acoustique des signaux sonores

La signature acoustique du bruit de frottement représente la première source d'information disponible. La signature de l'étoffe brute est présentée en Figure 56.

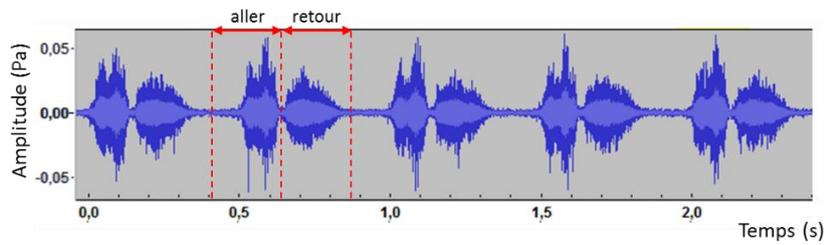


Figure 56 : Signature acoustique de l'étoffe brute

L'allure générale de la signature acoustique correspond au mouvement de balayage effectué par le bras mécanique lors des tests. Celui-ci est composé d'un aller et d'un retour, que l'on retrouve sur le signal de façon périodique. Comme nous pouvons le constater sur la Figure 56, l'aller et le retour ne présentent pas la même signature ; cela s'explique par la structure de la surface textile. En effet, celle-ci présente une fine pilosité donc soit le mouvement du bras est dans le sens de la pilosité soit celui-ci est à rebrousse-poil. La non symétrie de l'armure affecte également cette signature acoustique.

Suite aux lavages successifs, la forme de la signature acoustique tend à se stabiliser, l'exemple de la signature de l'Ech 5 est montré à la Figure 57.

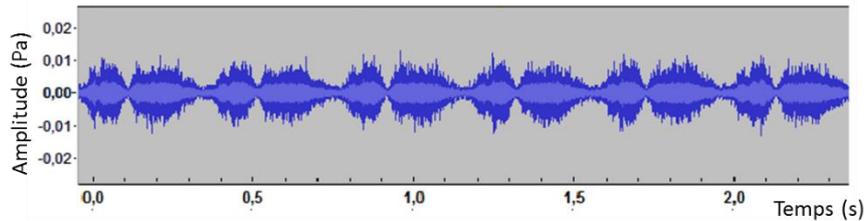


Figure 57 : Signature acoustique de l'Ech 5

Si l'on compare les deux signatures acoustiques présentées, on constate que l'Ech 5 présente une allure différente et une amplitude moindre. De plus, l'aller et le retour présentent des allures plus ressemblantes que dans le cas de l'étoffe brute (Ech 0).

Après avoir observé et décrit les signatures acoustiques des différents échantillons, celles-ci sont traitées par FFT afin d'obtenir des spectres sonores qui sont analysés dans le paragraphe suivant.

1.2.2 Spectres sonores des bruits de frottement

Les spectres sonores des échantillons sont présentés en Figure 58.

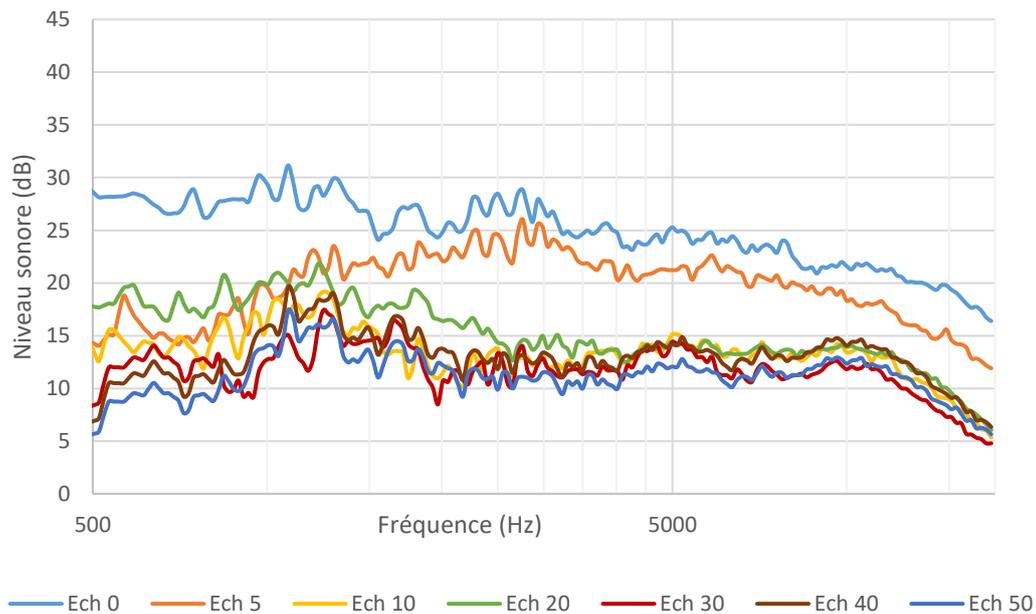


Figure 58 : Spectres sonores des bruits de frottement

Comme énoncé dans le paragraphe 3.4.2 du Chapitre II à partir des spectres plusieurs paramètres peuvent être déterminés. Ainsi le niveau sonore global L_g , l'amplitude de niveau sonore L_m de fréquence correspondante f_{max} et la plage d'amplitude ΔL sont déterminés.

Ces paramètres, présentés dans le Tableau 18, nous permettent de décrire plus finement le bruit de frottement.

Tableau 18 : Propriétés sonores des échantillons

Echantillons	L_g (dB)	L_m (dB)	ΔL (dB)	f_{max} (Hz)
Ech 0	54,2	31,1	23,1	1080
Ech 5	49,7	26,1	23,6	2750
Ech 10	48,9	19,2	29,7	1250
Ech 20	48,6	21,9	26,7	1225
Ech 30	48,3	17,5	30,8	1225
Ech 40	47,8	19,7	28,1	1100
Ech 50	47,2	17,4	29,8	1100

a) Niveau sonore global L_g

La Figure 59 présente l'évolution du niveau sonore global des bruits de frottement en fonction du nombre de lavages subis par les échantillons.

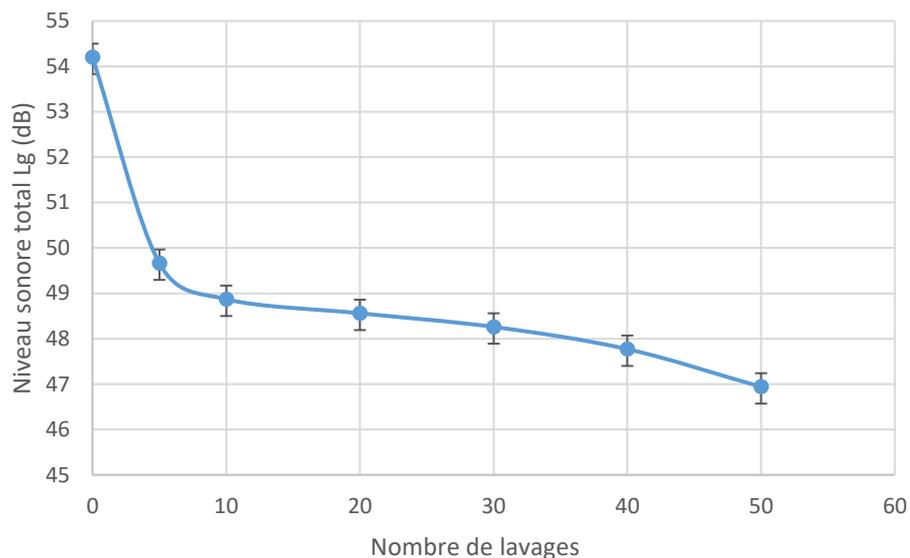


Figure 59 : Courbe d'évolution du niveau sonore total en fonction du nombre de lavages

Au regard de ce graphique, nous pouvons observer une perte totale de niveau sonore de 13,4%, en effet, le niveau tend vers une asymptote horizontale de valeur 47 dB. Ainsi les 10 premiers lavages ont une plus forte influence sur le niveau sonore des bruits de frottements.

b) Plage d'amplitude ΔL

Le Tableau 18 présente les plages d'amplitude des différents échantillons. Ce paramètre permet de déterminer si un bruit de frottement est homogène ou non. En d'autres termes, si l'énergie du bruit est répartie sur l'ensemble du spectre (ΔL grand) ou concentrée autour de son amplitude maximale (ΔL petit). D'après ces résultats, le bruit de frottement de l'étoffe brute est le bruit le

moins homogène de tous car il présente une plage moins étendue. Une fois que l'étoffe a été lavée une dizaine de fois, l'homogénéité de son bruit de frottement devient relativement constante.

c) Fréquence du maximum d'amplitude f_{max} et bande passante

L'ensemble des bruits de frottement présente des spectres relativement homogènes, l'amplitude du spectre ne varie plus. Les spectres présentent tous de larges bandes passantes. Concernant la fréquence f_{max} (correspondante à la fréquence du maximum d'amplitude), les valeurs sont toutes situées dans la zone la plus perceptible du champ auditif humain. Ce n'est donc pas ce paramètre qui va nous permettre de différencier les bruits de frottement.

1.2.3 Analyse en 1/6 d'octave

Dans le but de compléter la caractérisation sonore, l'analyse en 1/6 d'octave est utilisée afin de mieux observer les variations de spectres et la diminution du niveau sonore en fonction des lavages. La Figure 60 présente cette analyse en 1/6 d'octave.

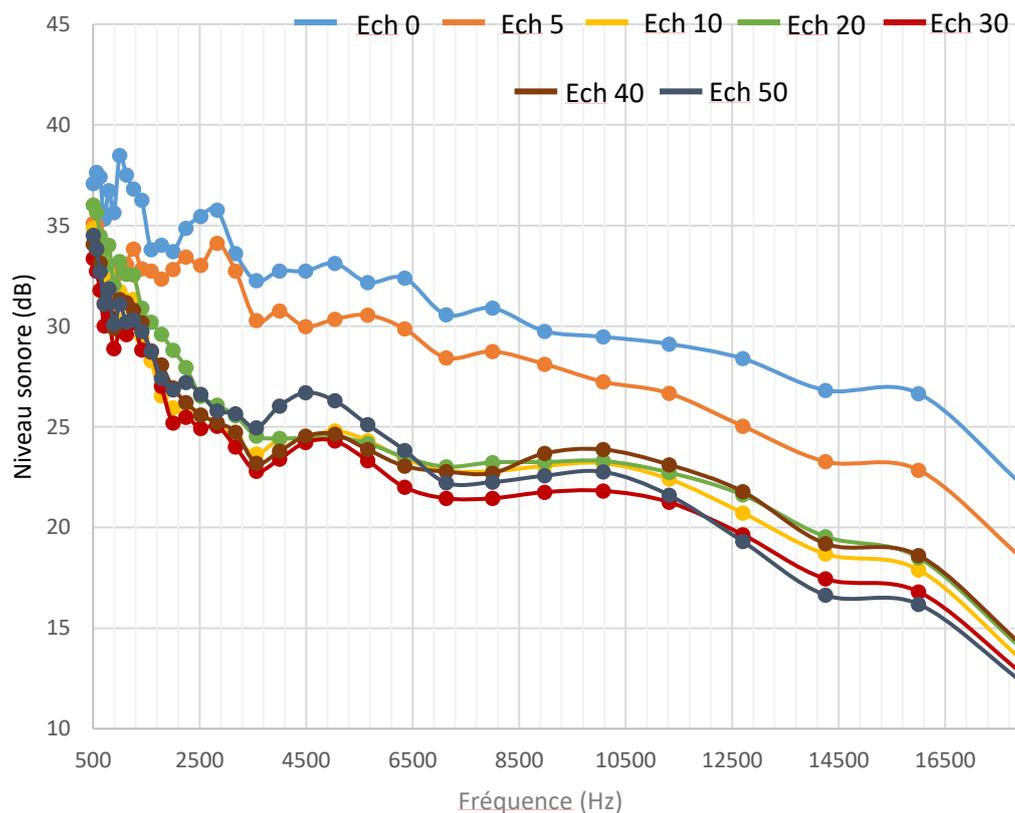


Figure 60 : Analyse en 1/6 d'octave des bruits de frottement des différents échantillons lavés

Ce graphique montre une forte ressemblance entre les échantillons Ech 20, 30, 40 et 50. Cela indique que le niveau sonore se dégrade fortement lors des premiers lavages puis tend vers un palier à partir d'une dizaine de lavages. Afin de quantifier de manière plus objective l'existence

de ce palier, un coefficient de variation, noté Δ , a été déterminé entre le spectre de bandes de l'étoffe brute et les autres spectres. Ce coefficient de variation est défini selon l'équation (38).

$$\Delta = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 100 \quad (38)$$

Avec L_i le niveau sonore de l'Ech i et L_0 le niveau sonore de l'Ech 0 soit celui de l'étoffe brute pour une bande de fréquence donnée. Les valeurs données par le Tableau 19 représentent la moyenne des coefficients de variation calculée pour chacune des bandes de fréquences de l'analyse en 1/6 d'octave.

Tableau 19 : Coefficients de variation entre le spectre de l'étoffe brute (Ech0) et le spectre de l'Ech i

Spectre de l'échantillon i	Coefficient de variation Δ (%)
Ech 5	- 7,3
Ech 10	-30,8
Ech 20	-29,7
Ech 30	-33,1
Ech 40	-31,6
Ech 50	-32,3

Les différentes valeurs de coefficient de variation permettent de confirmer les propos précédents et la présence d'un palier (à partir d'une dizaine de lavages) à partir duquel les bruits de frottement ne varient presque plus.

Au regard de l'ensemble de ces résultats, nous pouvons conclure que seuls les 10 premiers lavages influencent de façon significative la caractérisation sonore des bruits de frottement. Ainsi, que ce soit au niveau des signatures acoustiques ou des spectres sonores, les allures de ces courbes présentent une forte ressemblance à partir d'une dizaine de lavages.

1.3 Caractérisation sensorielle de l'étoffe

Comme énoncé auparavant, les bruits de frottements ont été caractérisés par une deuxième approche : par analyse sensorielle. Dans le but de tracer les profils sensoriels moyens des étoffes, il a été demandé aux panélistes de caractériser les bruits de friction à deux reprises. A la suite de ces séances, la moyenne des notes données par l'ensemble du panel (soit 18 notes par descripteurs) lors de ces séances a été calculée. La Figure 61 présente le profil sensoriel moyen de l'étoffe.

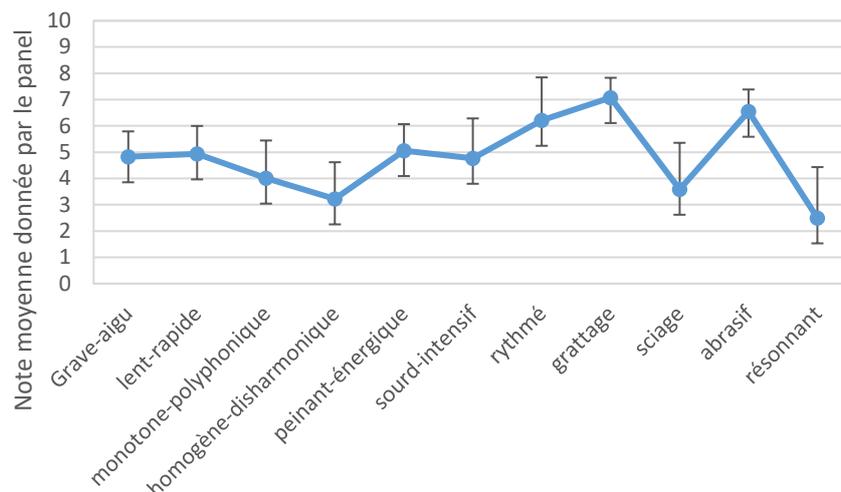


Figure 61 : Profil sensoriel de l'étoffe brute

Comme attendu, le profil sensoriel de l'étoffe est un profil dit « serpent », chaque descripteur présente une note propre. A titre d'exemple, on remarque que le bruit de frottement de l'étoffe est perçu comme fortement *grattant* (7,1) mais peu résonnant (2,5).

Par la suite, la caractérisation sensorielle des sept échantillons ayant subi un nombre de lavages différents (de 5 à 50) a été menée de façon analogue. Pour les rappels, l'ordre d'évaluation des bruits de frottement lors des tests est aléatoire. Les profils sensoriels des échantillons lavés sont représentés à la Figure 62.

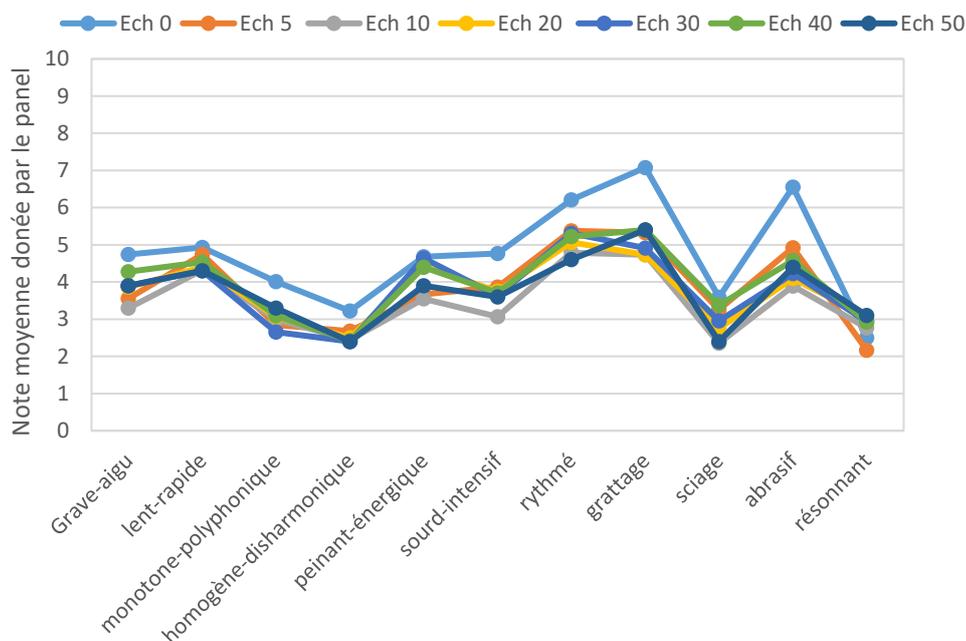


Figure 62 : Profils sensoriels des échantillons selon le nombre de lavages subis

Les descripteurs *grattage* et *abrasif* présentent la plus grande différence d'évaluation sensorielle entre l'échantillon brut et les échantillons lavés. En effet, l'aspect *grattant* du bruit est évalué de 4,7 à 7,1 et le caractère *abrasif* de 3,8 à 6,6. Cependant, pour les descripteurs *lent-rapide*, *peinant-énergique*, *sciage* et *résonnant*, les notes moyennes données par l'ensemble du panel pour les sept échantillons sont relativement proches. Par conséquent, le lavage a peu d'influence sur la perception des panélistes pour ces quatre descripteurs. Ainsi malgré des notes moyennes différentes selon le nombre de lavages subis, une certaine forme de profil est respectée pour l'ensemble des échantillons.

L'évaluation du descripteur *homogène-disharmonique* confirme les résultats obtenus concernant la plage d'amplitude. En effet, l'étoffe brute possède la plage d'amplitude la plus faible et les panélistes jugent que ce bruit est le plus disharmonique. Pour les autres échantillons, le caractère homogène des bruits de frottement est évalué entre 2,4 et 2,7.

Le profil présentant les notes les plus élevées est celui de l'étoffe brute. De plus, un parallèle peut être fait entre les profils sensoriels et les signatures acoustiques des bruits de frottements. En effet, seuls le profil et la signature acoustique de l'étoffe brute se distinguent des autres. Cela montre donc que les lavages ont peu d'influence sur la perception des bruits de frottement par le panel.

1.4 Corrélations de l'ensemble des données

Trois catégories de paramètres ont donc été mesurées sur l'ensemble des échantillons : les paramètres physiques (compression et surface), sonores et sensoriels. Afin de visualiser si des corrélations existent entre l'ensemble de ces paramètres, l'Analyse en Composantes Principales a été utilisée. Trois ACP ont donc été réalisées :

- Entre les paramètres mesurés par KES-F et les propriétés sonores
- Entre les paramètres mesurés par KES-F et les propriétés sensorielles
- Entre les propriétés sonores et sensorielles

A noter que la masse surfacique est également prise en compte lors de ces analyses. De plus, les corrélations existantes entre les paramètres de Kawabata n'étant pas pertinente pour ce travail, nous ne les détaillerons pas. Seules les corrélations dont le coefficient de Pearson (n) est supérieur à 0,8 ont été prises en compte dans nos conclusions.

Nous avons choisi de séparer l'étude des corrélations en trois analyses différentes pour plus de facilité de lecture et de compréhension. Une synthèse des résultats obtenus sera réalisée pour conclure ce paragraphe.

1.4.1 Corrélations entre les paramètres mesurés par KES-F et les propriétés sonores

Le premier test ACP a été effectué entre les neuf paramètres mesurés par le KES-F et les propriétés sonores des bruits de frottement. Deux espaces vectoriels (F1,F2) et (F1,F3) présentent plus de 70% des informations et les cercles de corrélations déterminés par cette analyse sont présentés en Figure 63 et Figure 64. La matrice des coefficients de Pearson nous permettant de déterminer le degré de corrélation entre deux paramètres est exposée dans le Tableau 20. Les valeurs en gras représentent les corrélations qui nous intéressent et dont les coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,8.

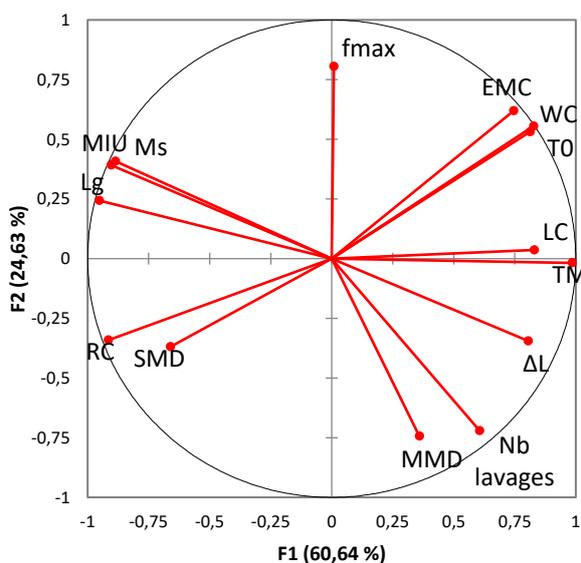


Figure 63 : ACP des paramètres sur les dimensions F1 et F2 (85,27%)

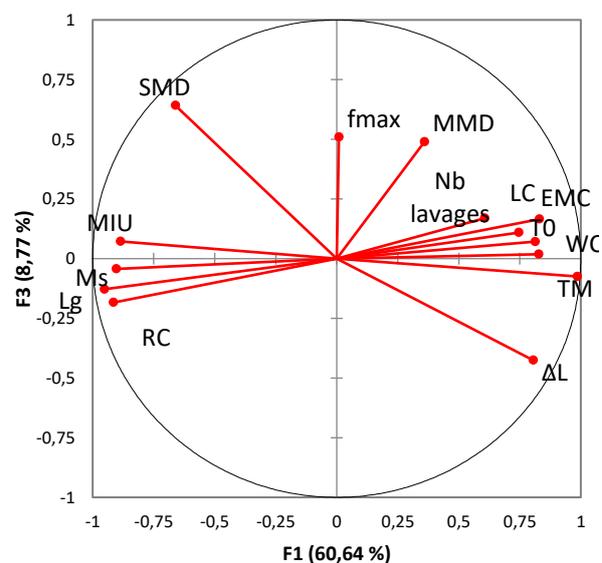


Figure 64 : ACP des paramètres sur les dimensions F1 et F3 (69,41%)

Au regard de ces résultats, plusieurs corrélations peuvent être mises en évidence entre les paramètres. La première conclusion que nous pouvons tirer de ces informations est la non pertinence de la fréquence du maximum d'amplitude. La caractérisation sonore avait déjà montré que ce paramètre ne nous permettait pas de différencier les bruits de frottement.

Le niveau sonore global L_g est lui corrélé à des paramètres de surface et des paramètres de compression : il est corrélé positivement avec la résilience de compression RC ($n=0,82$), le coefficient de frottement MIU ($n=0,91$) et la masse surfacique du tissu Ms ($n=0,95$). A

contrario, il existe une corrélation à coefficient négatif entre ce paramètre est le nombre de lavages ($n=-0,81$), la linéarité de compression LC ($n=-0,84$) et l'épaisseur du tissu T_M sous 5 kPa ($n=-0,92$).

Le dernier paramètre sonore dont les corrélations nous intéressent est la plage d'amplitude ΔL . Celle-ci est corrélée positivement avec l'épaisseur de l'étoffe ($n=0,81$). Des corrélations négatives existent avec le coefficient de frottement ($n=-0,86$) et la masse surfacique ($n=-0,82$). Pour ce paramètre, on retrouve des corrélations communes avec le niveau sonore global, ce qui semble évident d'après l'équation (36) définissant la plage d'amplitude.

De plus, nous pouvons remarquer que le nombre de lavages subis par l'étoffe est corrélé avec les propriétés de surface de celle-ci, notamment le coefficient de frottement et sa moyenne quadratique.

Tableau 20 : Matrice des coefficients de Pearson

Variables	Nb lavages	LC	WC	RC	T ₀	T _M	EMC	MIU	MMD	SMD	Ms	Lg	ΔL	f _{max}
Nb lavages	1	0,519	0,085	-0,346	0,098	0,555	0,010	-0,788	0,789	-0,046	-0,818	-0,810	0,705	-0,428
LC		1	0,690	-0,858	0,602	0,794	0,551	-0,632	0,237	-0,408	-0,676	-0,836	0,677	0,155
WC			1	-0,947	0,984	0,814	0,975	-0,512	-0,086	-0,739	-0,534	-0,645	0,449	0,439
RC				1	-0,921	-0,878	-0,895	0,638	-0,144	0,604	0,683	0,820	-0,557	-0,377
T ₀					1	0,801	0,992	-0,523	-0,007	-0,699	-0,548	-0,634	0,390	0,423
T _M						1	0,726	-0,903	0,359	-0,684	-0,905	-0,915	0,808	-0,077
EMC							1	-0,425	-0,083	-0,667	-0,456	-0,557	0,294	0,524
MIU								1	-0,625	0,489	0,992	0,913	-0,855	0,364
MMD									1	0,344	-0,665	-0,555	0,274	-0,410
SMD										1	0,434	0,461	-0,673	0,011
Ms											1	0,946	-0,823	0,283
Lg												1	-0,821	0,095
ΔL													1	-0,432
f _{max}														1

Pour rappel, les valeurs en gras mettent en évidence les coefficients de corrélation supérieurs à 0,8

1.4.2 Corrélations entre les paramètres mesurés par KES-F et les propriétés sensorielles

Dans un deuxième temps, une analyse ACP a été réalisée entre les paramètres de Kawabata et les descripteurs sensoriels. Deux espaces vectoriels (F1,F2) et (F1,F3) présentent plus de 70% des informations et les cercles de corrélations obtenus sont représentés en Figure 65 et Figure 66. La matrice des coefficients de Pearson est décrite dans le Tableau 21.

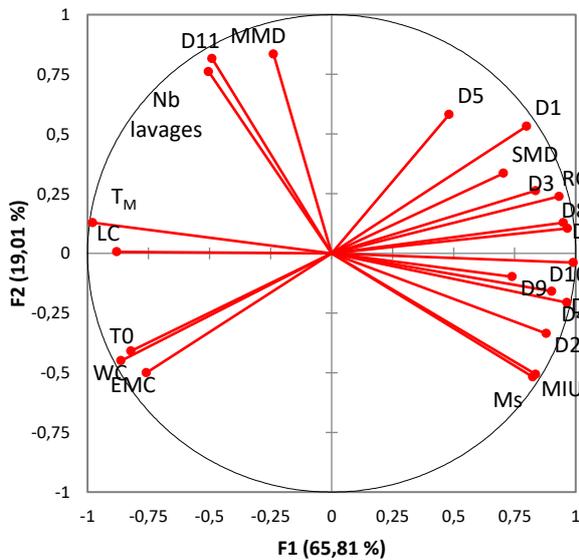


Figure 65 : ACP des données représentée sur les dimensions F1 et F2 (84,82%)

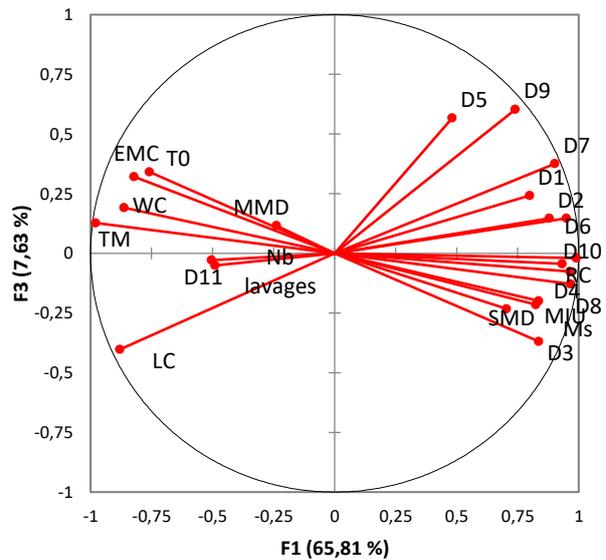


Figure 66 : ACP des données représentée sur les dimensions F1 et F3 (73,44%)

Tableau 21 : Matrice des coefficients de Pearson (ACP paramètres Kawabata / descripteurs)

Variables	Lavages	LC	WC	RC	T0	TM	EMC	MIU	MMD	SMD	Ms	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
Nb lavages	1	0,52	0,09	-0,35	0,10	0,56	0,01	-0,79	0,79	-0,05	-0,82	0,02	-0,65	-0,26	-0,70	0,09	-0,39	-0,61	-0,33	-0,36	-0,48	0,76
LC		1	0,69	-0,86	0,60	0,79	0,55	-0,63	0,24	-0,41	-0,68	-0,81	-0,79	-0,63	-0,83	-0,69	-0,84	-0,96	-0,79	-0,85	-0,84	0,38
WC			1	-0,95	0,98	0,81	0,98	-0,51	-0,09	-0,74	-0,53	-0,88	-0,54	-0,89	-0,75	-0,60	-0,83	-0,65	-0,91	-0,46	-0,84	0,03
RC				1	-0,92	-0,88	-0,89	0,64	-0,14	0,60	0,68	0,86	0,66	0,86	0,86	0,64	0,87	0,82	0,91	0,58	0,89	-0,19
T0					1	0,80	0,99	-0,52	-0,01	-0,70	-0,55	-0,78	-0,48	-0,87	-0,73	-0,51	-0,77	-0,58	-0,87	-0,35	-0,80	0,04
TM						1	0,73	-0,90	0,36	-0,68	-0,90	-0,68	-0,89	-0,81	-0,97	-0,32	-0,90	-0,86	-0,96	-0,68	-0,99	0,60
EMC							1	-0,43	-0,08	-0,67	-0,46	-0,78	-0,38	-0,85	-0,65	-0,53	-0,71	-0,51	-0,82	-0,27	-0,72	-0,08
MIU								1	-0,62	0,49	0,99	0,34	0,89	0,64	0,92	-0,05	0,69	0,74	0,78	0,55	0,85	-0,83
MMD									1	0,34	-0,66	0,29	-0,33	0,03	-0,40	0,32	-0,02	-0,36	-0,15	-0,11	-0,24	0,72
SMD										1	0,43	0,67	0,62	0,76	0,64	0,29	0,80	0,45	0,74	0,43	0,73	-0,18
Ms											1	0,35	0,86	0,65	0,93	0,01	0,69	0,76	0,78	0,54	0,84	-0,79
D1												1	0,58	0,74	0,63	0,80	0,84	0,72	0,82	0,71	0,77	0,03
D2													1	0,62	0,90	0,22	0,85	0,86	0,82	0,84	0,91	-0,77
D3														1	0,80	0,32	0,75	0,55	0,88	0,37	0,81	-0,13
D4															1	0,32	0,89	0,88	0,90	0,66	0,95	-0,61
D5																1	0,60	0,60	0,41	0,56	0,41	0,28
D6																	1	0,89	0,90	0,79	0,94	-0,41
D7																		1	0,79	0,88	0,88	-0,57
D8																			1	0,67	0,98	-0,41
D9																				1	0,76	-0,54
D10																					1	-0,55
D11																						1

Les descripteurs sont numérotés de la façon suivante :

- D1 Grave-aigu
- D2 Lent-rapide
- D3 Monotone-polyphonique
- D4 Homogène-disharmonique
- D5 Peinant-énergique
- D6 Sourd-intensif
- D7 Rythmé
- D8 Grattage
- D9 Sciage
- D10 Abrasif
- D11 Résonnant

D'après cette analyse, deux observations peuvent être faites. La première montre que les descripteurs sont fortement corrélés avec les propriétés de compression et de surface de l'étoffe. La deuxième permet de noter que certains descripteurs sont également corrélés entre eux.

Les coefficients de Pearson traduisant la corrélation entre les descripteurs et le nombre de lavages subis par les échantillons ne sont pas significatifs. Cela s'explique par la ressemblance des profils sensoriels à partir de cinq lavages (Figure 62).

On constate qu'à l'exception des termes *peinant-énergique et résonnant*, les descripteurs sont tous au moins corrélés à un paramètre de compression. Les descripteurs *monotone-homogène, grattage et abrasif* sont les descripteurs présentant le plus de corrélation avec les propriétés de compression des étoffes. Dans l'ensemble, les corrélations existant entre ces deux catégories de paramètres présentent des coefficients de Pearson relativement élevés.

Concernant le lien entre les propriétés de surface et l'évaluation sensorielle, les corrélations sont moins nombreuses. D'après ces résultats, seul le coefficient de frottement semble influencer sur l'évaluation des descripteurs *lent-rapide, grattage, abrasif et résonnant*.

Enfin, les descripteurs ne sont pas tous indépendants les uns des autres. Seul le terme *résonnant* ne présente aucune corrélation avec l'un des autres descripteurs. Les descripteurs les plus corrélés entre eux sont les suivants : *lent-rapide, homogène-disharmonique, sourd-intensif, grattage et abrasif*.

1.4.3 Corrélations entre les propriétés sonores et sensorielles

La dernière analyse ACP concerne les corrélations entre les propriétés sonores et sensorielles des bruits de frottement des étoffes. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 67, Figure 68 et dans le Tableau 22.

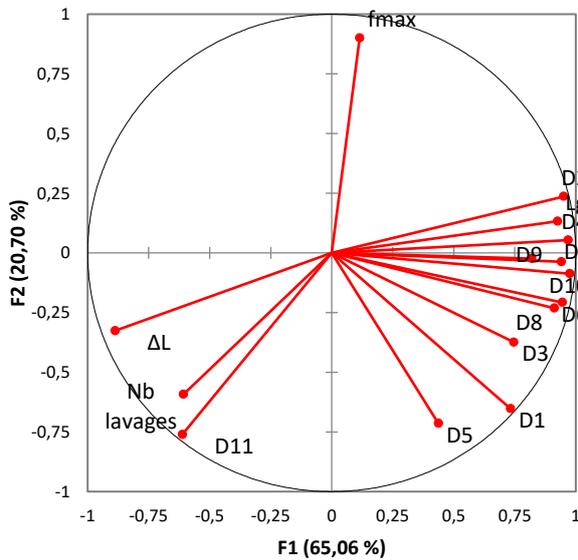


Figure 67 : ACP des données représentée sur les dimensions F1 et F2 (85,76%)

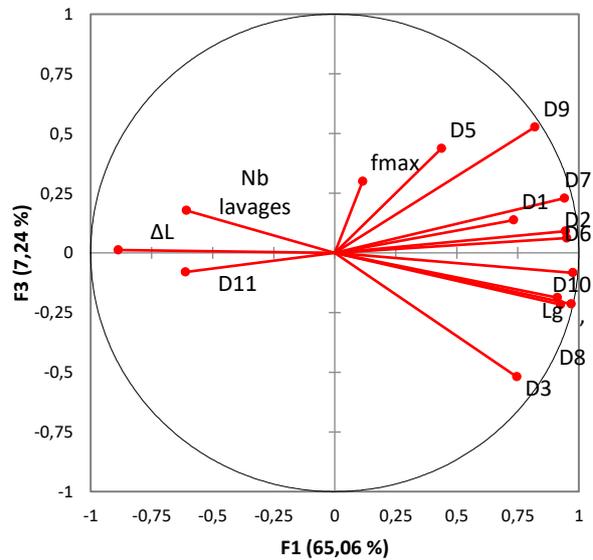


Figure 68 : ACP des données représentée sur les dimensions F1 et F3 (72,3%)

Les corrélations entre les descripteurs sont de nouveau mises en évidence à travers ces résultats. Au sujet des corrélations existantes entre les paramètres sonores et les descripteurs sensoriels, le niveau sonore global est corrélé positivement avec six descripteurs ; ce résultat est cohérent avec les profils sensoriels des échantillons. En effet, ils présentent tous une allure de profil similaire, seule l'intensité des sensations diminue avec le nombre de lavages et donc avec la diminution du niveau sonore.

A noter qu'il existe également une corrélation entre le descripteur *résonnant* et la fréquence du maximum d'amplitude f_{max} même si celle-ci est légèrement inférieure à 0,8 ($n = -0,78$).

Tableau 22 : Matrice des coefficients de Pearson

Variables	Nb lavages	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	Lg	ΔL	f_{\max}
Nb lavages	1	0,025	-0,645	-0,256	-0,696	0,090	-0,388	-0,614	-0,332	-0,361	-0,478	0,765	-0,810	0,705	-0,428
D1		1	0,575	0,742	0,631	0,803	0,842	0,716	0,819	0,708	0,773	0,029	0,525	-0,451	-0,440
D2			1	0,621	0,900	0,220	0,849	0,863	0,821	0,840	0,908	-0,771	0,851	-0,950	0,357
D3				1	0,798	0,320	0,749	0,554	0,883	0,366	0,813	-0,127	0,704	-0,588	-0,374
D4					1	0,325	0,891	0,880	0,895	0,659	0,950	-0,609	0,974	-0,871	0,087
D5						1	0,604	0,599	0,407	0,556	0,409	0,277	0,297	-0,139	-0,509
D6							1	0,886	0,896	0,790	0,941	-0,407	0,800	-0,811	0,008
D7								1	0,793	0,880	0,882	-0,569	0,884	-0,768	0,084
D8									1	0,675	0,976	-0,414	0,804	-0,704	-0,116
D9										1	0,761	-0,545	0,617	-0,710	0,212
D10											1	-0,552	0,877	-0,817	0,043
D11												1	-0,640	0,741	-0,779
Lg													1	-0,821	0,095
ΔL														1	-0,432
f_{\max}															1

Les descripteurs sont numérotés de la façon suivante :

- D1 Grave-aigu
- D2 Lent-rapide
- D3 Monotone-polyphonique
- D4 Homogène-disharmonique
- D5 Peinant-énergique
- D6 Sourd-intensif
- D7 Rythmé
- D8 Grattage
- D9 Sciage
- D10 Abrasif
- D11 Résonnant

1.4.4 Synthèse des corrélations

L'objectif de ce paragraphe est de synthétiser l'ensemble des corrélations qui viennent d'être mises en évidence lors de caractérisation sonore et sensorielle des bruits de frottement de l'étoffe 1.

Comme expliqué précédemment, l'ensemble des descripteurs sensoriels comme les paramètres de compression et de surface ne sont pas tous indépendants, ainsi il est possible de réduire le nombre de variables lors de l'analyse en composantes principales. L'ACP de l'espace perceptif des bruits de frottements des étoffes nous permet d'obtenir le cercle de corrélation présenté en Figure 69.

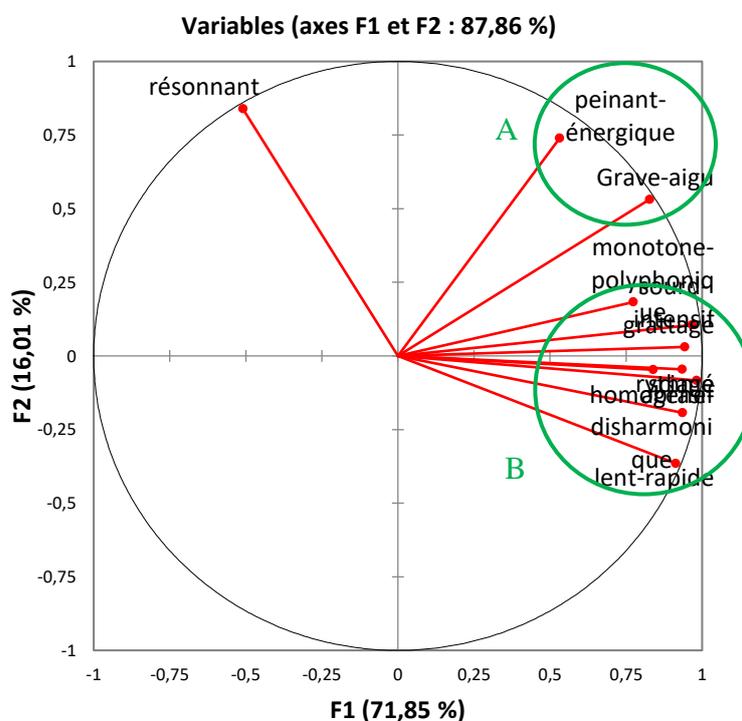


Figure 69 : Cercle de corrélation de l'espace perceptif

Des corrélations de coefficients positifs peuvent être ainsi observées dans les groupes de descripteurs A et B. Ces groupes peuvent donc être assimilés à un descripteur, les descripteurs choisis sont ceux présentant une plus grande corrélation avec les axes F1 et F2, en l'occurrence il s'agit des descripteurs *résonnant*, *grave-aigu* et *abrasif*. Par conséquent, le cercle de corrélation peut être représenté uniquement à l'aide de ces trois descripteurs sensoriels (Figure 70).

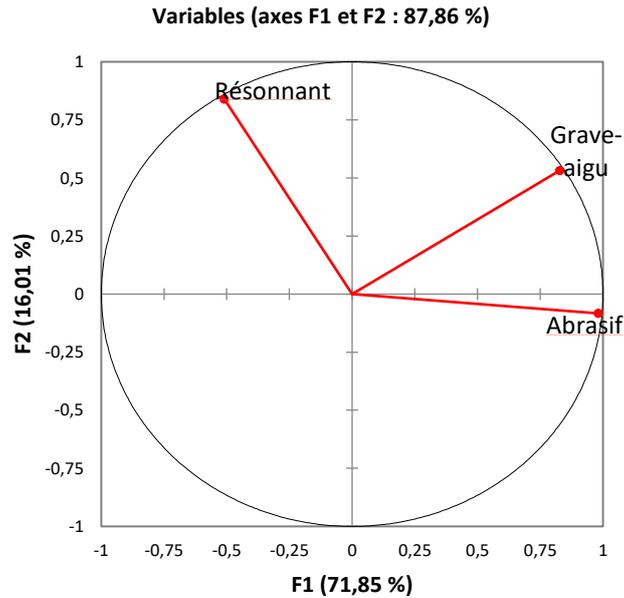


Figure 70 : Cercle de corrélation de l'espace perceptif après réduction des variables

De la même façon, le nombre de paramètres mesurés par Kawabata peuvent être réduits puisqu'ils ne sont pas tous indépendants. Par conséquent, le cercle de corrélation présentant les corrélations entre paramètres mécaniques, sonores et sensorielles est obtenu et présenté en Figure 71.

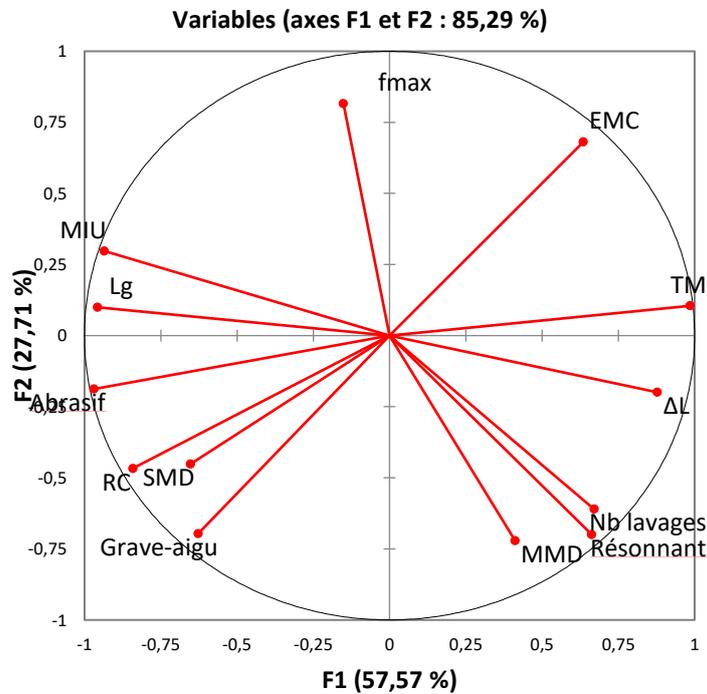


Figure 71 : Cercle de corrélation simplifié

Dans la suite de ce paragraphe, seules les corrélations entre les catégories de paramètres sont décrites, ainsi, les corrélations entre les descripteurs ou entre les propriétés sonores ne sont pas reprises.

La Figure 71 et le Tableau 23 présente un résumé de ces corrélations ; les cases grisées indiquent qu'il existe au moins une corrélation (dont le coefficient est positif ou négatif) entre le paramètre i et la catégorie de propriété j . Ces quatre catégories rassemblent 23 paramètres différents.

Tableau 23 : Synthèse des corrélations entre les paramètres mesurés

	grave-aigu	lent-rapide	monotone-polyphonique	homogène-disharmonique	peinant-énergique	sourd-intensif	rythmé	grattage	sciage	abrasif	résonnant	L_g	ΔL	f_{max}
Compression	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Surface	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sonore	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sensorielle	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Plusieurs observations peuvent être faites à partir de ce tableau sur les corrélations existantes entre les paramètres. Dans un premier temps, on remarque que seuls deux d'entre eux ne présentent aucune corrélation significative : le descripteur *peinant-énergique* et la fréquence du maximum d'amplitude f_{max} . De ce fait, ces différents paramètres ne sont pas pertinents pour la description et la caractérisation du bruit de frottement de cette étoffe.

A l'inverse, les descripteurs *lent-rapide*, *homogène-disharmonique*, *sourd-intensif* et *abrasif*, de même que le niveau sonore global et la plage d'amplitude sont corrélés avec au moins un paramètre de chaque catégorie. Ainsi ces termes sont les descripteurs les plus pertinents pour la description de la perception des bruits de frottements.

Les paramètres de compression, notamment la résilience RC et l'épaisseur de l'étoffe, jouent un rôle majeur dans la perception des bruits de frottement mais également sur la valeur du niveau sonore global. De ce fait, si la résilience en compression de l'étoffe diminue, le niveau sonore global des bruits de frottement sera plus faible. Concernant les propriétés de surface, le paramètre le plus impactant est le coefficient de frottement MIU de l'étoffe. De ce fait, si ces propriétés sont modifiées, par exemple par l'intermédiaire de traitements de surface spécifiques, le niveau sonore des bruits de frottement de l'étoffe évoluera en conséquence.

Dans un premier temps, cette étude de cas de l'étoffe 1 a permis de mettre en évidence que l'usure de la surface de l'étoffe par de multiples lavages joue un rôle sur les bruits de friction et leur perception. De plus, un lien direct entre la compressibilité, la pilosité de l'étoffe et le niveau sonore des bruits de frottement de celle-ci a été démontré. En effet, une pilosité de surface plus importante tend à augmenter le nombre de points de contact ainsi que le frottement entre les étoffes.

D'un point de vue sensoriel, les différences de perception ne sont pas franches puisque les profils sont fortement semblables même si plusieurs descripteurs sont en corrélation avec les propriétés physiques de l'étoffe.

Enfin, la carte produit représentée en Figure 72, peut être obtenue et superposée à l'espace vectoriel défini précédemment.

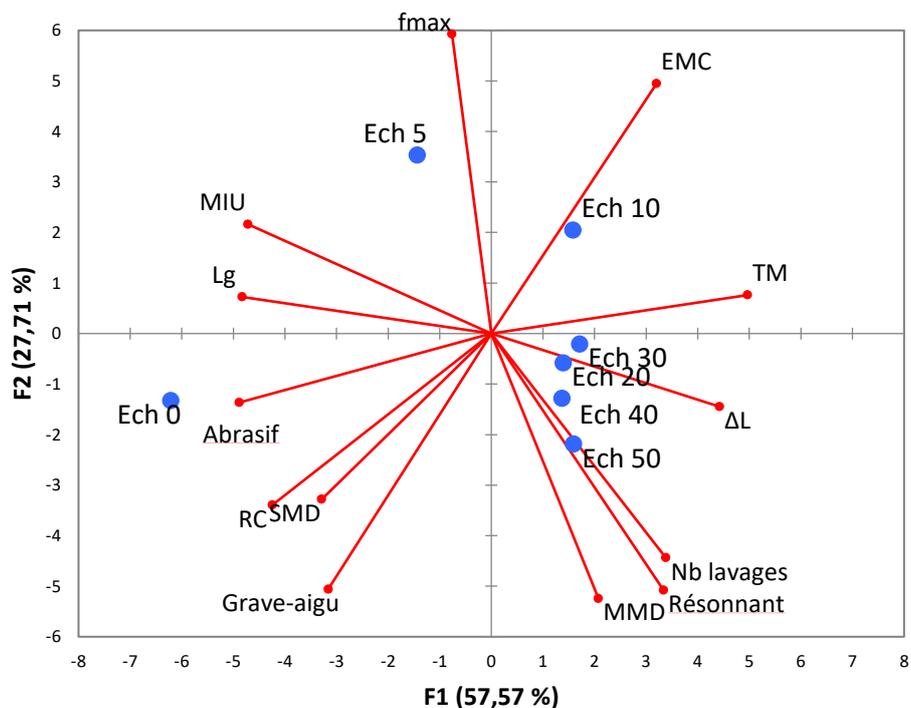


Figure 72 : Espace produit des échantillons lavés

D'après cette carte produit, le regroupement des échantillons ayant subi un nombre de lavages supérieur à 20 confirme les résultats obtenus en terme de caractérisation sonore et sensorielle.

La seconde partie de ce chapitre va consister à déterminer si les corrélations que nous venons de mettre en évidence sont applicables à d'autres étoffes.

2. Généralisation des résultats et comparaison de l'ensemble des étoffes

Le paragraphe précédent s'est focalisé sur la caractérisation des bruits de frottement de l'étoffe 1 ; nous allons maintenant chercher à généraliser nos conclusions pour l'ensemble des étoffes étudiées. Pour cela, la même étude a été menée pour chaque étoffe :

- Caractérisation physique
- Caractérisation instrumentale
- Caractérisation sensorielle
- Etude des corrélations entre l'ensemble des paramètres

2.1 Caractérisation physique des étoffes

Pour chacune des étoffes étudiées, une caractérisation en compression et en surface a été réalisée à l'aide de la chaîne d'évaluation de Kawabata. Dans le cadre de cette caractérisation, vingt mesures ont été réalisées pour chaque propriété afin d'obtenir des valeurs de LPE acceptable (Chapitre I.5.1). La Figure 73 présente le comportement en compression des différentes étoffes.

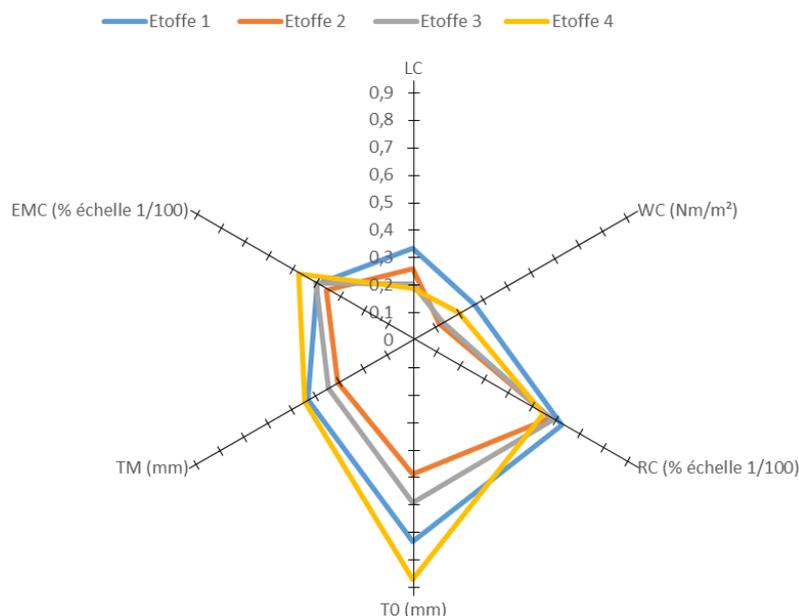


Figure 73 : Paramètres de compression Kawabata des étoffes étudiées

D'après la figure ci-dessus, des différences de comportement en compression sont observées entre les étoffes. On peut constater que les étoffes 1 et 4 sont plus compressibles et présentent une meilleure résilience en compression que les deux autres étoffes. En effet, elles présentent une épaisseur et un facteur de compressibilité plus importants. De plus, une ressemblance de comportement est observée entre les étoffes 2 et 3. D'après l'étude de la surface et de ses

propriétés de compression, on constate que les étoffes les plus pileuses sont plus compressibles, ce qui est normal car on comprime d'abord la pilosité de surface puis la structure. De la même manière, les propriétés de surface sont présentées Figure 74.

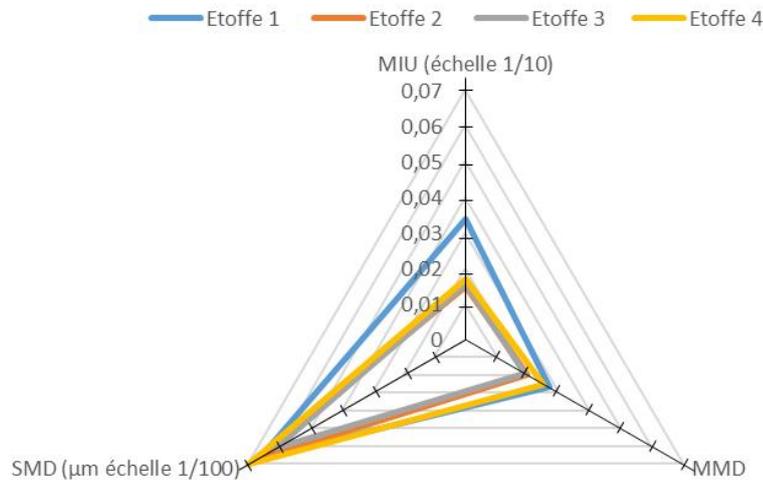


Figure 74 : Paramètres de surface Kawabata des étoffes étudiées

On peut constater que pour l'ensemble des étoffes, les valeurs de rugosité géométrique des étoffes ne présentent pas de différence significative. Les propriétés de surface, que ce soit le coefficient de frottement ou sa moyenne quadratique, des étoffes 2 et 3 sont fortement similaires. Malgré une déviation moyenne de MIU similaire à l'étoffe 4, l'étoffe 1 est caractérisée par un coefficient de friction deux fois plus grand que les autres étoffes. Cette différence s'explique par l'enduction imperméable de la surface qui augmente ce coefficient.

Cette étude des propriétés de compression et de surface des étoffes a permis de mettre en avant une ressemblance de comportement des étoffes 1 et 4 qui présentent toutes deux une armure de type sergé. Il en est de même pour les étoffes 2 et 3 d'armure de type toile.

2.2 Caractérisation instrumentale

Les spectres de bandes (1/6 d'octave) pour l'ensemble des étoffes sont présentés en Annexe C.

2.2.1 Signatures acoustiques

Les signatures acoustiques des bruits de frottement permettent de comparer visuellement les bruits de frottement des différentes étoffes.

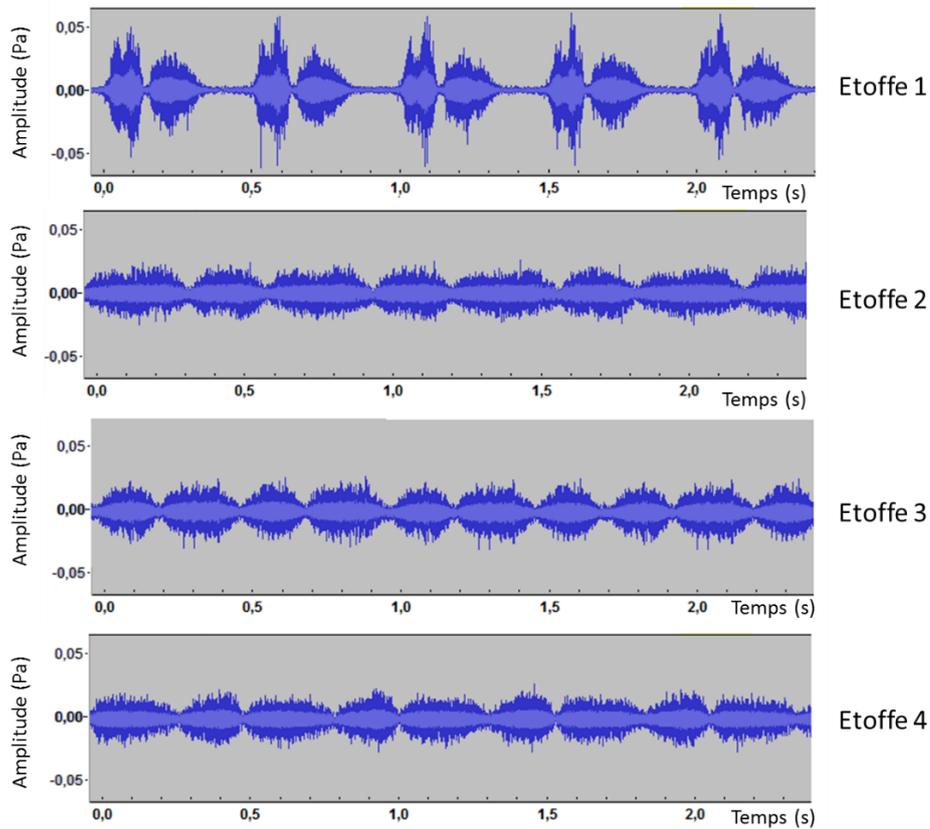


Figure 75 : Signatures acoustiques des bruits de frottement des étoffes

Chaque étoffe présente une signature particulière (Figure 75) même si l'on peut observer certaines similitudes, principalement entre les étoffes 2 et 4. La signature acoustique de l'étoffe 1 est très différente des autres, cela peut s'expliquer par l'enduction de sa surface. En effet, au bout de plusieurs lavages, l'enduction est progressivement éliminée et la signature acoustique de l'étoffe (Figure 57) se rapproche des signatures présentées en Figure 75.

2.2.2 Niveau sonore global des bruits de frottement

L'un des paramètres les plus importants de la caractérisation sonore des bruits de frottement des étoffes est le niveau sonore global L_g .

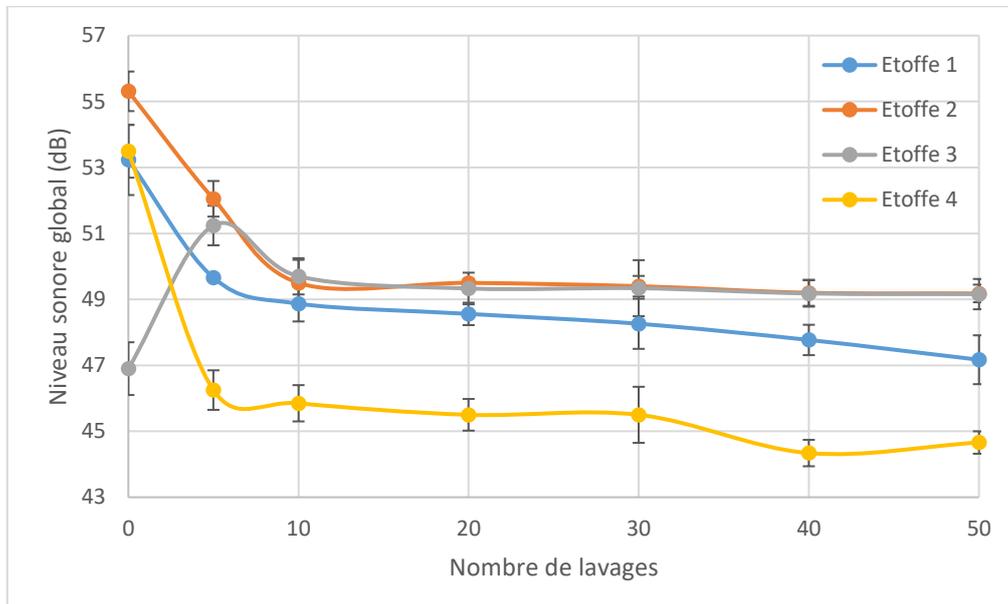


Figure 76 : Evolution du niveau sonore global pour l'ensemble des étoffes

D'après la Figure 76, on constate que le niveau des bruits de frottement des étoffes 1,2 et 4 a tendance à diminuer avec le nombre de lavage alors que celui de l'étoffe 3 augmente avant de se stabiliser. Cette augmentation du niveau sonore peut être expliquée par l'état de surface de l'étoffe qui présente une très faible pilosité initiale.

Comme pour l'analyse précédente, la différence de niveau sonore entre le bruit de frottement de l'étoffe brute et l'étoffe lavée 50 fois a été mise en évidence par le calcul d'un coefficient moyen de variation (équation (38)). Les résultats sont présentés dans le Tableau 24.

Tableau 24 : Coefficient de variation du niveau sonore

Etoffe n °	1	2	3	4
Coefficient de variation du niveau sonore (%)	-11,4	-11	+5,4	-16,5

Que ce soit une diminution ou une augmentation du niveau sonore, celle-ci est observée entre le premier et le dixième lavage. ; après cela, le niveau sonore global se stabilise et devient constant.

2.3 Caractérisation sensorielle

2.3.1 Profils sensoriels des étoffes brutes

Comme pour l'étude précédente, les panélistes ont également évalué les propriétés sensorielles de l'ensemble des étoffes. Dans un premier temps, il leur a été demandé de caractériser les bruits de frottement des étoffes brutes puis les bruits des échantillons lavés. Les profils sensoriels de chacune des étoffes brutes sont représentés à la Figure 77.

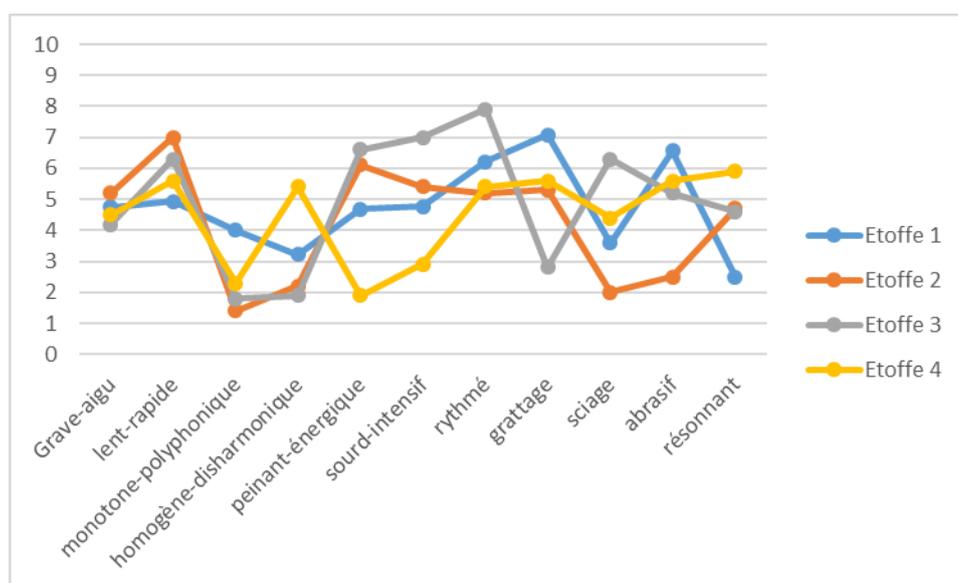


Figure 77 : Profils sensoriels des étoffes brutes

D'après cette figure, les bruits de frottements présentent des profils sensoriels différents pour chacune des étoffes. De ce fait, on conclue que les panélistes arrivent à différencier les bruits de frottement les uns des autres. En effet, certains descripteurs présentent de plus grandes différences de perception, comme c'est le cas pour les termes suivants : *peinant-énergique*, *sourd-intensif* ou *grattage*. A l'inverse, le caractère *grave* ou *aigu* du bruit de frottement varie moins d'une étoffe à l'autre. En effet, les notes attribuées par les panélistes pour ce terme varient entre 4,2 et 5,3.

2.3.2 Influence du lavage sur l'évaluation sensorielle

La caractérisation sensorielle de l'ensemble des échantillons lavés jusqu'à 50 fois a été réalisée et les profils sensoriels obtenus sont présentés en Annexe D. Les profils sensoriels des échantillons lavés sont fortement confondus pour chacune des étoffes, à titre d'exemple la Figure 78 montre la caractérisation sensorielle de l'étoffe 4.

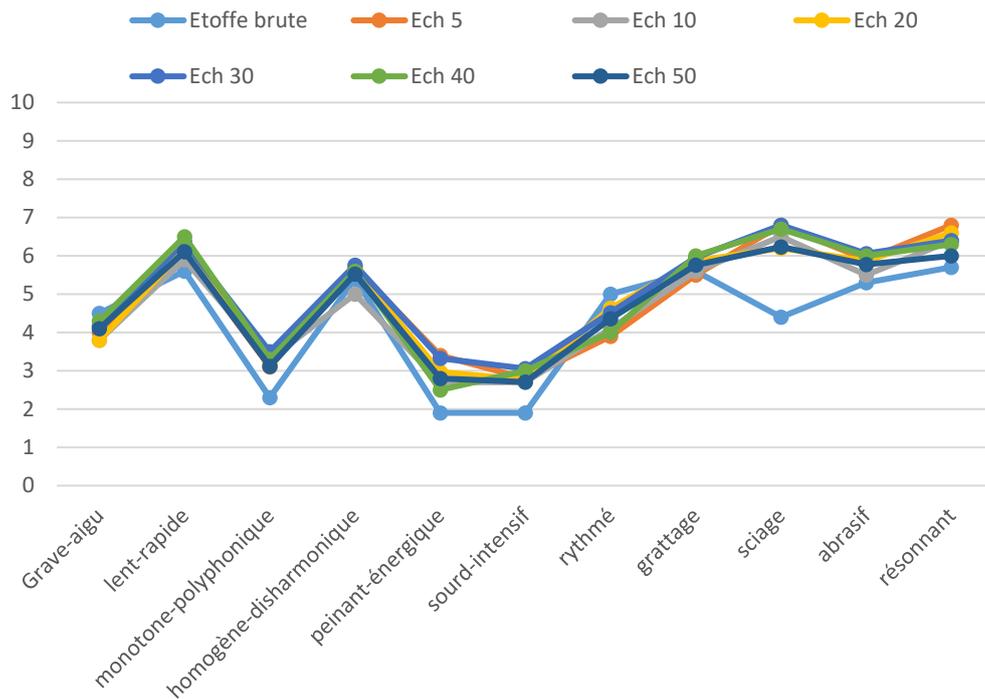


Figure 78 : Profils des échantillons de l'étoffe 4

On remarque que les profils sont relativement confondus, la plus grande différence de perception concerne le caractère *sciant* du bruit. En effet, un changement net de perception de ce descripteur est observé entre le bruit de l'étoffe brute et celui de l'étoffe lavée.

L'analyse des profils sensoriels a permis de montrer que les panélistes sont capables de différencier deux tissus différents mais pas deux échantillons issus de la même étoffe présentant des stades de lavages différents.

2.4 Etude des corrélations

Pour chacune des étoffes, les analyses en composantes principales ont été réalisées de façon analogue à celle décrite au paragraphe 1.4 du Chapitre III. Le Tableau 25 présente la synthèse des corrélations mises en évidence entre les propriétés sonores, sensorielles et mécaniques pour chaque tissu.

Un code couleur a été attribué à chaque étoffe et les cases pleines indiquent qu'il existe au moins une corrélation (positive ou négative) entre le paramètre i et la catégorie de propriétés j .

Tableau 25 : Synthèse des corrélations existantes entre les différents paramètres mesurés

■ Etoffe 1 ■ Etoffe 2 ■ Etoffe 3 ■ Etoffe 4

Paramètres Propriétés	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	Lg	ΔL	f_{max}	
Compression	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Surface	■	■		■		■	■	■	■	■	■	■	■		
Sonore	■	■	■	■		■	■	■	■	■	■				
Sensorielle															■

D1 : Grave-aigu, D2 : Lent-rapide, D3 : Monotone-polyphonique, D4 : Homogène-disharmonique, D5 : Peinant-énergique, D6 : Sourd-intensif, D7 : Rythmé, D8 : Grattage, D9 : Sciage, D10 : Abrasif, D11 : Résonnant

L'étude de l'influence du lavage sur les bruits de frottement des différentes étoffes a mis en évidence de nombreuses corrélations.

Cependant d'après le tableau, on peut remarquer que certains paramètres sont systématiquement corrélés entre eux, peu importe l'étoffe considérée. En effet, les descripteurs *grave-aigu*, *monotone-polyphonique*, *rythmé et sciant* (D1, D3, D7 et D9) sont liés aux propriétés de compression de l'étoffes. C'est aussi le cas du niveau sonore global qui est corrélé à la résilience et l'épaisseur du tissu sous 5 kPa mais également à plusieurs descripteurs sensoriels.

Inversement, certains paramètres ne présentent pas de corrélation particulière avec d'autres propriétés comme la fréquence du maximum d'amplitude. En effet, celle-ci se situe généralement dans la zone préférentielle du champ auditif humain mais n'influe pas sur l'évaluation des descripteurs. On peut également noter que les descripteurs *peinant-énergique et résonnant* (D5 et D11) sont très peu corrélés aux autres paramètres dans cette étude.

Concernant les propriétés de compression, la résilience de compression et l'épaisseur de l'étoffe sont les paramètres plus significatifs. Ces paramètres sont en lien direct avec la pilosité de la surface puisque plus une étoffe est pileuse, plus elle sera compressible. Ainsi, la présence d'une pilosité plus importante augmente le nombre de points de contact et donc le frottement entre deux surfaces ; ainsi le niveau sonore des bruits de friction a tendance à augmenter.

Les propriétés de surface ont aussi une influence sur la caractérisation des bruits de frottement. En effet, parmi les paramètres de surface mesurés, le coefficient de frottement MIU est le

paramètre impactant le plus les propriétés sonores et sensorielles des bruits des étoffes. Les bruits de frottement d'une étoffe plus rugueuse auront tendance à présenter des valeurs de niveaux sonores plus importantes puisque lors de la friction des deux étoffes, le phénomène de frottement est plus conséquent. De ce fait, la perception de ces bruits sera différente, ils seront généralement perçus comme plus *abrasif*. Par exemple, il a été constaté que le bruit de frottement de l'étoffe 1 dont le coefficient de frottement est le plus important a été jugé comme le plus *abrasif*.

Au regard de cette analyse, on peut en conclure que les propriétés sonores des bruits de frottement et leur perception pourraient être modifiées en jouant sur les propriétés physiques des étoffes. Ces propriétés peuvent être modifiées par divers traitements, par exemple la méthode du grattage confère au tissu un côté plus moelleux en augmentant sa pilosité de surface ainsi les bruits de frottement seront plus importants. A l'inverse, un traitement de type silicone aura tendance à diminuer le coefficient de friction de l'étoffe facilitant le frottement entre les étoffes et par voie de conséquence les bruits de frottement.

Par rapport à l'ensemble de ces résultats, l'entretien de la surface textile et plus particulièrement le lavage a une influence sur la caractérisation instrumentale et sensorielle des bruits de frottement. Même si les étoffes présentent des caractéristiques physiques différentes, l'influence du lavage sur les propriétés sonores est plus marquée pour les dix premiers lavages. D'un point de vue sensoriel, cette influence n'est pas aussi significative car les profils sensoriels d'une même étoffe sont relativement confondus. En effet, le lavage n'entraîne pas de modifications importantes de la surface. Les échantillons issus de l'étoffe 1 sont ceux qui présentent le plus de différence avec l'étoffe brute à cause de l'enduction de surface. Ainsi, l'utilisation d'enduction serait une méthode permettant de modifier la perception des bruits de frottement des étoffes.

Chapitre IV. Etude de l'influence de l'abrasion des étoffes

La revue bibliographique (Chapitre I.) a montré que le lavage n'est pas le seul vecteur d'usure des surfaces textiles, l'abrasion par frottement joue également un rôle important. Dans le chapitre précédent, l'influence de l'entretien a été largement étudiée. Ce chapitre se concentre donc sur l'influence de l'abrasion sur les bruits de frottement des étoffes.

La structure de ce chapitre reprend celle du chapitre III. En effet, dans un premier temps, les résultats obtenus pour l'étoffe 1 seront détaillés puis l'influence de l'abrasion sur le bruit des étoffes sera évaluée. Enfin, ces résultats seront généralisés à l'ensemble des étoffes si cela est possible.

1. Etude de l'influence de l'abrasion sur l'étoffe 1

Pour cette étude comme détaillé au paragraphe 2.2 du Chapitre II., l'étoffe a été abrasée grâce à l'appareillage Martindale jusqu'à observation de la rupture de la surface textile. Les différents nombres de cycles d'abrasion subis par l'étoffe 1 sont résumés dans le Tableau 26.

Tableau 26 : Gamme des cycles d'abrasion réalisé pour cette étoffe

Echantillons	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de cycles	312	625	1 250	2 500	5 000	6 250	9 375	12 500	18 750	25 000

Pour rappel, un cycle d'abrasion équivaut aux 16 frottements abrasifs nécessaires au tracé de la courbe de Lissajous. D'après ce tableau, on constate que le nombre de cycles subis par l'étoffe est relativement important, ce qui traduit une forte résistance à l'abrasion de l'étoffe.

1.1 Caractérisation physique

Tout comme lors de l'analyse précédente, l'abrasion mécanique et répétée de la surface textile tend à en modifier sa surface et ses propriétés.

1.1.1 Analyse de la surface

Certaines observations peuvent être rapidement faites sur les échantillons obtenus après abrasion. Pour rappel, cette étoffe présente un traitement de surface imperméable.

Dans un premier temps, l'abrasion de la surface textile va dégrader l'enduction jusqu'au retrait de celle-ci, puis une pilosité superficielle va se créer par la rupture de fibres au sein de l'étoffe. Enfin, plus le textile va être abrasé plus les fibres courtes présentes en surface vont être éliminées, rendant ainsi la surface de plus en plus lisse. La Figure 79 montre l'évolution de l'état de surface des échantillons pour 0, 5 000, 9 375 et 25 000 cycles d'abrasion.

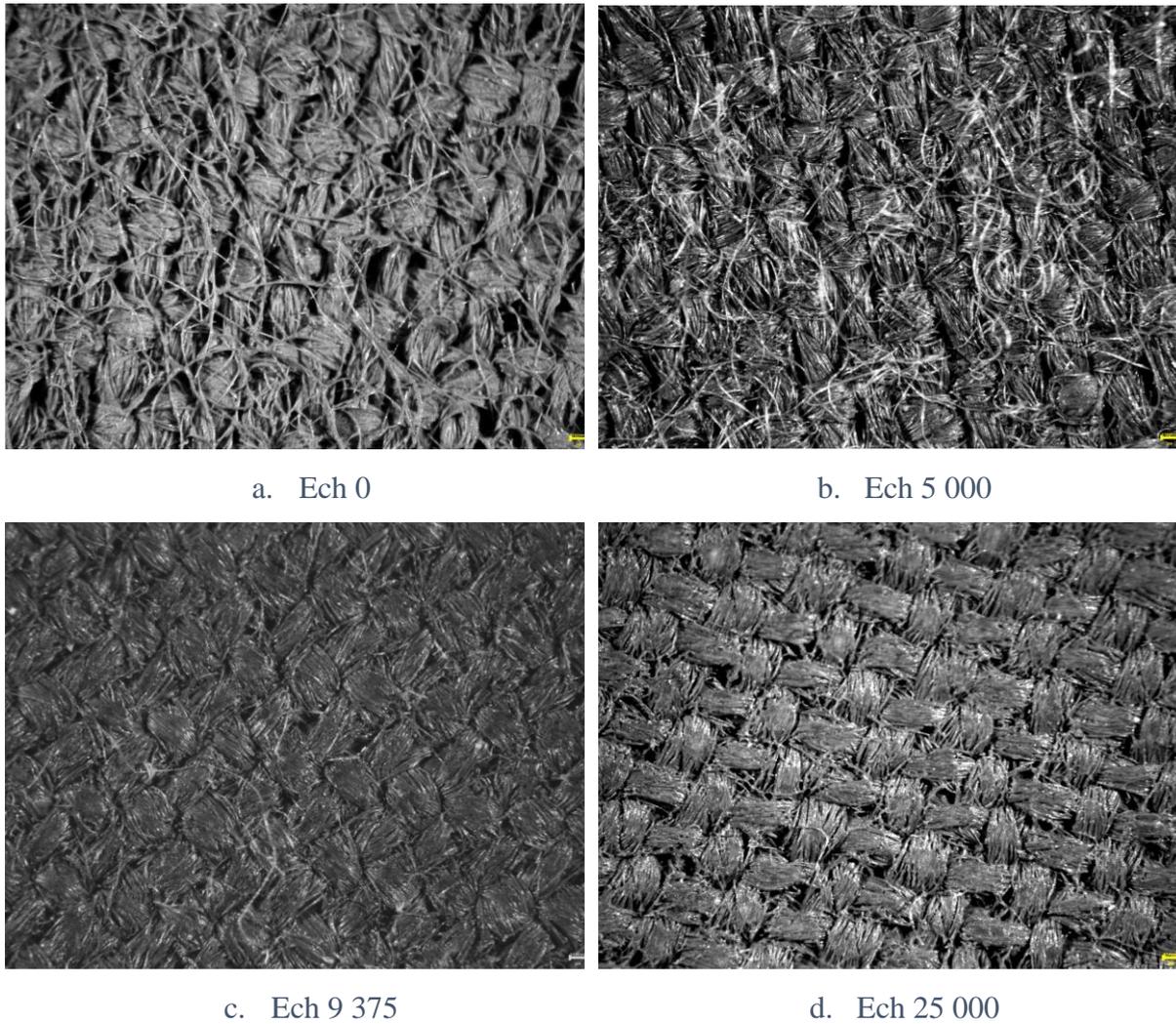


Figure 79 : Surface des échantillons observées à la loupe binoculaire

L'étoffe brute (a) présente une structure bloquée par l'enchevêtrement de nombreuses fibres en surface. De plus, celles-ci sont figées par l'enduction du tissu. Après 5 000 cycles d'abrasion (b), le traitement de surface a été complètement dégradé par les frottements successifs laissant ainsi les fibres libres à la surface. L'étoffe présente alors une importante pilosité de surface. Si l'abrasion se prolonge, on constate que cette pilosité est progressivement éliminée (c) jusqu'à obtenir une surface lisse et brillante (d). Au regard de ces observations, on peut supposer que les propriétés de compression et de surface de ces échantillons vont également évoluer en fonction du nombre de cycles d'abrasion.

1.1.2 Propriétés mesurées par le KES-F

Les paramètres de compression et de surface de Kawabata ont été mesurés pour l'ensemble des échantillons. La Figure 80 présente l'évolution du comportement en compression des étoffes avec l'augmentation du nombre de cycles d'abrasion.

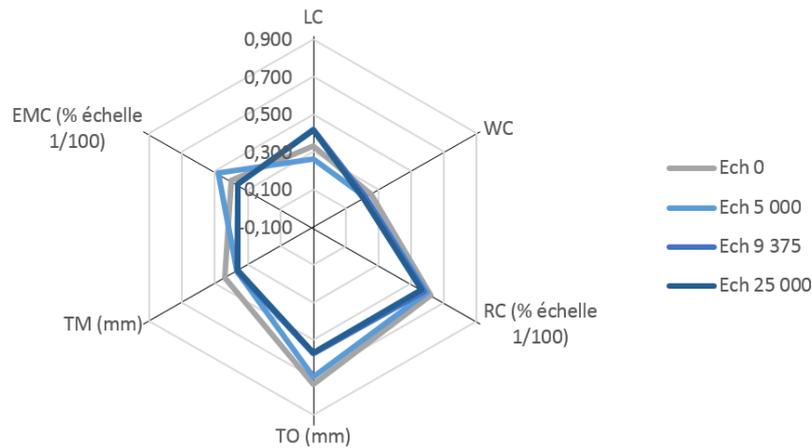


Figure 80 : Paramètres de compression des échantillons abrasés de l'étoffe 1

On peut remarquer que l'épaisseur T_0 de l'étoffe augmente puis diminue avec le nombre de cycles. L'augmentation de ce paramètre lors des premiers cycles d'abrasion est dû à l'apparition de pilosité à la surface des échantillons. Puis, comme celle-ci va progressivement être abrasée, l'épaisseur des échantillons décroît. La compressibilité de l'étoffe suit la même tendance ; en effet, plus l'étoffe est pileuse plus elle sera compressible, du fait de l'air emprisonné.

De manière similaire, les paramètres de surface sont présentés en Figure 81. Comme expliqué précédemment, la surface devient de plus en plus lisse avec l'augmentation du nombre de cycles d'abrasion, ainsi le coefficient de frottement a tendance à diminuer, à l'exception de l'Ech 5 000. Il présente en effet une forte pilosité et donc de nombreux points de contact, le coefficient MIU est de ce fait plus important. La rugosité géométrique de l'étoffe brute est deux fois supérieure à celle des autres échantillons ; cet écart peut s'expliquer par l'enduction de l'étoffe.

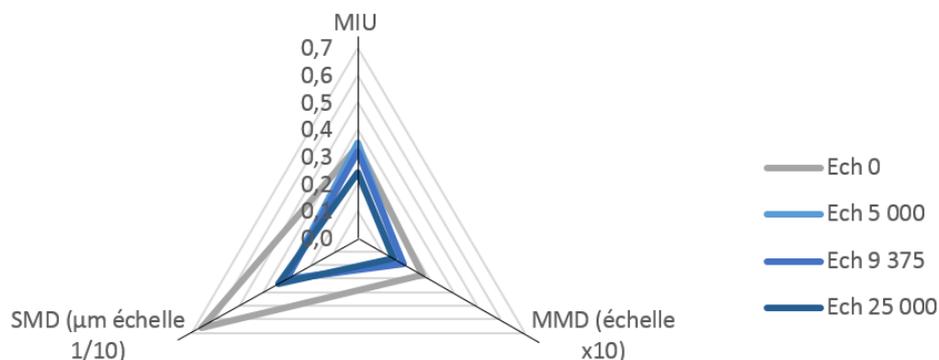


Figure 81 : Paramètres de surface des échantillons abrasés de l'étoffe 1

Après avoir décrit les propriétés des différents échantillons, leurs bruits de frottements vont être caractérisés de manière instrumentale et sensorielle.

1.2 Caractérisation sonore

De manière similaire à l'étude de l'influence du lavage, les signatures acoustiques et les spectres sonores des bruits des échantillons ont été observés.

1.2.1 Signature acoustiques des échantillons

Les signatures acoustiques des échantillons Ech 0, ech 5 000 et Ech 25 000 sont présentées Figure 82.

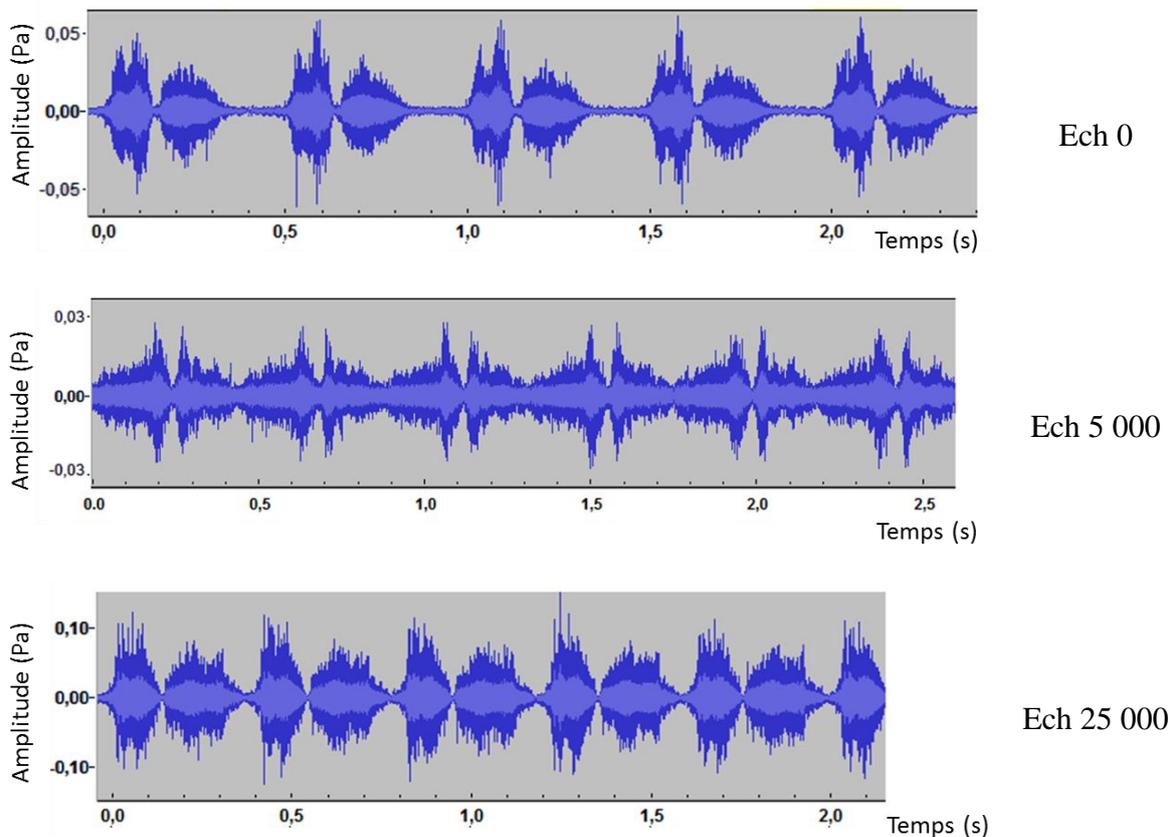


Figure 82 : Signatures acoustiques des échantillons de l'étoffe 1

La Figure 82 indique que la signature acoustique des bruits est affectée par une abrasion prolongée de la surface. L'échantillon abrasé pendant 25 000 cycles présente une amplitude de pression acoustique plus faible que les deux autres. Ces différences d'amplitude vont nécessairement affecter les niveaux sonores et les perceptions de ces bruits de frottements.

1.2.2 Analyse des signaux sonores

A partir de ces signatures acoustiques, les spectres des signaux sonores ont été déterminés. Pour plus de lisibilité des résultats, seule la représentation en 1/6 d'octave des spectres est présentée Figure 83.

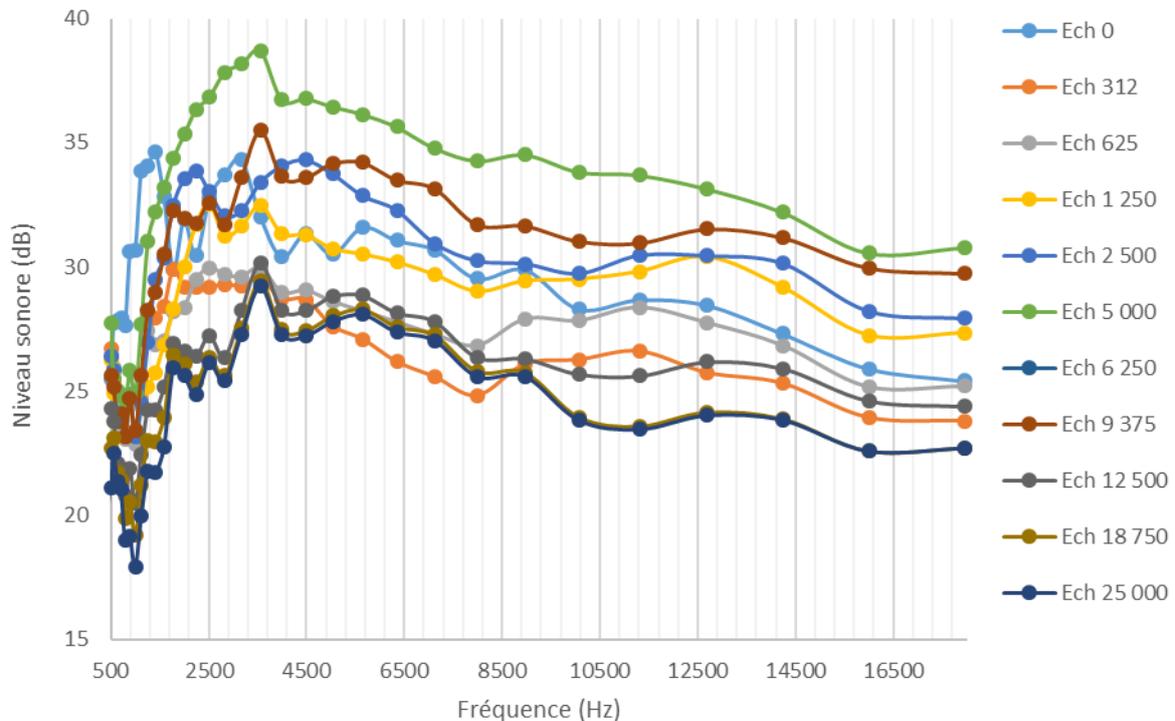


Figure 83 : Analyse en 1/6 d'octave des échantillons de l'étoffe 1

D'après la figure, une évolution des niveaux sonores avec l'augmentation des cycles d'abrasion est constatée. On remarque que contrairement au lavage, ce changement est continu tout au long de l'abrasion.

On peut remarquer que la courbe d'amplitude la plus importante est celle de l'échantillon Ech 5 000. En effet, à partir de 1 500 Hz les bandes de fréquences présentent des amplitudes sonores plus élevées, notamment un pic d'amplitude vers 3 500 Hz. De plus, on remarque que les courbes des échantillons Ech 18 750 et Ech 25 000 sont fortement semblables. On peut en conclure que le niveau sonore tend vers un certain palier.

Comme dans le chapitre précédent, un coefficient de variation (équation (38)) a été déterminé afin de comparer plus objectivement les courbes entre elles. Le Tableau 27 présente les différentes valeurs de ce coefficient. Elles mettent en évidence les différences entre la courbe de l'étoffe brute et celle des autres échantillons.

Tableau 27 : Coefficients de variation entre le spectre de l'étoffe brute et celui des autres échantillons

Echantillons	Ech 312	Ech 625	Ech 1 250	Ech 2 500	Ech 5 000	Ech 6 250	Ech 9 375	Ech 12 500	Ech 18 750	Ech 25 000
Δ (%)	-2,4	-0,4	1,9	7,1	15,1	12,3	6,1	-7,9	-14,9	-19,3

Les variations du coefficient Δ montrent que si l'on augmente le nombre de cycles d'abrasion, l'amplitude de la courbe diminue puis augmente avant de se stabiliser. La détermination des propriétés sonores des bruits de frottement de chaque échantillon va nous permettre de mieux caractériser les évolutions de niveaux sonores.

1.2.3 Paramètres sonores des bruits de frottements

Les propriétés sonores des bruits de frottements obtenues par calcul sont présentées dans le Tableau 28. Les paramètres déterminés sont les suivants : le niveau sonore global L_g , le maximum d'amplitude L_m et sa fréquence f_{max} correspondante, et enfin la plage d'amplitude ΔL .

Tableau 28 : Paramètres sonores des échantillons abrasés de l'étoffe 1

Echantillons	L_g (dB)	L_m (dB)	ΔL (dB)	f_{max} (Hz)
Ech 0	54,2	31,1	23,1	1080
Ech 312	53,4	22,6	30,8	1850
Ech 625	55,4	22,6	32,8	1890
Ech 1 250	57,5	25,2	32,3	1890
Ech 2 500	57,8	28,1	29,7	3350
Ech 5 000	61,6	31,4	30,2	3350
Ech 6 250	60,8	25,8	35	3050
Ech 9 375	59,5	28,3	31,2	3050
Ech 12 500	52,7	23,1	29,6	3050
Ech 18 750	44,3	22,2	22,1	3050
Ech 25 000	44,1	22	22,1	3050

a) Niveau sonore global

L'évolution du niveau sonore global des bruits de frottements des échantillons abrasés est présentée en Figure 84.

Dans un premier temps, on remarque que le niveau sonore global des bruits de frottement diminue légèrement entre les deux premiers échantillons (Ech 0 et Ech 312) ; cette diminution s'explique par l'abrasion de l'enduction. Ainsi, nous supposons que le bruit de frottement de l'échantillon Ech 0 caractérise d'autant plus le traitement de surface que l'étoffe en elle-même.

Par la suite, le niveau sonore augmente progressivement avec le nombre de cycles d'abrasion avant de diminuer jusqu'à se stabiliser. Entre les échantillons ayant subi de 312 à 5 000 cycles, une augmentation du niveau sonore de 15,4% est observée. Ces échantillons sont ceux qui présentent le plus de pilosité à leur surface et des coefficients de frottement plus importants. Enfin, la surface devenant plus lisse, les aspérités à la surface des échantillons s'estompent entraînant une diminution du niveau sonore. A partir de 20 000 cycles d'abrasion, le niveau tend vers une asymptote horizontale ($y = 44 \text{ dB}$).

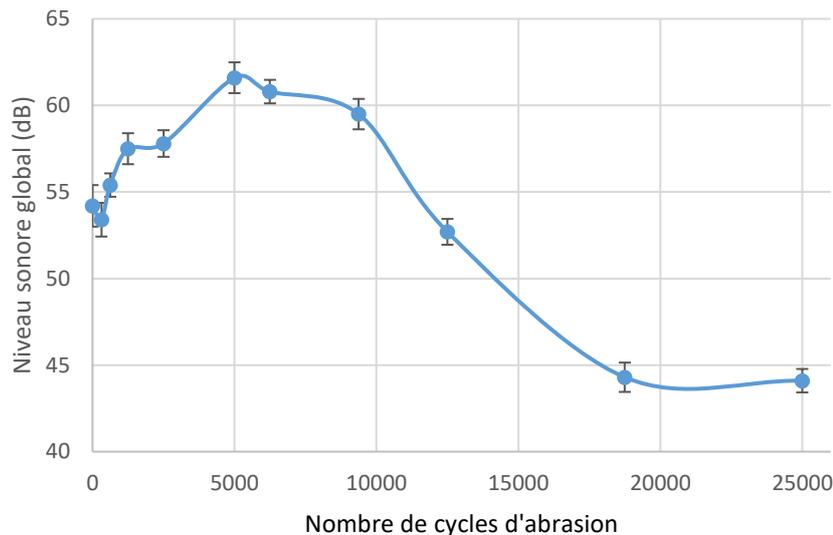


Figure 84 : Evolution du niveau sonore global des bruits de frottement de l'étoffe 1 en fonction du nombre de cycles d'abrasion

b) Plage d'amplitude

D'après le Tableau 28, on constate que l'évolution des plages d'amplitudes des bruits de frottement en fonction de l'abrasion suit la même tendance que celle du niveau sonore global. D'après ces résultats, le bruit de frottement de l'Ech 6 250 pourra être perçu comme le plus homogène car son énergie est répartie sur l'ensemble du spectre ($\Delta L=35 \text{ dB}$). Inversement, les bruits des échantillons Ech 18 750 et Ech 25 000 pourront être perçus comme plus agressifs car l'énergie est concentrée autour de l'amplitude du maximum ($\Delta L=22 \text{ dB}$).

c) Bandes passantes

Globalement, on peut constater que les bruits de frottement présentent de larges bandes de fréquences. La fréquence f_{max} a tendance à augmenter vers des fréquences plus aiguës avec le nombre de cycles d'abrasion, tout en restant dans le domaine des fréquences les plus perceptibles. Afin de mieux les visualiser, les bandes passantes de chaque échantillon sont présentées Figure 85.

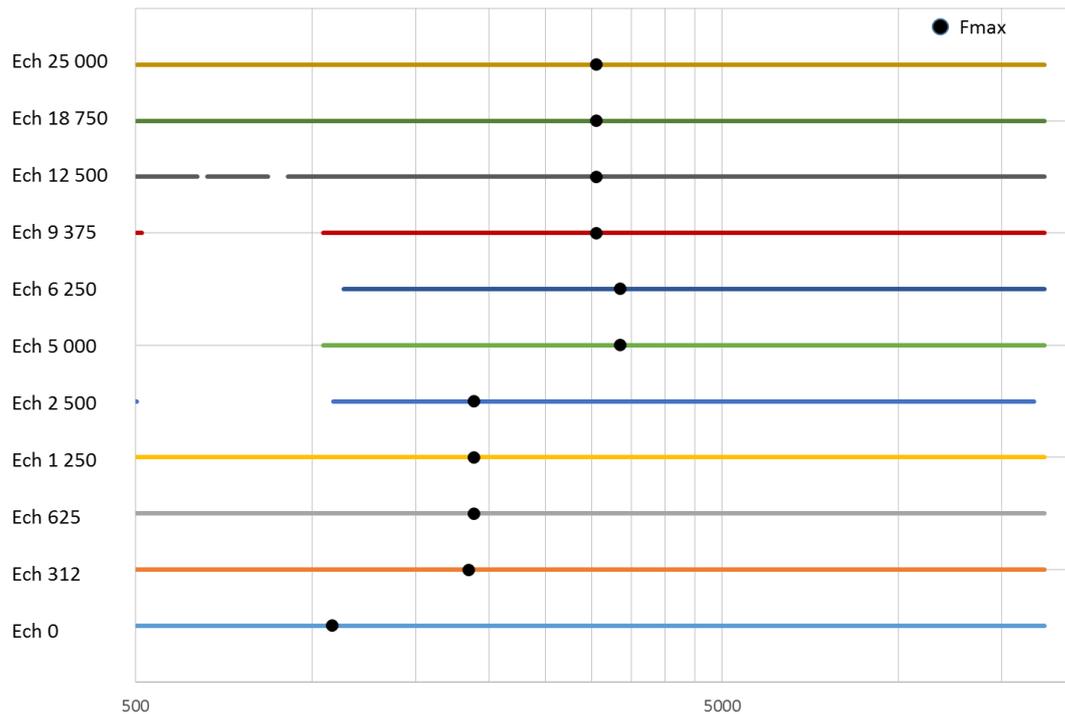


Figure 85 : Bandes passantes des échantillons abrasés (étouffe 1)

Les bandes passantes de quatre échantillons se distinguent des autres (Ech 2 500, Ech 5 000, Ech 6 250 et Ech 9 375) par une largeur plus faible. Ce résultat est cohérent avec ceux issus de la description des plages d'amplitudes. En effet, l'énergie des spectres étant plus concentrée autour du maximum d'amplitude, ces bruits ne seront pas perçus de la même manière.

1.3 Caractérisation sensorielle

Comme énoncé dans le paragraphe précédent, l'abrasion modifie les propriétés sonores des étoffes, et ce de façon significative. La caractérisation sensorielle des bruits de frottement des échantillons abrasés va permettre de mettre en évidence les différences de perception engendrées par l'abrasion de la surface. Pour plus de lisibilité des résultats, une seule partie des profils sensoriels est présentée en Figure 86.

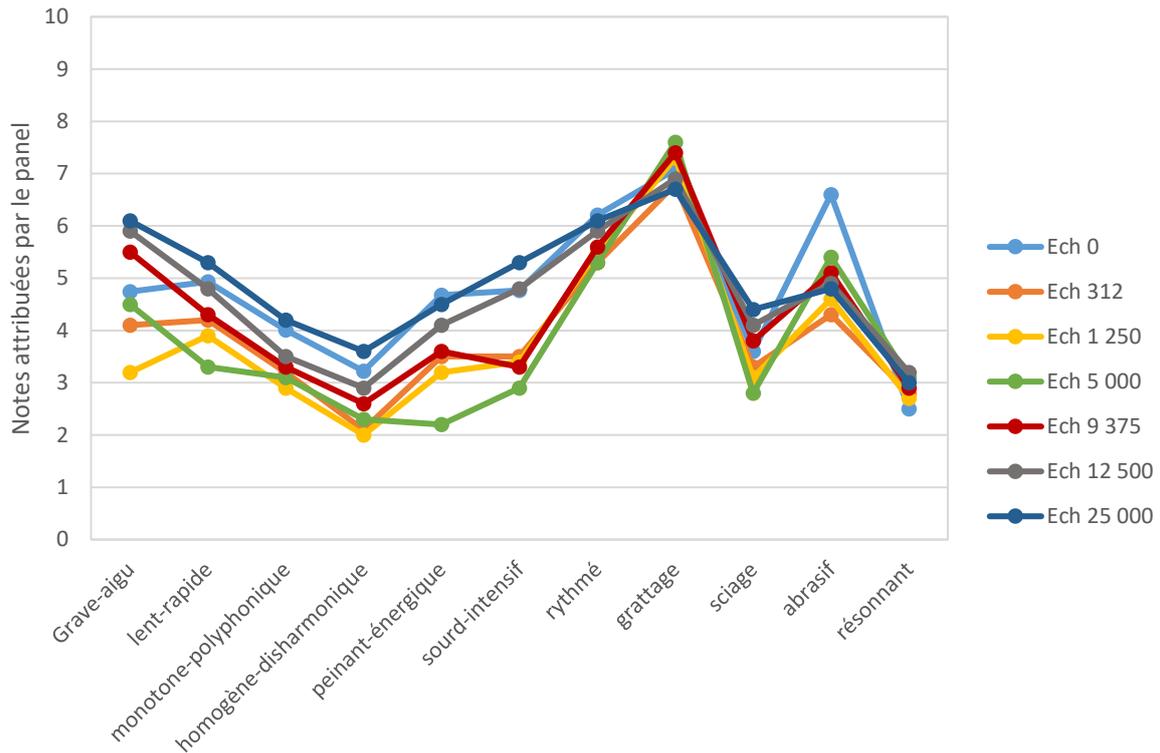


Figure 86 : Caractérisation sensorielle des échantillons abrasés (étouffe 1)

D'après la figure, une évolution des profils sensoriels est constatée avec l'augmentation du nombre de cycles d'abrasion. Certains descripteurs présentent des différences de perception plus importantes (*grave-aigu* de 3,2 à 6,1, *peinant-énergique* de 2,2 à 4,7 ou encore *abrasif* de 4,6 à 6,6). Inversement, l'usure apporte peu de différences de perception pour les critères *grattant* et *résonnant*.

L'évaluation de l'homogénéité des bruits est en accord avec l'analyse des plages d'amplitudes, les bruits perçus comme les plus homogènes sont ceux qui présentent un plage d'amplitude plus grande. Le panel a permis de mettre en évidence certaines concordances entre les descripteurs, par exemple, un bruit *rapide* est perçu comme plus *sciant* alors qu'un bruit *lent* est qualifié de bruit *sourd*.

1.4 Analyse des corrélations par Analyse en Composantes Principales

Après la caractérisation physique des échantillons et la caractérisation instrumentale et sensorielle des bruits de frottement, des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées afin de mettre en évidence les corrélations existantes. Ces ACP ont été faites de façon analogue à celles menées au chapitre précédent. Seules les corrélations dont le coefficient de Pearson (n) est supérieur à 0,8 ont été prises en compte dans nos conclusions. Le cercle de

corrélations déterminé par cette étude dans l'espace vectoriel (F1, F2) présentant plus de 70% de l'information est présenté Figure 87.

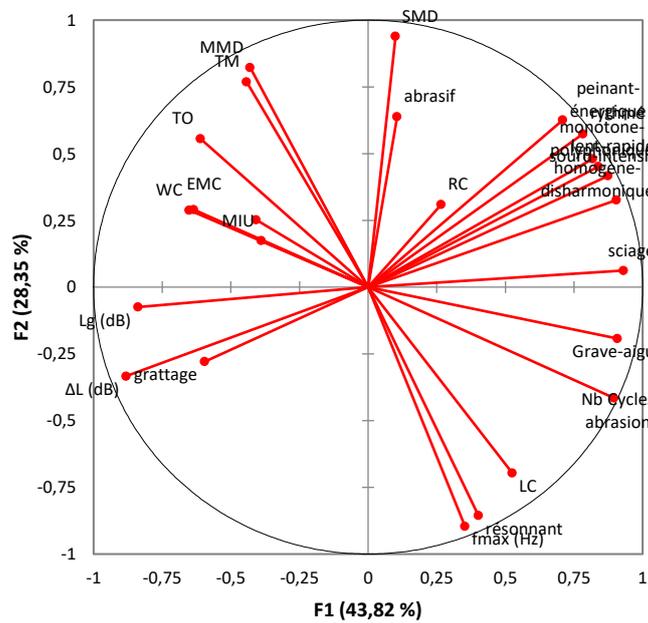


Figure 87 : Cercle de corrélation déterminé par ACP

D'après la figure, on constate que plusieurs descripteurs sensoriels sont fortement corrélés entre eux comme certains paramètres de compression ainsi le nombre de variables représenté sur ce cercle peut être réduit en veillant à choisir les paramètres présentant les corrélations les plus élevées avec les axes F1 et F2. Ainsi un nouveau cercle de corrélation peut être obtenu, celui-ci est présenté en Figure 88.

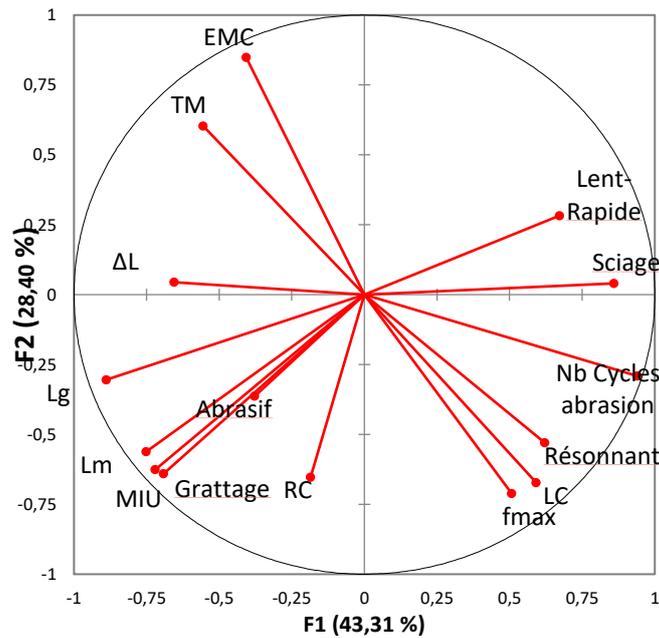


Figure 88 : Cercle de corrélations après réduction du nombre de variables

D'après le cercle de corrélations, le niveau sonore global est lié au coefficient de frottement MIU ; celui-ci ayant une incidence directe sur la perception des descripteurs *grattant* et *abrasif* des bruits de frottement. Les paramètres de compression présentent également des corrélations avec certains des descripteurs sensoriels, comme l'épaisseur T_0 et le terme *grave-aigu* ; les bruits de friction d'une étoffe d'épaisseur plus faible seront perçus comme plus aigus.

Tout comme dans l'étude sur le lavage, la pilosité semble être un facteur important pour la caractérisation et la perception des bruits. Contrairement à ce qui avait été observé dans cette étude, la valeur de la fréquence du maximum d'amplitude affecte l'évaluation du critère *résonnant* des bruits. De nombreuses corrélations entre les descripteurs sensoriels ont également été obtenues. Ainsi, par exemple, un bruit perçu comme *lent* aura tendance à être aussi décrit comme *monotone* et *peinant*. Un bruit *aigu* sera perçu comme *sciante* alors que les bruits qualifiés de *grave* seront eux évalués comme plus *grattant*.

Il nous est possible de comparer les échantillons entre eux à partir de l'espace vectoriel défini précédemment, la carte de l'espace produit ainsi obtenue est présentée en Figure 89.

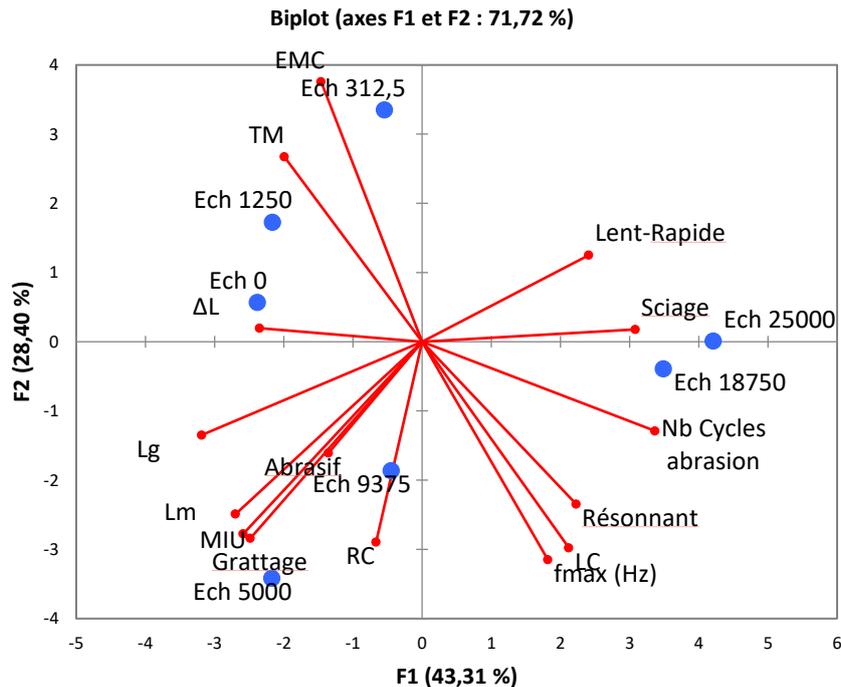


Figure 89 : Espace produit des échantillons abrasés de l'étoffe 1

D'après celle-ci, on observe différents regroupements des échantillons notamment une forte ressemblance des échantillons ayant été soumis à 18 750 et 25 000 cycles d'abrasion, ce qui confirme les résultats obtenus en terme de perception sensorielle mais également de caractérisation instrumentale sonore.

1.5 Comparaison de l'influence du lavage et de l'abrasion sur les bruits de frottement de l'étoffe 1

L'étude de l'influence du lavage et de l'abrasion sur les bruits de frottement ayant été réalisée pour cette étoffe, une comparaison entre ces deux vecteurs d'usure peut être faite.

Dans un premier temps, les propriétés de compression et de surface ont été mesurées. Les résultats ont montré que le lavage induit moins de variations de ces propriétés que l'abrasion. En effet, les sollicitations mécaniques exercées sur l'étoffe lors du lavage sont plus faibles que lors de l'abrasion. Les sollicitations induites par le lavage et l'abrasion étant différentes, l'état de surface des étoffes n'est pas modifié de la même manière. Ce changement est d'autant plus important que le nombre de cycles d'abrasion augmente. Ainsi en terme de caractérisation sonore des bruits, on constate que le niveau sonore global des bruits de frottement n'évolue pas de façon similaire dans les deux études. En effet, le lavage a tendance à diminuer le niveau sonore alors que l'abrasion tend à l'accroître puis à le diminuer. En terme de caractérisation sensorielle, les panélistes arrivent à mieux différencier les échantillons abrasés que les

échantillons lavés. Cette différenciation peut s'expliquer par le passage d'une surface pileuse à une surface plus lisse et présentant moins d'aspérités.

En conséquence, même si la matière et la structure de l'étoffe jouent un rôle important dans la caractérisation des bruits de frottement, l'état de surface de celle-ci affecte significativement leur perception et leurs propriétés sonores. La pilosité de la surface semble être un des facteurs les plus importants.

2. Etude sur l'ensemble du panel d'étoffe

La caractérisation physique des étoffes ayant déjà décrite dans le chapitre précédent, seules les caractérisations sonores, sensorielles et l'étude des corrélations entre les paramètres sont abordées dans cette partie.

2.1 Caractérisation sonore

Comme vu précédemment et ce pour chacune des étoffes, le niveau sonore global des bruits de frottement a été déterminé en fonction du nombre de cycles d'abrasion (Figure 90). L'analyse en 1/6 d'octave des bruits des échantillons abrasés de l'ensemble des échantillons testés est présentée en Annexe E.

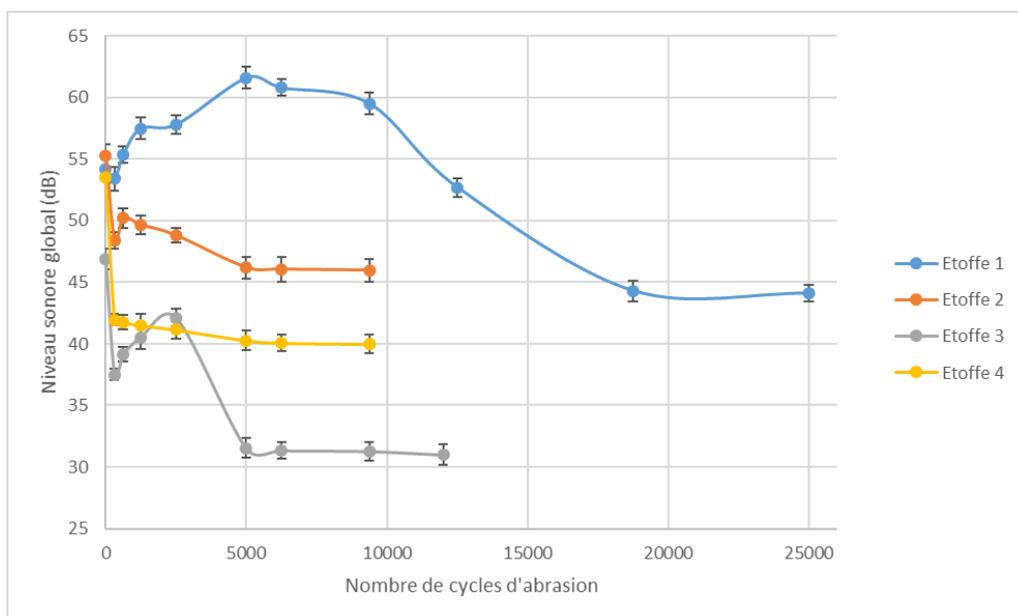


Figure 90 : Evolution de L_g en fonction du nombre de cycles d'abrasion

Dans un premier temps, on constate que le nombre de cycles n'est pas le même pour toutes les étoffes puisque leur résistance à l'abrasion n'est pas identique. Même si le niveau sonore global présente des phases de croissance et de décroissance, on observe que ce paramètre a tendance

à devenir constant au bout d'un grand nombre de cycles d'abrasion. Pour chacune des étoffes, le niveau sonore final atteint est plus faible que la valeur du niveau initial. Ainsi, le coefficient de variation Δ de ce niveau peut être calculé pour chaque tissu (Tableau 29).

Tableau 29 : Variation du niveau sonore global de chaque étoffe

Etoffe n°	1	2	3	4
Coefficient de variation Δ (%)	-18,6	-16,5	-33,3	-25,3

En comparaison avec l'étude précédente, les valeurs du coefficient de variation sont plus élevées. Ainsi, l'influence de l'abrasion sur le niveau sonore des bruits de frottement est plus importante que celle de l'entretien des étoffes. Les bruits des étoffes 1, 2 et 3 présentent une évolution similaire avec une phase de croissance de leur niveau sonore global avant que celui-ci ne diminue pour ensuite se stabiliser. L'étoffe 4 présente une rapide décroissance du niveau sonore puis le niveau reste relativement constant. Une correspondance entre les zones de croissance du niveau sonore et une augmentation de la pilosité superficielle des étoffes a pu être observée.

2.2 Caractérisation sensorielle

Par la suite, il a été demandé aux panélistes de caractériser les bruits de frottement de l'ensemble des échantillons abrasés. L'ensemble des profils des différentes étoffes est regroupé en Annexe F.

Les différences de perception entre les échantillons sont plus nettes que pour l'étude de l'influence du lavage. Cependant, lorsque le niveau sonore se stabilise, les panélistes éprouvent des difficultés à différencier les bruits de manière significative et par voie de conséquence, les profils se superposent.

Certains descripteurs sont fortement dépendants, par exemple les bruits de frottement perçus comme *aigu* sont aussi plus *sciant* et *rapide*. Une partie de ces liens entre descripteurs sensoriels confirme les résultats mis en avant lors des travaux de Yosouf [7]. En effet, il a montré qu'un bruit *monotone* avait tendance à être aussi perçu comme *homogène*, qu'un bruit *lent* est plutôt perçu comme *sourd* et plus *sciant* que *grattant*.

2.3 Analyses en Composantes Principales

De façon similaire au chapitre précédent, une analyse des corrélations a été effectuée pour chacune des étoffes et les principaux résultats sont synthétisés au sein de ce paragraphe dans le Tableau 30. Pour rappel, un code couleur a été attribué à chaque étoffe et les cases pleines indiquent qu'il existe au moins une corrélation (positive ou négative) entre le paramètre i et la catégorie de propriétés j .

Tableau 30 : Synthèse des corrélations dans le cadre de l'abrasion

■ Etoffe 1
 ■ Etoffe 2
 ■ Etoffe 3
 ■ Etoffe 4

Paramètres Propriétés	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	Lg	ΔL	f_{max}		
Compression																
Surface																
Sonore																
Sensorielle																

D1 : Grave-aigu, D2 : Lent-rapide, D3 : Monotone-polyphonique, D4 : Homogène-disharmonique, D5 : Peinant-énergique, D6 : Sourd-intensif, D7 : Rythmé, D8 : Grattage, D9 : Sciage, D10 : Abrasif, D11 : Résonnant

De par les différences de structures et l'évolution de propriétés physiques des étoffes avec l'abrasion de leur surface, on observe que les corrélations existantes ne sont pas nécessairement les mêmes pour chacune des étoffes. D'après le tableau, on remarque que le descripteur *abrasif* est fortement corrélé aux propriétés de compression des étoffes ainsi qu'aux paramètres de surface à l'exception de l'étoffe 3. De façon similaire à l'étude de l'influence du lavage, le niveau sonore global des bruits de frottement est directement lié aux propriétés de compression, de surface et aux descripteurs sensoriels. En effet, la valeur de niveau sonore affecte de façon évidente les perceptions des bruits de friction par les panélistes.

En comparaison avec les résultats du chapitre précédent, on ne retrouve pas exactement les mêmes corrélations. Ces disparités s'expliquent par les différences de sollicitations mécaniques et les évolutions des paramètres physiques des étoffes. Cependant, ces analyses en composantes principales confirment l'influence des propriétés de surface et de compression sur les bruits de frottement et leur perception. De plus, malgré ces différences, l'importance de la pilosité est de

nouveau mise en avant puisque l'on retrouve le lien entre le niveau sonore global des échantillons et les propriétés de compression (notamment la résilience en compression et l'épaisseur du tissu).

3. Conclusions

Au regard de l'ensemble de ces résultats, nous pouvons conclure que l'influence de l'abrasion sur les bruits de frottement est plus significative que l'influence des lavages successifs, que ce soit en terme de caractérisation sonore ou sensorielle. Cette différence d'influence est due aux différences de sollicitations mécaniques subies par les étoffes durant le lavage et l'abrasion. L'évolution des caractéristiques physiques des étoffes (propriétés de compression et de surface) en fonction du nombre de lavages ou d'abrasion reflètent cette disparité de sollicitations. On observe alors que lorsque l'état de surface des étoffes ne varie plus de façon significative, le niveau sonore global des bruits de frottement tend à se stabiliser.

De manière générale, les résultats ont démontré que les panélistes sont capables de correctement différencier deux bruits de frottement issus de deux textiles différents mais qu'ils éprouvent des difficultés à discriminer deux bruits issus du même tissu mais d'états de surface dissemblables. Seule une importante modification de l'état de surface permet aux panélistes de les identifier. Parmi les onze descripteurs, plusieurs d'entre eux sont corrélés comme par exemple *monotone* et *homogène*, *intensif* et *rapide* ou encore *aigu* et *sciant*. De plus, les paramètres sonores et les descripteurs sensoriels sont également liés. Ainsi un bruit de friction présentant une large bande d'amplitude sera perçu comme plus *homogène*.

Les analyses statistiques ont permis de mettre en évidence des corrélations pour chacune des étoffes mais les paramètres qui influencent le plus les bruits de frottement sont la résilience en compression, l'épaisseur du tissu et le coefficient de frottement. Selon les valeurs de ces paramètres, le niveau sonore des bruits de friction et leurs perceptions ne seront pas identiques.

Ces paramètres sont en lien direct avec la pilosité des étoffes et ces études ont mis en avant l'influence de cette pilosité superficielle sur ces bruits de frottement. En effet, celle-ci peut jouer le rôle d'amplificateur ou de réducteur de bruit. Si la pilosité d'une surface devient plus importante, les points de contact et le frottement augmentent, amplifiant ainsi les bruits de friction. A l'inverse, une diminution de la pilosité tend à décroître le niveau sonore puisque les aspérités en surface s'estompent. Ainsi, l'ensemble de ces résultats tend à montrer que selon la longueur des fibres libres en surface du tissu, les bruits de frottement et leur perception ne seront pas identiques.

La pilosité des surfaces textiles peut être modifiée par l'intermédiaire d'apprêts mécaniques, comme par exemple la méthode de grattage, ou d'apprêts chimiques tels que des traitements adoucissants. Ces apprêts seraient donc des méthodes permettant de modifier les bruits de frottement des étoffes.

Conclusions et Perspectives

L'objectif principal de cette étude était d'analyser l'influence de l'usure, que ce soit par abrasion ou par lavage, sur les bruits de frottement d'étoffes représentatives des tissus militaires.

Ces travaux ont permis de caractériser les bruits de frottement des étoffes par deux approches différentes : une caractérisation instrumentale puis une caractérisation sensorielle. La caractérisation physique des bruits de frottement a été définie par des paramètres physiques notamment le niveau sonore global. Dans un deuxième temps, l'analyse sensorielle de ces bruits, à travers une analyse descriptive quantitative, a été réalisée par un panel entraîné. Ces deux approches ont permis d'étudier l'influence de l'usure des étoffes sur les bruits de frottement générés lorsqu'une personne se déplace. Enfin, plusieurs Analyses en Composantes Principales ont permis de synthétiser les corrélations entre les propriétés sonores, sensorielles et physiques (compression et état de surface) des tissus (mesurées par la chaîne de mesure Kawabata).

La première partie de ce travail a consisté à déterminer l'ensemble des paramètres expérimentaux nécessaires à la génération et à la caractérisation des bruits. Le dispositif expérimental développé au sein de notre laboratoire dans une précédente étude a été amélioré. Ainsi, une épaisseur de silicone a été ajoutée sur le porte-échantillon mobile, de même qu'un capot autour du moteur, dans l'optique de réduire les bruits parasites liés à sa rotation. Ces modifications ont nécessité un nouvel étalonnage du dispositif avant de pouvoir générer et enregistrer les bruits qui nous intéressaient. Concernant l'analyse sensorielle, l'analyse descriptive quantitative a été mise en œuvre. Pour cela, en premier lieu, l'acuité auditive des panélistes recrutés a été vérifiée par l'intermédiaire du test de Békésy. Puis un nouvel entraînement ainsi qu'un contrôle des performances des panélistes en termes de répétabilité, de pouvoir de discrimination et d'homogénéité des réponses a été réalisé en raison de la longue période séparant cette étude de la précédente.

A la suite de cette phase d'entraînement, les panélistes ont été capables d'évaluer les bruits de frottement selon une liste de onze descripteurs (*grave-aigu, lent-rapide, monotone-polyphonique, homogène-disharmonique, peinant-énergique, sourd-intensif, rythmé, grattant, sciant, abrasif et résonnant*).

Les essais expérimentaux ont été divisés en deux parties distinctes : l'étude de l'influence de l'entretien des étoffes puis celle de l'abrasion sur les bruits de frottements. Pour cela, quatre étoffes représentatives des tissus militaires ont été sélectionnées, et à partir de celles-ci deux

jeux d'échantillons par étoffe ont été obtenus. Le premier a consisté à laver de 0 à 50 fois les tissus, le deuxième à abraser la surface jusqu'à la rupture. Pour chacun de ces échantillons, une caractérisation sonore, sensorielle et mécanique a été réalisée.

Ces différentes caractérisations ont permis de mettre en évidence l'influence de l'entretien et de l'abrasion sur les bruits de friction des étoffes, en effet, l'évolution du niveau sonore global n'est pas identique pour ces deux vecteurs d'usure. Ainsi le lavage a tendance à diminuer le niveau sonore des bruits alors que celui-ci a tendance à croître puis à diminuer avec l'abrasion de la surface. Cependant, cette évolution du niveau sonore est fortement liée à la pilosité de surface des étoffes, ainsi une augmentation de pilosité superficielle aura tendance à accroître le niveau sonore de ces bruits de frottements. Ainsi le niveau sonore des bruits de friction varie en fonction de la longueur des fibres libres en surface des étoffes.

La caractérisation sensorielle des échantillons a permis de constater dans un premier temps que les panélistes différencient plus facilement et de façon significative deux bruits générés par deux étoffes différentes. De plus, les différences de perception entre les échantillons sont plus nettes pour l'étude de l'influence de l'abrasion que celle du lavage, ces différences s'expliquent par de plus grande disparités des propriétés de compression et de surface. Cependant, nous avons remarqué que lorsque le niveau sonore se stabilise, les panélistes éprouvent des difficultés à différencier les bruits de manière significative et par voie de conséquence, les profils se superposent.

Enfin, les analyses statistiques ont permis de mettre en évidence des relations entre les différents paramètres. Ainsi, l'importance de la pilosité superficielle des étoffes a été mise en évidence par les corrélations déterminées par Analyses en Composantes Principales (ACP). En effet, de manière générale la résilience en compression, l'épaisseur de l'étoffe et son coefficient de frottement sont les paramètres qui affectent le plus les propriétés sonores et sensorielles des bruits des étoffes. De plus, des relations entre les paramètres sonores et les descripteurs sensoriels ont également été prouvées, ainsi un bruit de friction présentant une large bande d'amplitude sera perçu comme plus *homogène*.

Ces analyses ont également permis de montrer que parmi les onze descripteurs il existe des corrélations entre certains descripteurs. En effet, les descripteurs *monotone* et *homogène* sont liés tout comme les descripteurs *intensif* et *rapide* ou encore *aigu* et *sciant*.

De nombreuses perspectives peuvent être envisagées pour la suite de cette étude que ce soit concernant le dispositif permettant de générer et d'enregistrer les bruits de frottement ou le panel sensoriel.

Au cours de ces travaux, l'abrasion et l'entretien des étoffes ont été traitées séparément. Cette étude, en deux blocs distincts, ne correspond pas aux conditions réelles d'usage d'un treillis où abrasion et entretien sont régulièrement alternés. De ce fait, on pourrait envisager une étude simultanée de ces deux facteurs d'usure afin de constater leur influence sur les bruits de frottement.

Ce travail nous a permis de mettre en évidence la forte influence des propriétés de compression et de surface des étoffes sur les bruits de frottement, il serait donc intéressant d'envisager de traiter la surface textile avec différents traitements mécaniques ou chimiques. Les traitements mécaniques tels que le grattage ou l'émerisage et les enductions superficielles comme les traitements silicone ou adoucissants modifient les propriétés de compression et de surface des étoffes ainsi que leur pilosité. Ces changements de propriétés pourraient avoir un impact sur les bruits de frottement. De plus, ces traitements étant sensibles à l'usure, que ce soit l'abrasion ou l'entretien, une étude de l'usure en parallèle pourrait être intéressante.

L'usure de l'étoffe, tout comme l'addition d'un traitement de surface modifie également le toucher de la surface textile. De ce fait, l'étude sensorielle sonore pourrait être croisée à une étude sensorielle tactile afin de mettre en évidence les différentes influences et/ou liens.

Concernant l'évaluation des bruits de friction par le panel, suite aux discussions menées avec les panélistes au cours des séances, l'idée d'utiliser une échelle structurée, avec par exemple cinq intervalles, a été émise. En effet, les panélistes arrivent à bien différencier les bruits de deux étoffes différentes mais lorsqu'il s'agit de la même étoffe usée, ils éprouvent plus de difficultés. Une échelle structurée permettrait peut-être de simplifier l'évaluation et de mettre en avant les différences entre traitements.

De plus, ces différentes études ayant permis d'obtenir de très nombreuses données, on pourrait envisager d'utiliser des réseaux de neurones afin d'analyser et de modéliser les relations entre l'ensemble de ces données. Une méthode d'évaluation du niveau d'usure des tenues militaires par le biais d'une mesure acoustique pourrait ainsi être définie et utilisée afin de savoir quand remplacer les tenues.

Enfin, cette étude se concentre sur les bruits de frottements générés par le mouvement du bras lors de la marche mais le mouvement des jambes provoque également l'émission de bruit. De ce fait, une étude similaire pourrait être menée afin de déterminer la vitesse du mouvement et la surface de frottement de cet endroit spécifique. Le bras mécanique du dispositif expérimental pourrait ainsi être adapté à ce mouvement afin de caractériser les bruits de frottement générés par le frottement dans cette zone. La somme de ces deux études permettrait de déterminer le niveau sonore global émis par une personne lorsqu'elle est en mouvement et permettrait soit de réduire l'émission de bruit soit de modifier cette dernière.

Bibliographie

- [1] NF G00-001, « Textiles - Dictionnaire des termes normalisés ». AFNOR, 1985.
- [2] NF S30-101, « Vocabulaire de l'acoustique - Définitions générales ». AFNOR, 1973.
- [3] NF S30-105, « Vocabulaire de l'acoustique - Acoustique physiologique et psychoacoustique ». AFNOR, 1975.
- [4] NF S30-107, « Vocabulaire de l'acoustique - Acoustique musicale ». AFNOR.
- [5] Eunjou Yi et G. Cho, « Fabric Sound Parameters and Their Relationship with Mechanical Properties », *Text. Res. J.*, vol. 70, n° 9, p. 828-836, sept. 2000.
- [6] H. Latroch, « Contribution au développement de nouveaux outils de caractérisation mécanique des étoffes, contribution à l'étude et à la caractérisation de la signature sonore du frottement des étoffes », Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, Mulhouse, 2013.
- [7] K. Yosouf, « Contribution à la caractérisation du bruit de frottement des étoffes : application au Prêt-à-porter », Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, Mulhouse, 2016.
- [8] F. P. Bowden, F. P. Bowden, et D. Tabor, *The Friction and Lubrication of Solids*. Clarendon Press, 2001.
- [9] S. Nowrouzieh, A. Sinoimeri, J.-Y. Drean, R. Frydrych, et J.-P. Gourlot, « Inter Fiber Frictional Model », *Res. J. Text. Appar.*, vol. 11, n° 4, p. 64-70, nov. 2007.
- [10] S. Das, S. Jagan, A. Shaw, et A. Pal, « Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact », *Compos. Struct.*, vol. 120, p. 129-140, févr. 2015.
- [11] B. S. Gupta, *Friction in Textile Materials*. Elsevier Science, 2008.
- [12] S. S. Ramkumar *et al.*, « Experimental verification of failure of Amontons' law in polymeric textiles », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 91, n° 6, p. 3879-3885, mars 2004.
- [13] D. Wilson, « A study of fabric-on-fabric dynamic friction », *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 54, n° 4, p. T143-T155, avr. 1963.
- [14] D. Hermann, S. S. Ramkumar, P. Seshaiyer, et S. Parameswaran, « Frictional study of woven fabrics: The relationship between the friction and velocity of testing », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 92, n° 4, p. 2420-2424, mai 2004.
- [15] J. O. Ajayi, « Fabric Smoothness, Friction, and Handle », *Text. Res. J.*, vol. 62, n° 1, p. 52-59, janv. 1992.
- [16] R. R. Van Amber, B. J. Lowe, B. E. Niven, R. M. Laing, C. A. Wilson, et S. Collie, « The effect of fiber type, yarn structure and fabric structure on the frictional characteristics of sock fabrics », *Text. Res. J.*, vol. 85, n° 2, p. 115-127, janv. 2015.
- [17] T. Nishimatsu et T. Sawaki, « Study on Pile Fabrics Part 4: Investigation of Factors Affecting Frictional Properties of Pile Fabrics », *J. Text. Mach. Soc. Jpn.*, vol. 30, p. 100-106, 1984.
- [18] C. J. Cooper, « Acoustics and friction of apparel and model fabrics, and consumer perceptions of fabric sounds », Université de Birmingham, Birmingham, 2013.
- [19] W. J. Thorsen et P. Veneklasen, « The Spectral Distribution of Sound Produced by Fibers and Fabrics in Friction Part I: Improved Instrumentation », p. 6.
- [20] W. J. Thorsen, « The Spectral Distribution of Sound Produced by Fibers and Fabrics in Friction », p. 7.
- [21] M. Fujimoto, « Measurement of rustling sounds of silk and polyester fabrics ». Sen-Kikai Gakkaishi, 1986.
- [22] M. Fukuhara, « Innovation in Polyester Fibers: From Silk-Like to New Polyester », *Text. Res. J.*, vol. 63, n° 7, p. 387-391, juill. 1993.
- [23] S. Kawabata, « The Standardization and Analysis of Hand Evaluation ».
- [24] C. Kim, G. Cho, H. Yoon, et S. Park, « Characteristics of Rustling Sounds Created by the Structure of Polyester Warp Knitted Fabrics », *Text. Res. J.*, vol. 73, n° 8, p. 685-691, août 2003.
- [25] S. Cho, G. Cho, et C. Kim, « Fabric Sound Depends on Fiber and Stitch Types in Weft Knitted Fabrics », *Text. Res. J.*, vol. 79, n° 8, p. 761-767, mai 2009.

- [26] G. Cho, N. Lim, et Y. Yang, « Integrated graphical presentation of fabric sound and mechanical properties », *Fibers Polym.*, vol. 11, n° 3, p. 516-520, juin 2010.
- [27] K. Yosouf, A. Shafi, L. Schacher, et D. C. Adolphe, « Magic world of textiles : ITC&DC, 6th International Textile, Clothing & Design Conference, October 7th to October 10th, 2012, Dubrovnik, Croatia ; book of proceedings », Dubrovnik, 2012, p. 424-429.
- [28] A. M. Manich, M. D. de Castellar, R. M. Saurí, R. A. L. Miguel, et A. Barella, « Abrasion Kinetics of Wool and Blended Fabrics », *Text. Res. J.*, vol. 71, n° 6, p. 469-474, juin 2001.
- [29] B. J. Collier et H. H. Epps, *Textile Testing and Analysis*. Prentice Hall, 1998.
- [30] M.-A. Bueno, « Tribologie des textiles - Frottement, usure et propriétés mécaniques », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux et tribologie*, p. 30, 2015.
- [31] M. Akgun, « Surface roughness properties of polyester woven fabrics after abrasion », *J. Text. Inst.*, vol. 105, n° 4, p. 383-391, avr. 2014.
- [32] M. Akgun, B. Becerir, et H. R. Alpay, « Investigation of the relation between surface roughness and friction properties of polyester fabrics after abrasion », *J. Text. Inst.*, vol. 109, n° 3, p. 322-337, mars 2018.
- [33] N. Özdiñl, A. Marmarali, et N. Ođlakciođlu, « The abrasion resistance of socks », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 21, n° 1, p. 56-63, janv. 2009.
- [34] R. Miguel, J. Lucas, L. Carvalho, M. Santos Silva, et A. Manich, « Garment abrasion strength evaluation: a comparative methods study », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 19, n° 3/4, p. 194-203, mai 2007.
- [35] G. Agarwal, L. Koehl, et A. Perwvelz, « Simultaneous influence of ageing and softener on mechanical properties of knitted textiles during life cycle of garment », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 23, n° 2/3, p. 152-169, juin 2011.
- [36] G. Agarwal, L. Koehl, et A. Perwuelz, « Interaction of wash-ageing and use of fabric softener for drapeability of knitted fabrics », *Text. Res. J.*, vol. 81, n° 11, p. 1100-1112, juill. 2011.
- [37] G. Agarwal, L. Koehl, A. Perwuelz, et K. S. Lee, « Interaction of textile parameters, wash-ageing and fabric softener with mechanical properties of knitted fabrics and correlation with textile-hand. I. Interaction of textile parameters with laundry process », *Fibers Polym.*, vol. 12, n° 5, p. 670-678, août 2011.
- [38] G. Agarwal, L. Koehl, A. Perwuelz, et K. S. Lee, « Interaction of textile parameters, wash-ageing and fabric conditioner with mechanical properties and correlation with textile-hand. II. Relationship between mechanical properties and textile-hand », *Fibers Polym.*, vol. 12, n° 6, p. 795-800, sept. 2011.
- [39] N. Abdelfattah Halleb, M. Sahnoun, et M. Cheikhrouhou, « The effect of washing treatments on the sensory properties of denim fabric », *Text. Res. J.*, vol. 85, n° 2, p. 150-159, janv. 2015.
- [40] A. Goyé, « La perception auditive ». Cours d'enseignement Telecom Paris, 2002.
- [41] Paul Charlemagne, « Psychoacoustique : Mesure subjective des paramètres d'intensité, de fréquence et de temps », Université Henri Poincaré, Faculté de Pharmacie, Nancy, nov. 2010.
- [42] « Voyage au centre de l'audition », *Cochlea: Audition-Oreille-Cochlée*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.cochlea.org>.
- [43] BP X10-043, « Caractérisation sensorielle des matériaux - Recommandations pratiques pour l'analyse acoustique ». AFNOR.
- [44] « Le système auditif », *Index Santé*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.indexsante.ca/chroniques/404/le-systeme-auditif.php>.
- [45] J.-D. Bagot, *Information, sensation et perception*. Armand Colin, 1999.
- [46] E. Zwicker et R. Feldtkeller, *Psychoacoustique: l'oreille, récepteur d'information*. Masson, 1981.
- [47] NF EN 61672-1, « Electroacoustique - Sonomètres - Partie 1 : Spécifications ». AFNOR, 2003.
- [48] D. Mercier, *Le livre des techniques du son - Tome 1 - 4e édition - Notions fondamentales*. Dunod, 2010.

- [49] M. Val, *Acoustique appliquée*. Dunod, 2002.
- [50] Daniel Perrin, « Les séries de Fourier ». Cours d'enseignement.
- [51] J. W. Cooley et J. W. Tukey, « An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series », *Math. Comput.*, vol. 19, n° 90, p. 297, avr. 1965.
- [52] C. Gasquet et P. Witomski, *Analyse de Fourier et applications : Filtrage, calcul numérique et ondelettes*. Paris: Dunod, 2000.
- [53] F. de Coulon, *Théorie et traitement des signaux*. Dunod, 1984.
- [54] V. Labat et D. Daré-Emziviat, « Exploitation d'enregistrements sonores pour une sensibilisation au bruit en environnement professionnel », *J. Sur Enseign. Sci. Technol. Inf. Systèmes*, vol. 12, p. 6, juill. 2013.
- [55] NF EN ISO 5492, « Analyse sensorielle - Vocabulaire ». AFNOR, 2009.
- [56] H. Stone et J. L. Sidel, *Sensory Evaluation Practices*. Academic Press, 1993.
- [57] NF ISO 11035, « Analyse sensorielle - Recherche et sélection de descripteurs pour l'élaboration d'un profil sensoriel, par approche multidimensionnelle ». AFNOR, juill-1995.
- [58] NF ISO 8586, « Analyse sensorielle - Lignes directrices générales pour la sélection, l'entraînement et le contrôle des sujets qualifiés et sujets sensoriels experts ». AFNOR, 2012.
- [59] I. Urdapilleta, *Traité d'évaluation sensorielle: aspects cognitifs et métrologiques des perceptions*. Dunod, 2001.
- [60] DEPLEDT, *Évaluation sensorielle – Manuel méthodologique (3e éd.)*. Lavoisier, 2009.
- [61] NF ISO 4121, « Analyse sensorielle - Lignes directrices pour l'utilisation d'échelles de réponses quantitatives ». AFNOR, 2004.
- [62] F. Thongsoume-Philippe, « Contribution à l'évaluation tactile des produits textiles par analyse sensorielle », Université de Haute Alsace, Mulhouse, 2002.
- [63] XP V09-503, « Analyse sensorielle - Mesure des performances d'un ou plusieurs jury(s) effectuant des profils sensoriels conventionnels ». AFNOR, déc-2009.
- [64] A. Lefebvre et J.-F. Bassereau, « L'analyse sensorielle, une méthode de mesure au service des acteurs de la conception : ses avantages, ses limites, ses voies d'amélioration. Application aux emballages - 10ème Séminaire CONFERE », Belfort, 2003, p. 3-11.
- [65] Sarah Kemp, T. Hollowood, et Hort, *Sensory Evaluation: A Practical Handbook*, Spi. Wiley-Blackwell, 2011.
- [66] J.-N. Jaubert, C. Tapiero, et J.-C. Dore, « The Field of Odors: Toward a Universal Language for Odor Relationships », *Perfum. Flavorist*, vol. 20, p. 13, juin 1995.
- [67] D. Nesa, S. Crochemore, et S. Couderc, « Analyse sensorielle des matériaux d'habitable automobile : olfaction », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux - Plastiques et composites*, p. 19, 2004.
- [68] M.-C. Bezat, « Perception des bruits d'impact - Application au bruit de fermeture de porte automobile », Thèse de doctorat, Université de Provence- Aix -Marseille I, 2007.
- [69] S. Crochemore, D. Nesa, et S. Couderc, « Analyse sensorielle des matériaux d'habitable automobile : toucher/vision », *Techniques de l'ingénieur, Matériaux - Plastiques et composites*, p. 22, 2004.
- [70] H. Bogaty, N. R. S. Hollies, et M. Harris, « The Judgment of Harshness of Fabrics », p. 6.
- [71] C. Dacremont, « Spectral composition of eating sounds generated by crispy, crunchy and crackly foods », *J. Texture Stud.*, vol. 26, n° 1, p. 27-43, févr. 1995.
- [72] J. Cho, E. Yi, et G. Cho, « Physiological Responses Evoked by Fabric Sounds and Related Mechanical and Acoustical Properties », *Text. Res. J.*, vol. 71, n° 12, p. 1068-1073, déc. 2001.
- [73] G. Cho, J. G. Casali, et E. Yi, « Effect of fabric sound and touch on human subjective sensation », *Fibers Polym.*, vol. 2, n° 4, p. 196-202, déc. 2001.
- [74] C. Kim, G. Cho, et Y. Na, « Effects of Basic Weave Differences in Silk Fabric and Yarn Type Variations in Satin Weave on Sound Parameters », *Text. Res. J.*, vol. 72, n° 6, p. 555-560, juin 2002.
- [75] NF S30-102, « Vocabulaire de l'acoustique - Systèmes de transmission et de propagation du son et des vibrations ». AFNOR, 1973.

- [76] C. Kim, G. Cho, K. A. Hong, et H. J. Shim, « Sound characteristics according to cross-sectional shapes of fibers », *Fibers Polym.*, vol. 4, n° 4, p. 199-203, déc. 2003.
- [77] J. Cho et G. Cho, « Determining the Psychoacoustic Parameters That Affect Subjective Sensation of Fabric Sounds at Given Sound Pressures », *Text. Res. J.*, vol. 77, n° 1, p. 29-37, janv. 2007.
- [78] S. Kuwano *et al.*, « Subjective impression of auditory danger signals in different countries », *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 28, n° 5, p. 360-362, 2007.
- [79] Y. Na et G. Cho, « Variations in Sensibility to Fabric Frictional Sound by Fiber Type and Subject », *Text. Res. J.*, vol. 73, n° 9, p. 837-842, sept. 2003.
- [80] L. Gueissaz, « Les traces de pneumatiques en sciences forensiques De l'analyse chimique à l'évaluation de la force probante », Thèse de doctorat, Université de Lausanne, 2013.
- [81] E. Drean, « Contribution au développement de capteurs piézoélectriques pour la caractérisation mécanique des étoffes », Thèse de doctorat, Mulhouse, 2006.
- [82] NF EN ISO 139, « Textiles - Atmosphères normales de conditionnement et d'essai ». 01-oct-2005.
- [83] NF EN 1049-2, « Textiles - Tissus - Construction - Méthodes d'analyse - Partie 2 : détermination du nombre de fils par unité de longueur ». AFNOR, 1994.
- [84] NF G 07-150, « Textiles - Essais des tissus - Détermination de la masse surfacique ». AFNOR, 1984.
- [85] S. Kawabata et M. Niwa, « Fabric Performance in Clothing and Clothing Manufacture », *J. Text. Inst.*, vol. 80, n° 1, p. 19-50, janv. 1989.
- [86] F. T. Peirce, « The "handle" of cloth as a measurable quantity », *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 21, n° 9, p. T377-T416, janv. 1930.
- [87] NF EN ISO 6330, « Textiles - Méthodes de lavage et de séchage domestiques en vue des essais des textiles ». 01-juin-2012.
- [88] NF EN ISO 12947-1, « Textiles - Détermination de la résistance à l'abrasion des étoffes par la méthode Martindale - Partie 1 : appareillage d'essai d'abrasion de Martindale (Tirage 2 (2006-07-01)) ». 01-avr-1999.
- [89] BP X10-040, « Caractérisation sensorielle des matériaux - Méthodologie générale, recommandations méthodologiques pour l'analyse sensorielle de la matière première au produit fini ». AFNOR, sept-2003.
- [90] Georg Von Bekesy, *Experiments In Hearing*. 1960.
- [91] NF EN ISO 7029, « Acoustique - Distribution statistique des seuils d'audition en fonction de l'âge et du sexe ». AFNOR, avr-2017.

Annexes

Annexe A. Audiogrammes individuels du panel

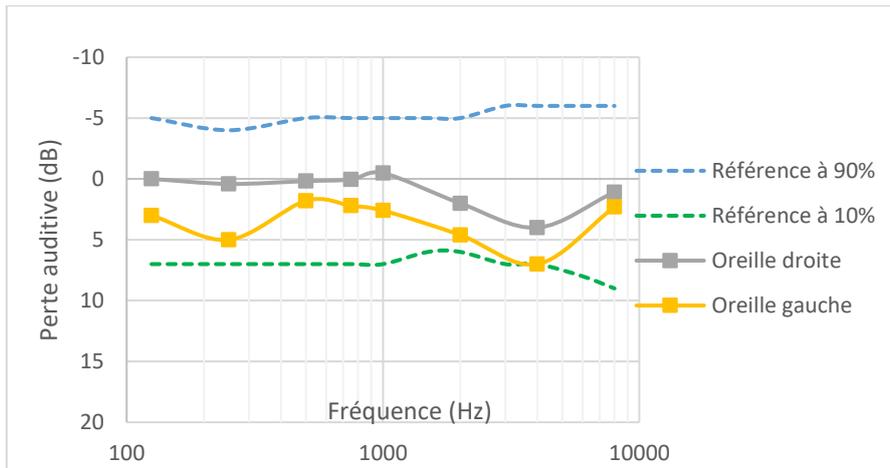


Figure A.1 : Audiogramme panéliste P1

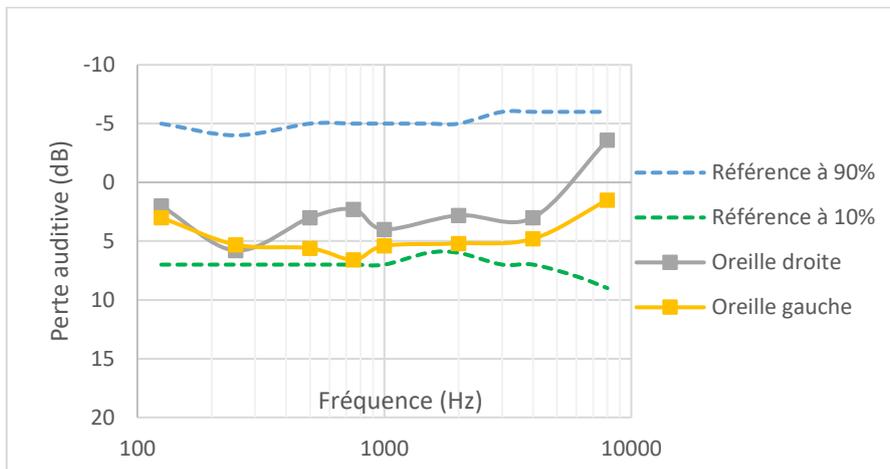


Figure A.2 : Audiogramme panéliste P2

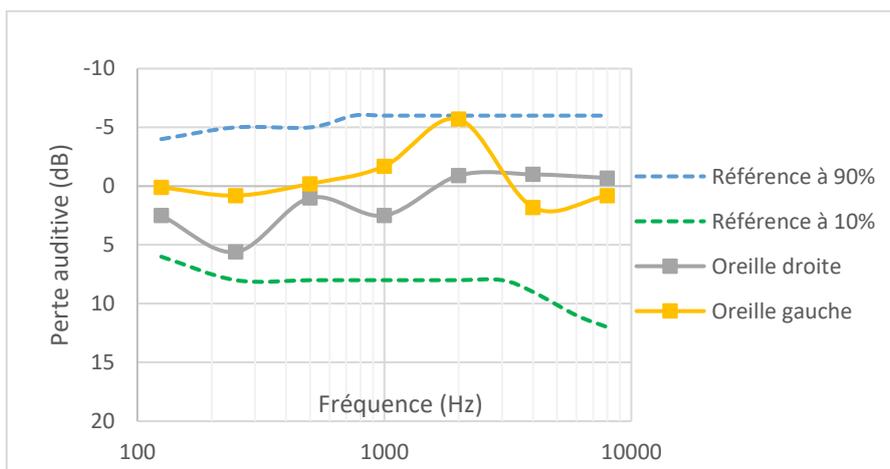


Figure A.3 : Audiogramme panéliste P3

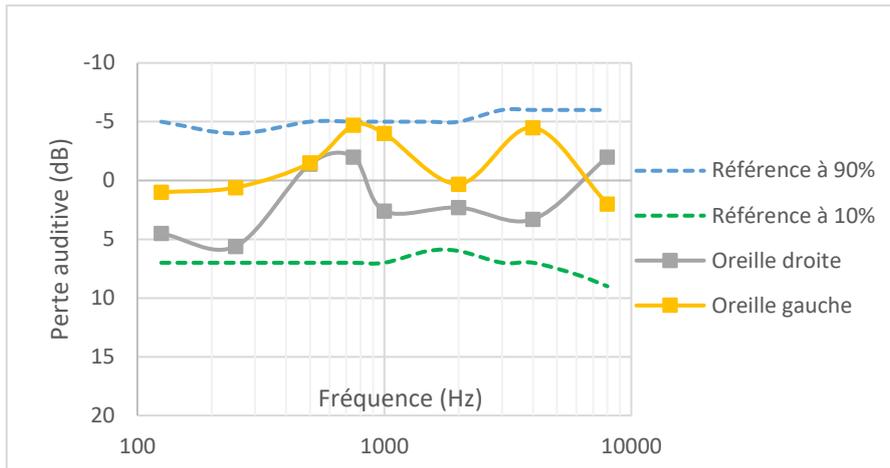


Figure A.4 : Audiogramme panéliste P4

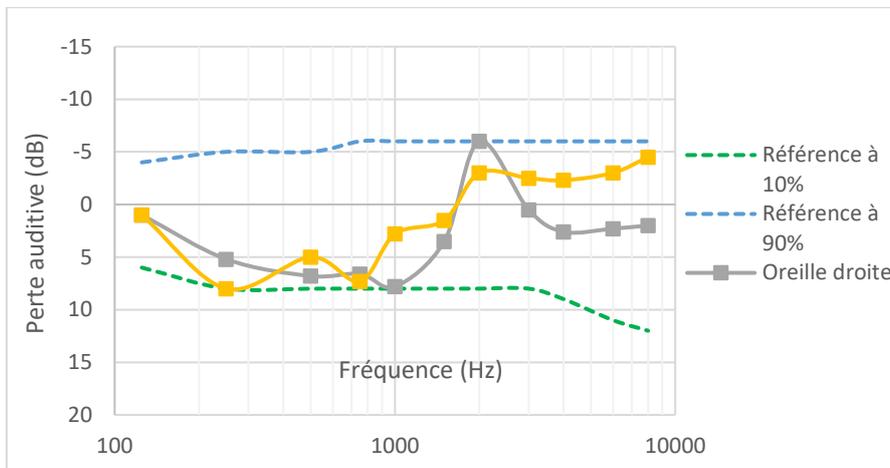


Figure A.5 : Audiogramme panéliste P5

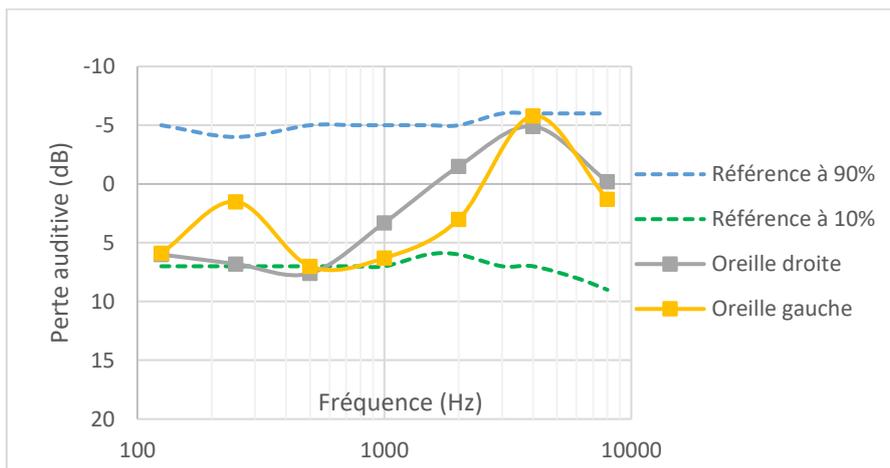


Figure A.6 : Audiogramme panéliste P6

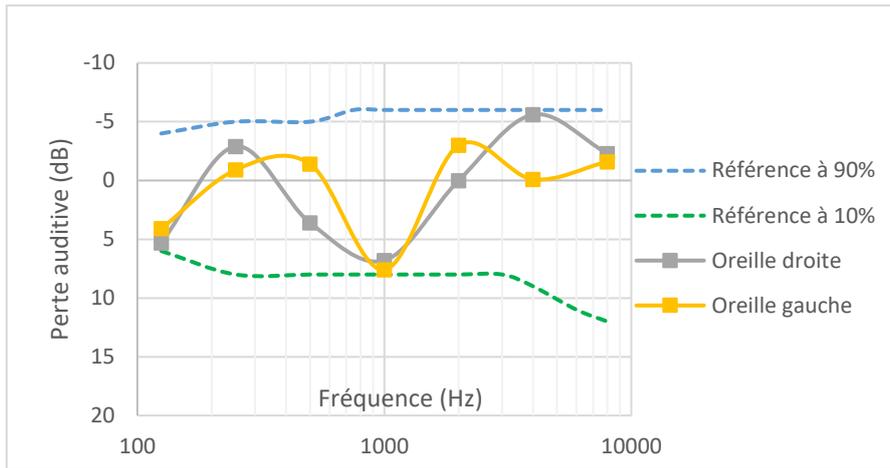


Figure A.7 : Audiogramme panéliste P7

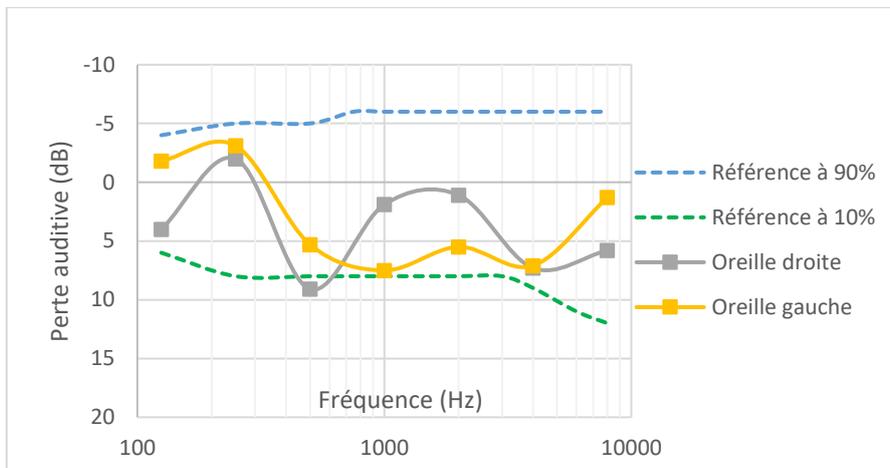


Figure A.8 : Audiogramme panéliste P8

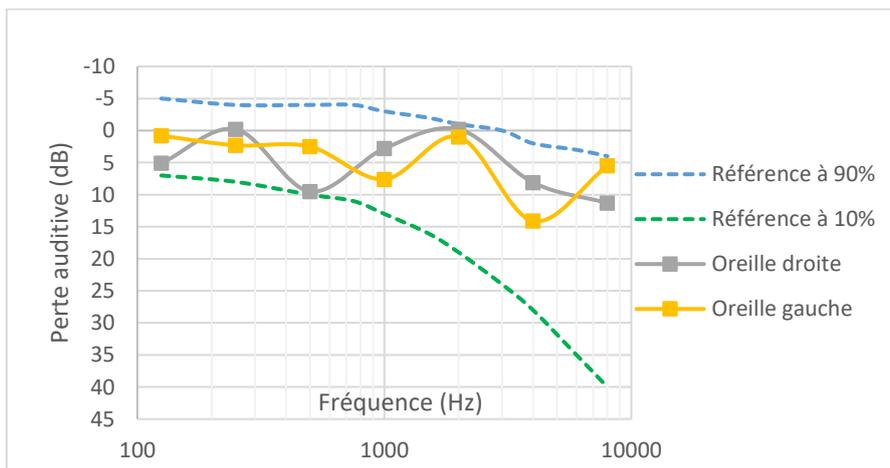


Figure A.9 : Audiogramme panéliste P9

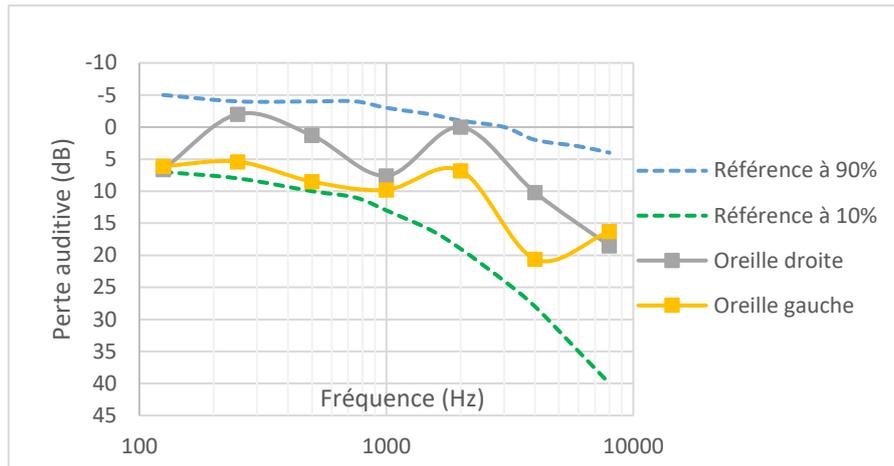


Figure A.10 : Audiogramme panéliste P10

Annexe B. Formulaire d'évaluation sensorielle

Séance de caractérisation n°__

Nom, prénom : _____

Produit n° _____

Date : _____

1) Grave – Aigu

|_____|
Grave Aigu

2) Lent – Rapide

|_____|
Lent Rapide

3) Monotone – Polyphonique

|_____|
Monotone Polyphonique

4) Homogène – Disharmonique

|_____|
Homogène Disharmonique

5) Peinant – Energique

|_____|
Peinant Energique

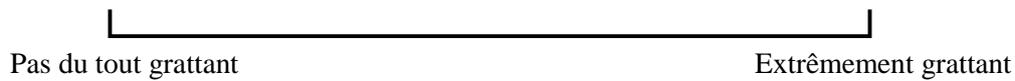
6) Sourd – Intensif

|_____|
Sourd Intensif

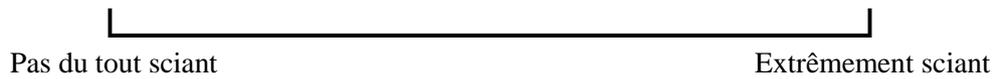
7) Rythmé

|_____|
Pas du tout rythmé Extrêmement rythmé

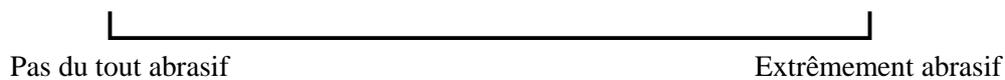
8) Grattage



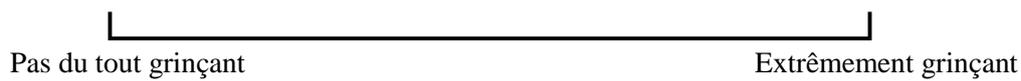
9) Sciage : bruit provoqué au sciage du bois



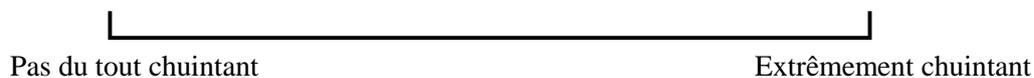
10) Abrasif : bruit de frottement de papier de verre



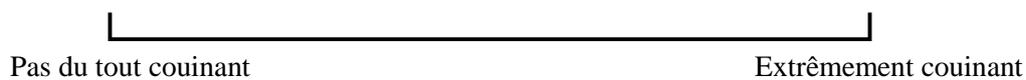
11) Grinçant : bruit de grincement de porte



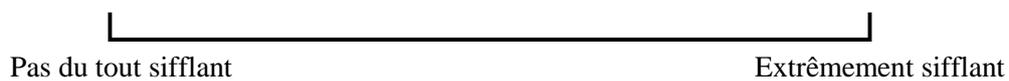
12) Chuintant : bruit provoqué par le passage d'un gaz ou d'un liquide dans un orifice étroit (chuintement de chaussure)



13) Couinant : bruit de couinement d'une chaise



14) Sifflant



15) Résonnant



Annexe C. Influence du lavage – Caractérisation sonore

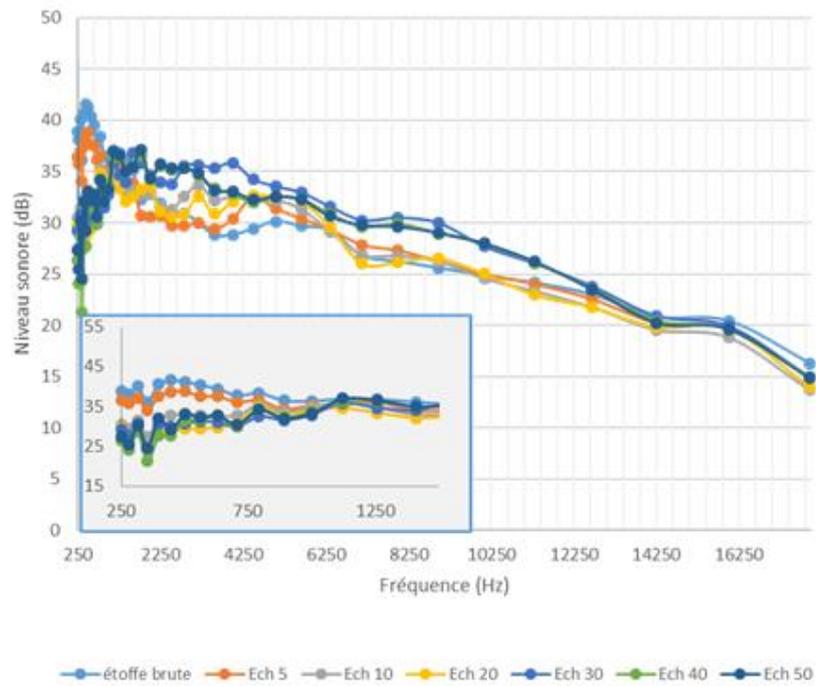


Figure C.1 : Spectres de bandes (1/6 d'octave) – Etoffe 2

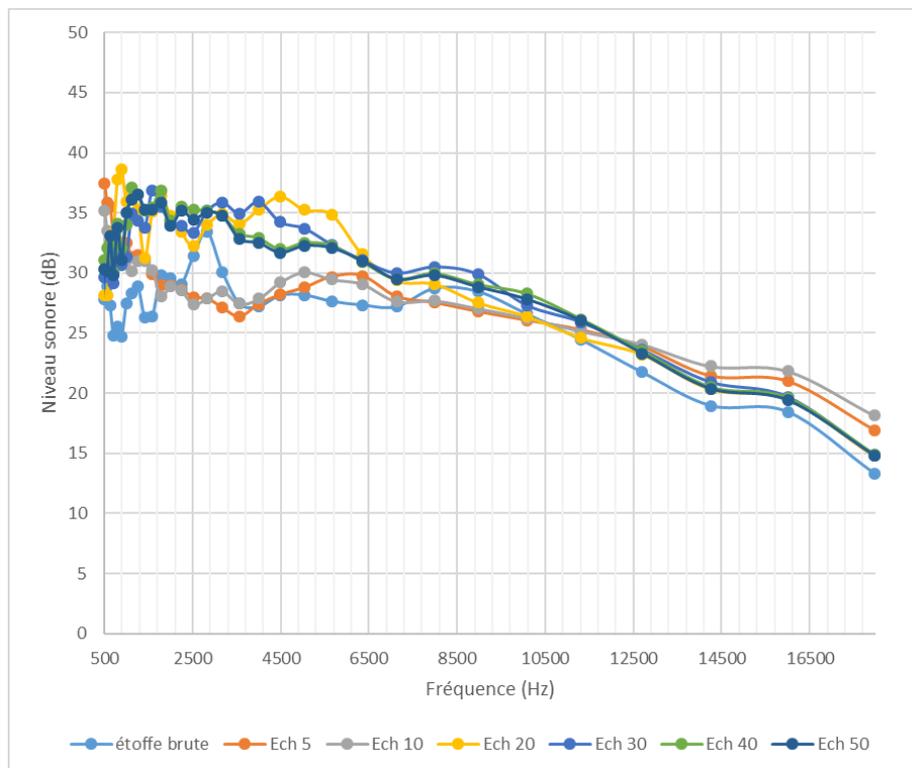


Figure C.2 : Bandes de 1/6 d'octave – étoffe 3

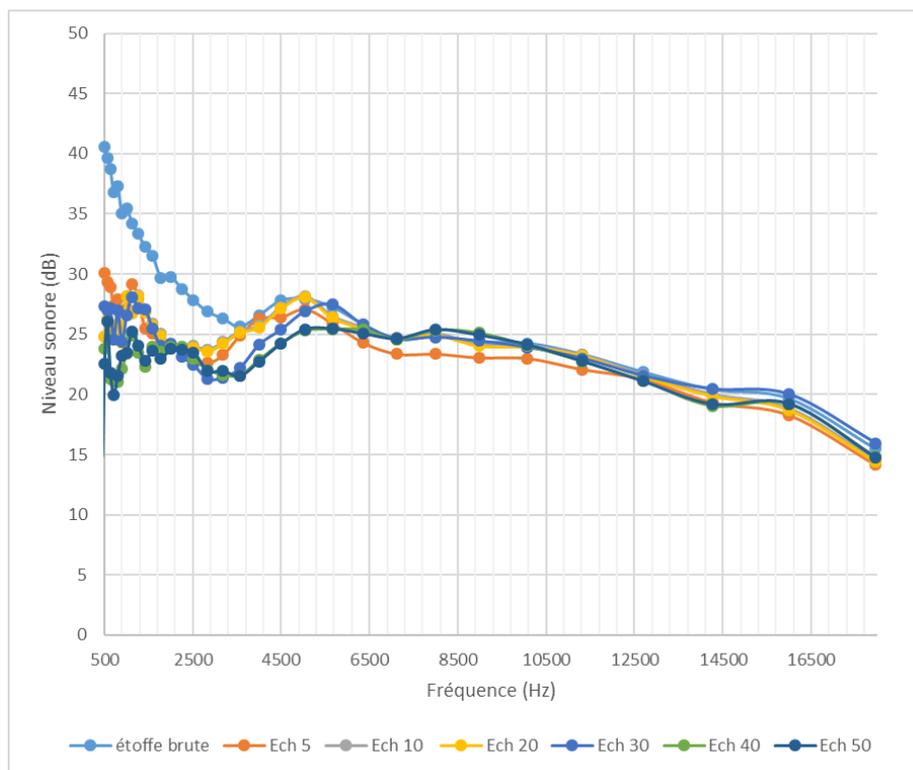


Figure C.3 : Bandes de 1/6 d'octave – étoffe 4

Annexe D. Influence du lavage – Caractérisation sensorielle

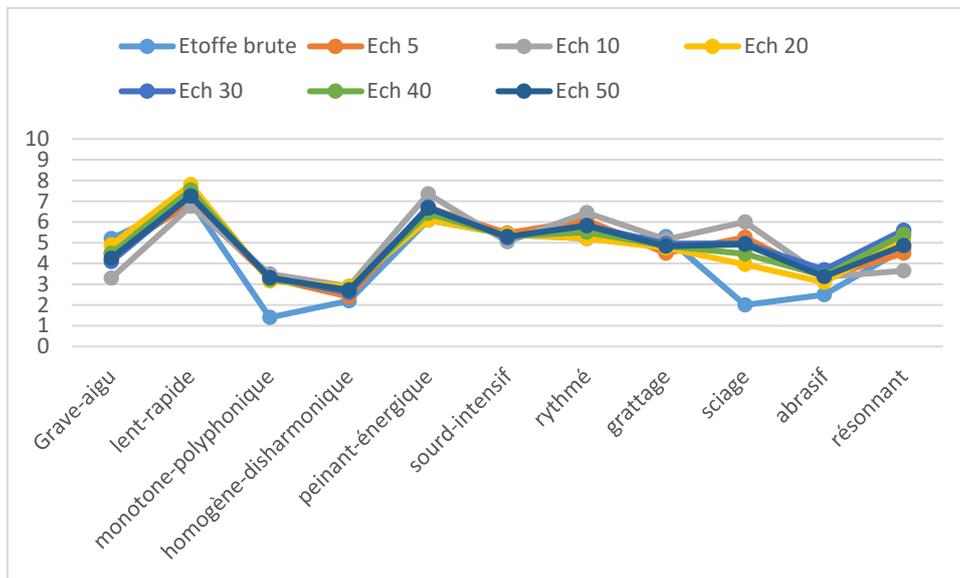


Figure D.1 : Profil sensoriel des échantillons de l'étoffe 2

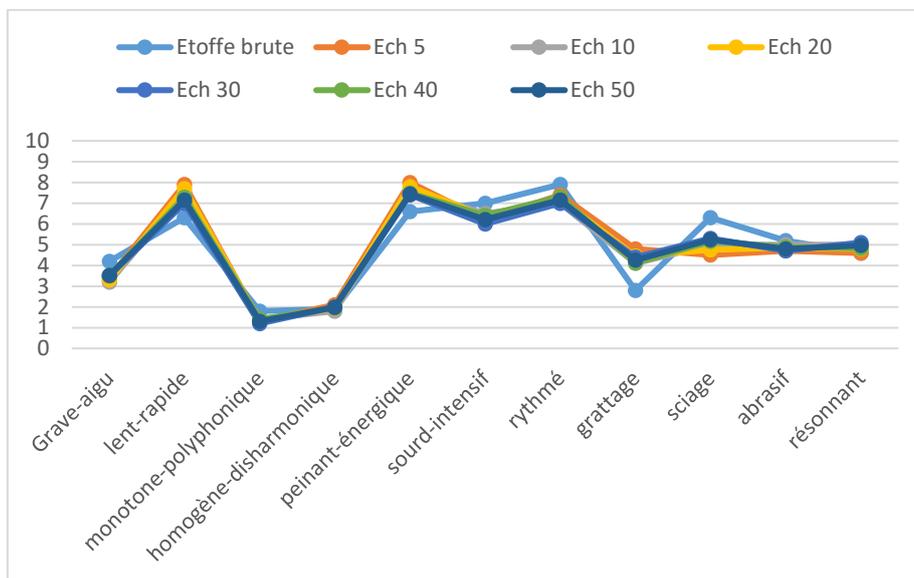


Figure D.2 : Profils sensoriels de l'étoffe 3

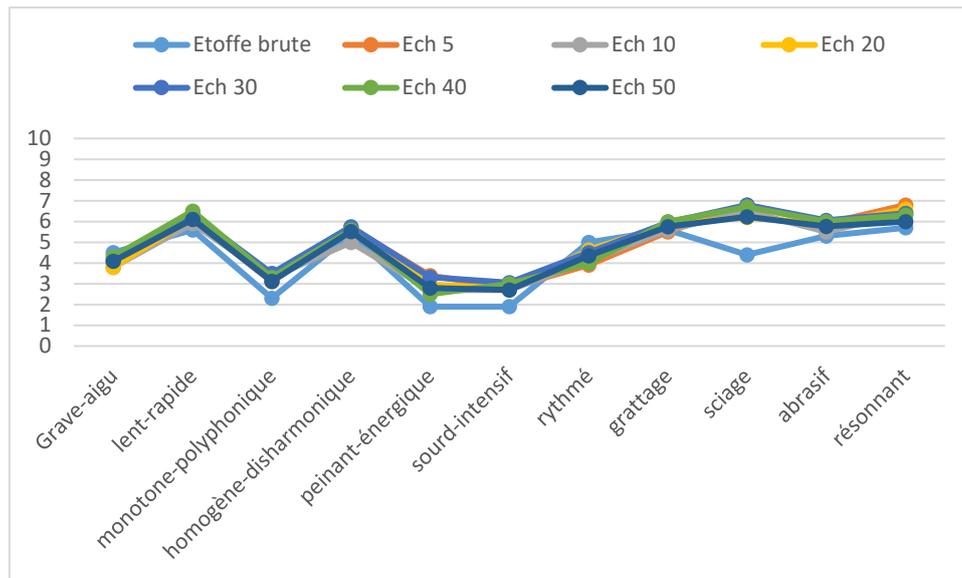


Figure D.3 : Profils sensoriels des échantillons issus de l'étoffe 4

Annexe E. Influence de l'abrasion – Caractérisation sonore

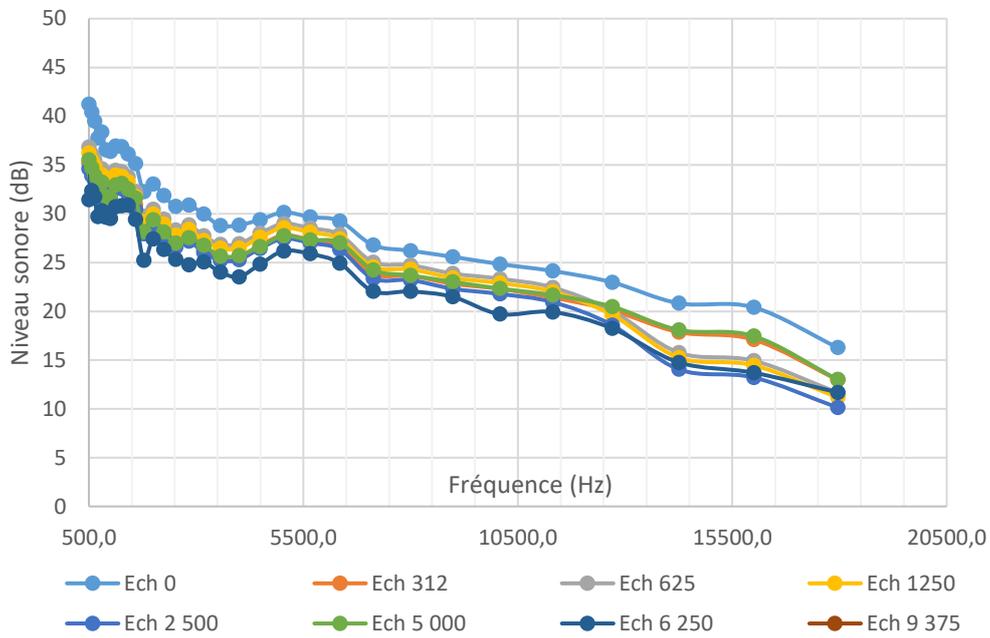


Figure E.1 : Caractérisation sonore des échantillons abrasés de l'Etoffe 2

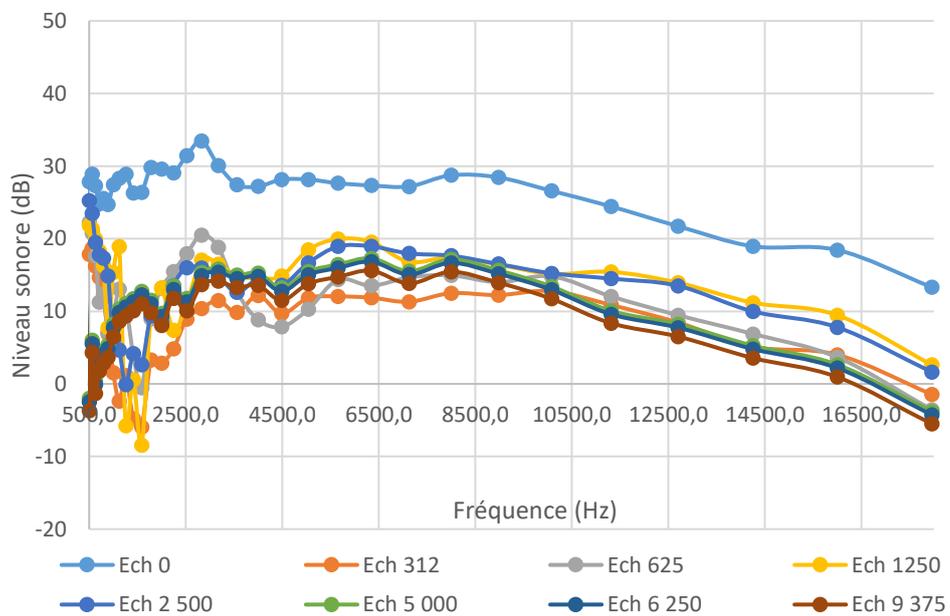


Figure E.2 : Caractérisation sonore des échantillons abrasés de l'Etoffe 3

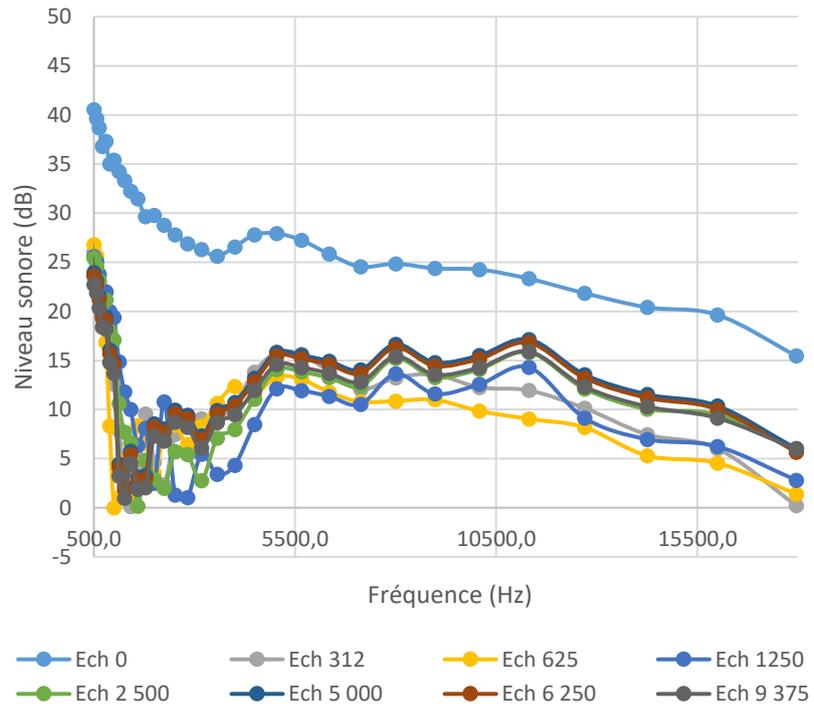


Figure E.3 : Caractérisation sonore des échantillons abrasés de l'Etoffe 4

Annexe F. Influence de l'abrasion – Caractérisation sensorielle

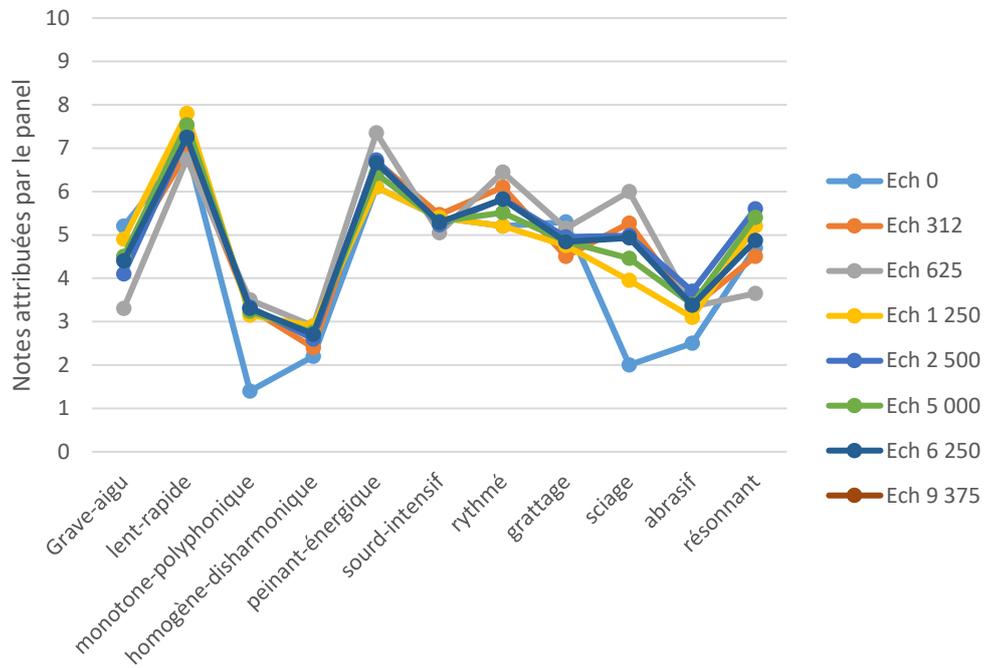


Figure F.1 : Profils sensoriels des échantillons abrasés de l'étoffe 4

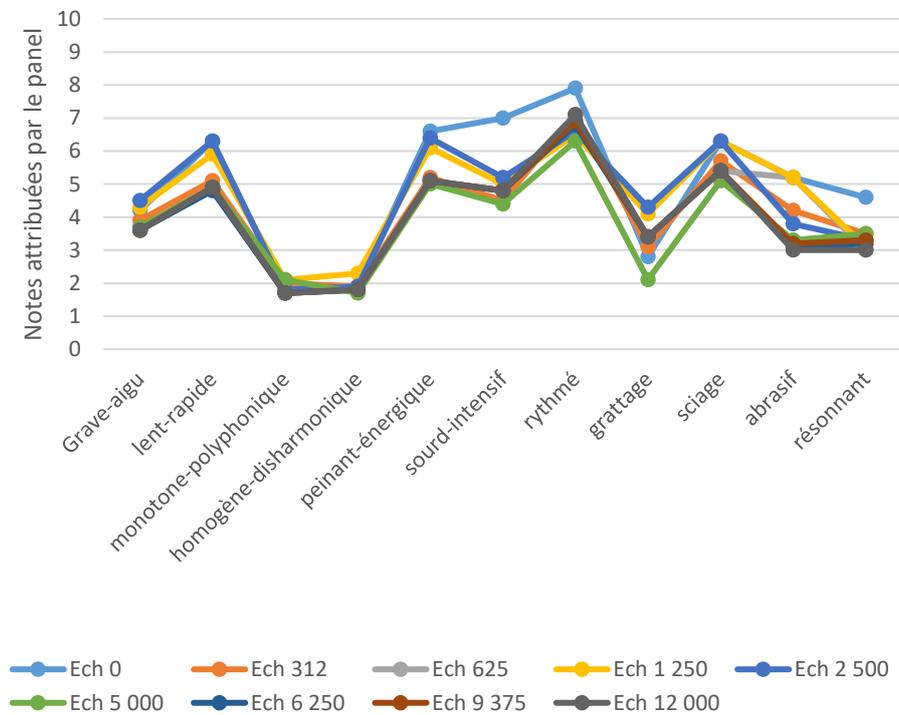


Figure F.2 : Profils sensoriels des échantillons abrasés de l'étoffe 3

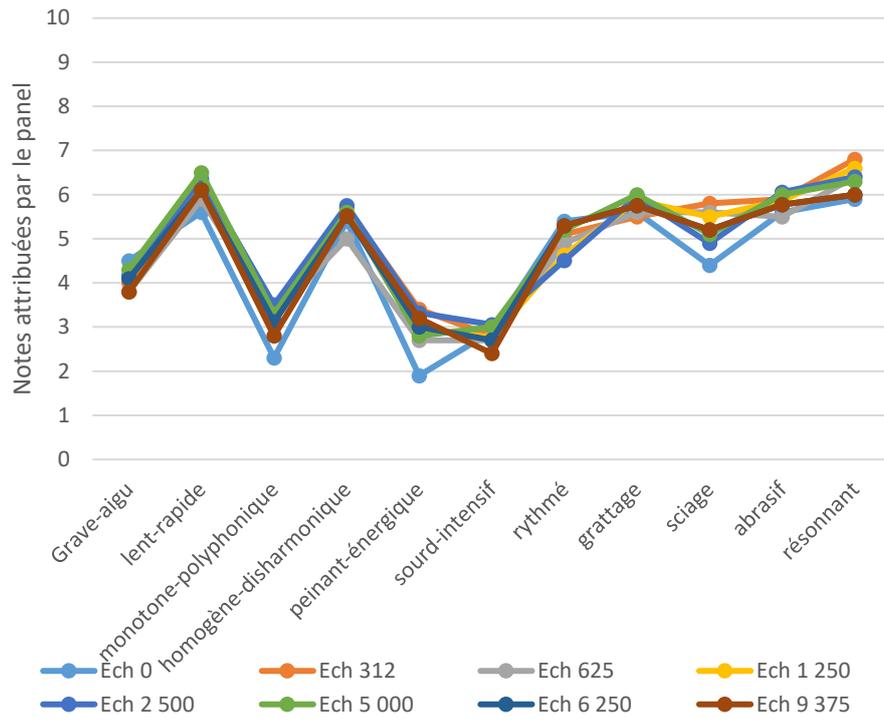


Figure F.3 : Profils sensoriels des échantillons abrasés de l'étoffe 4

Contribution à l'étude de l'influence de l'usure sur le bruit de frottement des étoffes : Approches instrumentales et sensorielles

Le combattant, en se déplaçant, va générer un frottement tissu contre tissu qui générera lui-même des bruits de friction. Ces bruits pouvant être gênants, voire fortement handicapants, lors de la progression du combattant, il est important de les étudier. Des études antérieures ont montré que les propriétés sonores des tissus dépendent de nombreux paramètres tels que l'armure ou l'état de surface du tissu. L'usure étant l'un des principaux facteurs entraînant des modifications de cet état de surface, l'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de l'usure sur le bruit de frottement des étoffes par deux approches différentes.

Lors de ces travaux, les bruits de friction de quatre étoffes techniques ont été générés et enregistrés grâce à un dispositif expérimental permettant de simuler le mouvement du bras lors de la marche. Afin de pouvoir évaluer l'influence de l'usure, les échantillons ont été usés par deux méthodes différentes, par de multiples lavages et par le procédé Martindale. Pour chacun de ces échantillons, les paramètres acoustiques, les propriétés mécaniques et sensorielles ont été mesurés. Les paramètres acoustiques tels que le niveau sonore ont été obtenus à partir de la transformée de Fourier des spectres sonores, le système d'évaluation Kawabata (KES) a été utilisé pour mesurer les propriétés de compression et de surface du tissu. Enfin, l'évaluation des propriétés sensorielles a été effectuée par un panel entraîné.

Les résultats ont montré une évolution différente du niveau sonore selon la façon dont l'étoffe a été usée. Une étude des corrélations par analyse en composantes principales entre l'ensemble de ces paramètres a été réalisée, une forte relation entre le niveau sonore, la résilience en compression et le coefficient de frottement des étoffes a ainsi été démontrée. Ces travaux pluridisciplinaires ont permis de mettre en évidence l'impact des conditions d'usage des textiles sur le niveau sonore des bruits de friction, en effet, celui-ci varie en fonction de l'état de surface de l'étoffe et donc en fonction de son degré d'usure.

Contribution to the study of wear's influence on fabric friction sounds. Instrumental and sensory approaches.

While moving the soldier will generate fabric-to-fabric frictions that will generate itself friction sounds. It is important to study them because these noises can be annoying or even disabling during the soldier's progress. Previous studies have shown that sound properties of fabrics depend on various parameters such as the weave pattern or the surface of the fabric. Wear of fabrics is one of the main factors affecting the surface of fabrics therefore the aim of this study is to analyze the wear's influence on fabric friction sound by two different approaches.

The friction sounds of four technical fabrics were generated and recorded using an experimental device to simulate the movement of the arm when a person is walking. In order to assess the wear's influence, the samples were worn out by two different methods, by multiple washes and by the Martindale process. For each of these samples, acoustic parameters, mechanical and sensory properties were measured. Acoustic parameters such as sound level were obtained thanks to a Fast Fourier transform, the Kawabata Evaluation System (KES) was used to measure the properties of compression and surface of fabrics. Finally, a trained panel carried out the assessment of sensory properties.

The results showed a different evolution of the total sound level depending on how the fabric was worn. A study of the correlations especially by principal component analysis between all these parameters was realized. Thus, a strong relationship between the sound level, the compressive resilience and the friction coefficient of fabrics was demonstrated. This multidisciplinary work has shown the wear's influence on the noise level of friction. Indeed, this level is different according to the state of fabric's surface therefore according to its degree of wear.