

30376  
2006  
126

N° d'ordre: 3854



Université des Sciences et Technologies de Lille 1 - École Doctorale des Sciences pour l'Ingénieur

# Caractérisation du rôle de la dynamique du toucher dans la perception de textures

## THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 10 octobre 2006

pour l'obtention du

**Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille**

(spécialité instrumentation et analyses avancées)

par

**François MARTINOT**

### Composition du jury

<i>Président :</i>	Pr Philippe PERNOD	IEMN, École Centrale de Lille
<i>Directeurs de thèse :</i>	Pr Christophe CHAILLOU	LIFL, Université de Lille I
	Dr Patricia PLÉNACOSTE	LIFL, Université de Lille I
<i>Rapporteurs :</i>	Pr Claude CADOZ	ACROE, INP, ICA Grenoble
	Dr Edouard GENTAZ	LPNC, UPMF Grenoble
	Pr Vincent HAYWARD	CIM, MCGILL Montréal
<i>Examineurs :</i>	Dr Jean-Loup FLORENS	ACROE, INP, ICA Grenoble
	Pr Betty SEMAIL	L2EP, Université de Lille I

Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille – UMR CNRS 8022 – INRIA ALCOVE





## Remerciements

*Je remercie mes encadrants, Patricia Plénacoste, Christophe Chaillou et Betty Semail, responsable du projet STIMTAC, pour m'avoir accueilli dans leur équipe. Sans leur aide et leur confiance, ce travail n'aurait pas abouti. Le support et les encouragements de mes amis de Polytech'Lille, Mélisande Biet, Fred Giraud et François Pigache m'ont été très précieux. Je tiens aussi à exprimer toute ma sympathie aux membres de l'équipe ALCOVE / GRAPHIX et à Géry Casiez, Christian Duriez et Laurent Grisoni. Je n'oublie pas non plus mon tuteur de monitorat, Robert Litwak et les membres du LAGIS, Blaise Conrard, Mireille Bayart pour leur accueil chaleureux dans l'équipe d'enseignement IMA auto. J'exprime aussi ma gratitude aux membres du secrétariat au LIFL, Marie Agnès Énard, Karine Lewandowski, Christophe Demarey, Nicole Flinois, Maria Da Silva, et aux chercheurs et techniciens du L2EP, Robert Bausière, Jean-Jacques Franchaud, Olivier Ferla. J'ai beaucoup apprécié le support technique et la sympathie des équipes de l'atelier électronique de Polytech'Lille, Thierry Flamen, Daniel Montignies et de l'atelier mécanique de Polytech'Lille, Thomas Dhienne, Yohann Dondt. Je pense aussi beaucoup à Jean-Pierre Delval qui nous a quittés. J'ai eu la chance de bénéficier de conseils ou d'échanges fructueux très divers ces trois dernières années. Aussi, j'exprime toute ma reconnaissance aux conseillers commerciaux Emmanuel Gremaud (Bruel & Kjaër), Ferit Bonfil (Polytec), Morten Støve (DPA microphones) ; aux chercheurs d'universités extérieures Jérôme Pasquéro (CIM-McGill), Philippe Klein (INRETS) Olivier Gapenne, Charles Lenay (COSTECH, UTC), Marion Luyat (URECA, LILLE III) et Jannick Naveteur (Lab. de Neurosc., USTL), et à la communauté « haptique ». Je n'aurais rien pu faire sans le support financier de l'Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour les Communication Avancée (IRCICA), de l'Institut National de Recherche en Informatique et Automatique (INRIA), et du Centre National de la recherche Scientifique (CNRS). J'ai éprouvé une grande fierté à les représenter. Je remercie enfin toute ma famille et surtout Ségolène.*

*« Nous croyons en l'existence des objets seulement parce que nous les voyons et nous les touchons, et parce qu'ils nous sont reflétés par nos sensations. Pourtant, nos perceptions ne sont que des idées formées dans notre esprit. C'est-à-dire que les objets que nous percevons ne sont en réalité rien d'autre que des idées qui existent seulement dans notre esprit... Puisque tout cela n'existe que dans l'esprit, il est clair que nous sommes trompés par des illusions quand nous imaginons que l'Univers et les choses peuvent avoir une existence autre que celle qui existe dans notre esprit. Donc, tout ce qui nous entoure n'existe que dans notre esprit. »*

George Berkeley (1685-1753)

*« Ce sens du toucher, que nous ressentons lorsque nous appuyons nos doigts sur une table, n'est qu'une perturbation électrique qui agit sur les électrons et protons dont nos doigts sont composés, et causée, conformément à la physique moderne, par la proximité des électrons et protons de la table. Si cette même perturbation sur le bout de nos doigts se produisait d'une autre manière, nous devrions avoir des sensations, et ceci bien qu'il n'y ait pas de table. »*

Bertrand Russell (1872-1970)

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1</b>	
<b>Analyse des connaissances en toucher de texture</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Motivations pour une meilleure compréhension du toucher de texture.....</b>	<b>4</b>
1.1.1 Importance fonctionnelle du toucher.....	4
1.1.2 Challenge de la texture.....	5
1.1.3 Attractivité des applications.....	6
<b>1.2 Sensations, perceptions et couplage sensorimoteur de la modalité.....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Description du système haptique.....	6
1.2.2 Rôle de l'exploration active ou de l'intérêt du couplage sensorimoteur.....	8
1.2.3 Procédures exploratoires du toucher actif.....	9
1.2.4 Discussion.....	10
<b>1.3 Somesthésie.....</b>	<b>11</b>
1.3.1 Proprioception, extéroception, thermoception et nociception.....	11
1.3.2 Description générale des récepteurs de l'information haptique.....	11
1.3.3 Caractérisation des mécanorécepteurs cutanés.....	12
1.3.4 Acheminement et traitement de l'information sensorielle depuis les fibres.....	14
<b>1.4 Sensibilité aux stimuli haptiques.....</b>	<b>16</b>
1.4.1 Dimension des stimuli candidats à la sensation.....	16
1.4.2 Acuité spatiale du système sensoriel.....	16
1.4.3 Sensibilité aux vibrations continues.....	17
1.4.4 Discussion.....	18
<b>1.5 Physique du toucher : des phénomènes multi échelles.....</b>	<b>18</b>
1.5.1 Techniques de mesure des forces et déplacements.....	19
1.5.2 Description à plusieurs niveaux : la main, la pulpe, la surface de la peau.....	20
1.5.3 Identification et modélisation mécanique du comportement mécanique du membre.....	21
1.5.4 Identification et modèles analytiques de la rhéologie des tissus.....	23
1.5.5 Modèles numériques à l'échelle des tissus.....	24
1.5.6 Comportement biomécanique en surface de la peau.....	25
1.5.7 Aspects tribologiques.....	26
<b>1.6 Déterminants de la perception de la rugosité de texture.....</b>	<b>30</b>
1.6.1 Étude des formes possibles de codage de la texture.....	30
1.6.2 Premières observations en faveur de la vibration.....	31
1.6.3 Implication des mécanismes intensifs et spatiaux.....	32
1.6.4 Arguments pour l'influence d'une dimension temporelle.....	34
1.6.5 Intégration intermodale des indices de texture.....	35

<b>1.7 Discussion sur le besoin de mieux caractériser le toucher latéral.....</b>	<b>37</b>
-----------------------------------------------------------------------------------	-----------

## **Chapitre 2**

### **Caractérisation cinématique du toucher latéral 39**

<b>2.1 Objectifs.....</b>	<b>40</b>
2.1.1 Compatibilité entre mouvement et vibration au contact.....	40
2.1.2 Caractérisation du mouvement volontaire de discrimination de texture.....	40
2.1.3 Compréhension de l'apport moteur.....	42
2.1.4 Considérations ergonomiques pour le design des afficheurs tactiles.....	43
<b>2.2 Conception d'un instrument de mesure transparent.....</b>	<b>43</b>
2.2.1 Réflexion sur l'existant.....	44
2.2.2 Proposition de capteur et description du principe de fonctionnement.....	45
2.2.3 Considérations de dimensionnement.....	46
2.2.4 Linéarité, justesse et nécessité de filtrage.....	47
<b>2.3 Expérience.....</b>	<b>48</b>
2.3.1 Sujets.....	49
2.3.2 Matériel expérimental.....	49
2.3.3 Méthode.....	49
<b>2.4 Résultats.....</b>	<b>51</b>
2.4.1 Premières observations.....	51
- <i>Présence de mouvement</i> .....	51
- <i>Implication du toucher latéral</i> .....	51
- <i>Discussion sur la forme</i> .....	52
2.4.2 Détermination des éventuels invariants du mouvement.....	53
- <i>Procédure exploratoire impliquée</i> .....	53
- <i>Variabilité inter et intra-sujets considérable</i> .....	54
- <i>Absence de responsabilité des facteurs expérimentaux</i> .....	54
- <i>Explication ergonomique</i> .....	56
- <i>Restriction volontaire du mouvement</i> .....	57
2.4.3 Comparaison aux résultats de Smith, Gosselin et Houde.....	60
- <i>Trajectoires explorées</i> .....	60
- <i>Force normale</i> .....	61
<b>2.5 Discussion.....</b>	<b>61</b>

## **Chapitre 3**

### **Vibroacoustique du frottement et codage temporel 63**

<b>3.1 Motivations pour une caractérisation vibroacoustique.....</b>	<b>64</b>
3.1.1 Vibration ou « fréquence temporelle » de la texture.....	64
3.1.2 Expérience élémentaire.....	65
3.1.3 Études supportant cette hypothèse.....	66
3.1.4 Motivations pour la mesure microphonique et originalité de notre approche.....	67
<b>3.2 Prérequis avant la mesure : étude du rayonnement acoustique.....</b>	<b>68</b>
3.2.1 Synthèse multipôle.....	69
3.2.2 Prise en compte de la géométrie du doigt : le cas du dipôle.....	69
3.2.3 Synthèse multipôle et champ rayonné en l'absence de texture.....	70

3.2.4	Perturbation au rayonnement lié à la présence de la texture : l'effet dièdre .....	74
3.2.5	Placement de microphone et filtrage.....	77
<b>3.3</b>	<b>Protocole expérimental.....</b>	<b>79</b>
3.3.1	Présentation générale du banc d'essai et de la méthode.....	79
3.3.2	Choix de l'environnement et caractérisation de ses propriétés acoustiques.....	80
3.3.3	Stimulateur tactile.....	80
3.3.4	Contrôle de la force normale d'appui du doigt et de la vitesse du moteur.....	81
3.3.5	Description du capteur et du matériel d'acquisition.....	82
<b>3.4</b>	<b>Résultats.....</b>	<b>83</b>
3.4.1	Préférence pour l'analyse des signaux par ondelettes.....	83
3.4.2	Choix de l'ondelette de Meyer.....	84
3.4.3	Scalogrammes en fonction de la vitesse et de l'orientation relative.....	86
3.4.4	Inconsistance du frottement avec le codage à dimension temporelle.....	90
<b>3.5</b>	<b>Discussion ouverte sur les mécanismes d'émergence du bruit au contact.....</b>	<b>90</b>
3.5.1	Frottement et perception de la rugosité.....	91
3.5.2	Résonateurs sous influence de mécanismes d'interaction multiples.....	92
3.5.3	Forces impulsionnelles.....	93
3.5.4	Forces d'excitation périodique.....	94
3.5.5	Forces dépendantes de la vitesse et stick-slip.....	95
3.5.6	Forces d'adhérence et oscillations de décollement (stick-snap).....	96
3.5.7	Forces d'origine aérodynamique.....	98
<b>3.6</b>	<b>Bilan et arguments contre un codage temporel explicatif du mouvement.....</b>	<b>99</b>
<hr/>		
<b>Chapitre 4</b>		
<b>Commensurabilité entre surfaces en vibration et perception de la rugosité</b>		<b>101</b>
<b>4.1</b>	<b>Influence de l'angle doigt-surface sur la vibration de la pulpe.....</b>	<b>102</b>
4.1.1	Objectifs de l'expérience.....	102
4.1.2	Validation de la technique microphonique par Vibrométrie LASER Doppler.....	103
4.1.3	Modifications du protocole expérimental.....	103
4.1.4	Deux phénomènes cycliques en faveur d'un rôle de l'empreinte.....	105
4.1.5	Séparabilité de la distribution d'énergie mécanique sur la pulpe.....	105
4.1.6	Mesure complémentaire de validation sur l'ongle.....	109
4.1.7	Vibration dépendante de la posture.....	110
<b>4.2</b>	<b>Comprendre l'influence de la commensurabilité sur la rugosité perçue.....</b>	<b>111</b>
4.2.1	Méthodes privilégiées pour l'évaluation de l'acuité spatiale.....	111
4.2.2	Stratégie d'explication du rôle du mouvement dans la perception.....	112
<b>4.3</b>	<b>Rugosité perçue en fonction de l'emboîtement entre reliefs.....</b>	<b>113</b>
4.3.1	Sujets et méthodes.....	113
4.3.2	Résultat : rugosité perçue fonction de la commensurabilité.....	115
4.3.3	Analyse comparative du résultat par rapport à ceux de la littérature.....	116
<b>4.4</b>	<b>Situation discriminante : lame cisillée par les crêtes épidermiques.....</b>	<b>117</b>
4.4.1	Méthode : étude des relations entre réponse en fréquence et emboîtement.....	117
4.4.2	Résultat : contribution de l'empreinte à l'émergence du cisaillement.....	120
<b>4.5</b>	<b>Vibration induite sur la texture à cause de la présence d'une cran.....</b>	<b>121</b>

4.5.1	Protocole expérimental.....	121
4.5.2	Résultat : incohérence fréquentielle entre vibration au contact et rugosité fine.....	122
<b>4.6</b>	<b>Cas des textures finement rainurées.....</b>	<b>124</b>
4.6.1	Remarques sur les conditions expérimentales.....	124
4.6.2	Résultat : des phénomènes d'intensité globale comparable.....	124
<b>4.7</b>	<b>Sensations résultant de la suppression des indices spatiaux.....</b>	<b>128</b>
4.7.1	Enregistrement unidimensionnel des déplacements de surfaces et restitution.....	128
4.7.2	Résultats : importance du gradient spatial des forces au contact.....	129
<b>4.8</b>	<b>Résumé des observations expérimentales et conclusion du chapitre.....</b>	<b>129</b>

## Chapitre 5

### **Dynamique stochastique du toucher latéral : cas du Sensotact®** **134**

<b>5.1</b>	<b>Nature stochastique des mécanismes.....</b>	<b>135</b>
5.1.1	Peau considérée comme un système complexe.....	135
5.1.2	Caractère stochastique du frottement.....	136
5.1.3	Cas du mouvement dirigé.....	136
5.1.4	Conséquences sur les méthodes d'évaluation.....	137
<b>5.2</b>	<b>SENSOTACT® et descripteur « râpeux ».....</b>	<b>137</b>
5.2.1	Présentation générale de l'outil d'analyse sensorielle.....	137
5.2.2	Spécificités du descripteur « râpeux » et motivations pour son utilisation.....	138
5.2.3	Caractérisation des échantillons au profilomètre avant l'expérience.....	139
<b>5.3</b>	<b>Description statistique et multiéchelle des bruits du toucher des échantillons.....</b>	<b>141</b>
5.3.1	Sujets.....	141
5.3.2	Méthode d'utilisation de l'équipement expérimental.....	141
5.3.3	Recueil des données et traitement.....	143
5.3.4	Analyse continue des transitoires à plusieurs échelles.....	143
5.3.5	Évolution de l'intensité sonore en fonction des notes.....	146
5.3.6	Transformée en ondelettes discrète.....	146
<b>5.4</b>	<b>Interprétation des résultats.....</b>	<b>148</b>
5.4.1	Pertinence d'agrégation des niveaux de détail.....	148
5.4.2	Interprétation des phénomènes au contact et de leur perception associée.....	149
5.4.3	Étude des corrélations.....	151
<b>5.5</b>	<b>Bilan de l'étude sur SENSOTACT®.....</b>	<b>153</b>

## Chapitre 6

### **Perspectives de simulation du toucher actif de texture** **155**

<b>6.1</b>	<b>Présentation des propositions d'afficheurs tactiles.....</b>	<b>156</b>
6.1.1	Méthodes de stimulation cutanée.....	156
6.1.2	Créativité des propositions technologiques.....	157
6.1.3	Classification des stimulateurs par nature des contraintes au contact.....	157
	- Contraintes de traction compression.....	157
	- Contraintes de cisaillement.....	160

<b>6.2 Recommandations de design aux afficheurs de texture (fine)</b> .....	<b>163</b>
6.2.1 Développer les techniques de mesure des grandeurs physiques du contact.....	164
6.2.2 Proposer des solutions ergonomiques.....	164
6.2.3 Utiliser des résolutions en amplitude et spatiales appropriées.....	164
6.2.4 Penser à une organisation multicouche ou large bande passante.....	165
6.2.5 Éviter les perturbations des forces de réaction modales du stimulateur.....	166
6.2.6 Respecter la nature transitoire des événements.....	166
6.2.7 Proposer des solutions de cisaillement de l'épiderme à l'échelle de ses crêtes.....	167
<b>6.3 Perspectives</b> .....	<b>168</b>
<b>Conclusion</b>	<b>169</b>
<b>Annexes</b>	<b>174</b>
- <b>Annexe A : espace de travail minimal en contact statique</b> .....	<b>174</b>
- <b>Annexe B : fonctions de Hankel, de Legendre et d'ondes sphériques</b> .....	<b>176</b>
- <b>Annexe C : bruit du système moteur – roue dentée</b> .....	<b>180</b>
- <b>Annexe D : transformée de Fourier et ondelettes</b> .....	<b>181</b>
<b>Glossaire</b>	<b>194</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>196</b>
<b>Résumé / abstract</b>	<b>213</b>



# Table des figures

## Chapitre 1

Fig.1.1	–	Système haptique et ses sous-systèmes sensoriel, moteur et cognitif.....	7
Fig.1.2	–	Influence des systèmes tactiles.....	11
Fig.1.3	–	Vue en coupe de la pulpe du doigt.....	13
Fig.1.4	–	Aires de Brodmann.....	15
Fig.1.5	–	Photographie de la propagation d'une onde de Rayleigh à la surface de la peau velue obtenue par illumination stroboscopique.....	19
Fig.1.6	–	Représentation des articulations, du métacarpe de la main et des phalanges d'un doigt.....	20
Fig.1.7	–	Imagerie par résonance magnétique de la phalange distale à 77°K.....	21
Fig.1.8	–	Empreinte digitale.....	21
Fig.1.9	–	Modélisation de la structure du doigt humain et localisation des mécanorécepteurs cutanés.....	25
Fig.1.10	–	Tribomètre biomédical UMT permettant la mesure in vivo du coefficient de frottement entre la peau et une bille.....	28
Fig.1.11	–	Expérience de 1992 de Connor et Johnson.....	33

## Chapitre 2

Fig.2.1	–	Sensibilité directionnelle des mécanorécepteurs de type SAI, RA, SA.....	41
Fig.2.2	–	Tactile Display System.....	44
Fig.2.3	–	Digitracker.....	44
Fig.2.4	–	Plate-forme de Stewart.....	45
Fig.2.5	–	Plate-forme de force verticale à trois degrés de liberté et pointage bureautique.....	45
Fig.2.6	–	Étalonnage de vérification de la linéarité.....	47
Fig.2.7	–	Erreur maximale théorique en mm.....	47
Fig.2.8	–	Transitoires de résonance – réponse temporelle et fréquentielle.....	48
Fig.2.9	–	Mise en place expérimentale.....	49
Fig.2.10	–	Description des essais et du questionnaire d'évaluation.....	50
Fig.2.11	–	Trajectoires enregistrées au contact.....	52
Fig.2.12	–	Force normale et vitesse au cours d'un essai.....	53
Fig.2.13	–	Taille des axes de l'ellipse en fonction de la force appliquée.....	53
Fig.2.14	–	Biplot de corrélation.....	56
Fig.2.15	–	Espace maximal atteignable par l'extrémité de l'index.....	59
Fig.2.16	–	Espace maximal atteignable par la pulpe au contact.....	59

## Chapitre 3

Fig.3.1	–	Expérience de Bensmaïa et Rissner.....	65
Fig.3.2	–	Expérience permettant de comprendre l'importance de la structure périodique de l'empreinte dans la vibration de contact.....	65
Fig.3.3	–	Mécanismes de création des interférences en géométrie sphérique.....	69
Fig.3.4	–	Géométrie du problème en l'absence de texture.....	70
Fig.3.5	–	Effet de « baffle » de la sphère en champ libre.....	73
Fig.3.6	–	Géométrie du problème en présence de la texture.....	75
Fig.3.7	–	Amplification résultant de l'effet pavillon calculée pour trois positions azimutales du microphone à angle polaire constant.....	77
Fig.3.8	–	Proposition de correcteur pour le filtrage passe-bas.....	78

## Table des figures

Fig.3.9	– Dispositif expérimental pour la mesure microphonique.....	79
Fig.3.10	– Temps de réverbération de la chambre sourde mesuré grâce à une impulsion sonore et calculé par la formule de Sabine.....	80
Fig.3.11	– Méthode de contrôle de la force d'appui.....	81
Fig.3.12	– Caractéristiques directionnelles en fonction de la fréquence et courbe de réponse en fréquence.....	82
Fig.3.13	– Analyse du contenu temps-fréquences (STFFT) et échelle-temps (DCWT).....	83
Fig.3.14	– Ondelette de Meyer.....	85
Fig.3.15	– Transformée en ondelette continue fonction de la vitesse (entre 10 et 20 cm.s <sup>-1</sup> ) et de la direction de rotation (distale à gauche et proximale à droite) de la roue crantée.....	87 -
Fig.3.16	– Détail de la CWT entre les échelles 27 et 57 pour le signal obtenu à 25 cm.s <sup>-1</sup> dans la direction proximale-distale. ....	88 89
Fig.3.17	– Preuve d'un contact non permanent .....	91
Fig.3.18	– Mécanismes potentiellement impliqués dans l'émergence de sources de bruit au contact.....	93
Fig.3.19	– Stick-slip du doigt modélisé comme un patin.....	95
Fig.3.20	– Forces d'adhésion sur la pulpe du doigt et configuration des cavités à l'interface.....	96
Fig.3.21	– Modélisation de l'air pumping par une approche compression ou « squeeze ».....	98
<b>Chapitre 4</b>		
Fig.4.1	– Dispositif expérimental pour la mesure au vibromètre LASER Doppler.....	104
Fig.4.2	– Comparaison de mesures acoustiques et vibrométriques supportant l'hypothèse d'un rôle frictionnel des crêtes épidermiques.....	105
Fig.4.3	– Transformée en ondelette continue fonction de l'angle d'inclinaison du doigt.....	107
Fig.4.4	– Explications sur les différences de comportement à basse fréquence.....	108
Fig.4.5	– Mesure de la vibration transférée à la phalange distale grâce à un accéléromètre.....	109
Fig.4.6	– Analyse par ondelettes des réponses impulsionnelles captées dans la direction normale.....	110
Fig.4.7	– Mesures de la taille des aspérités du relief de l'empreinte digitale.....	114
Fig.4.8	– Mise en place expérimentale. a) Posture du sujet portant un casque audio. b) Schéma de la position des textures dans la boîte et de leur masquage. c) Stimuli apparents en fonction de l'orientation des plaques.....	114
Fig.4.9	– Intensité de la rugosité perçue fonction de l'angle relatif en degrés et des stimuli présentés.....	116
Fig.4.10	– Schéma du montage de l'accéléromètre sur la lame immobilisée.....	118
Fig.4.11	– Réponse du système à un chargement impulsionnel.....	118
Fig.4.12	– Mouvement dirigé du doigt, exemple de distribution temporelle des accélérations pour une séquence, spectres RMS de TFCT. ....	119
Fig.4.13	– Moyennes des valeurs absolues maximales et des valeurs quadratiques moyennes de l'accélération en fonction de l'orientation relative.....	120
Fig.4.14	– Réponse du système à un chargement impulsionnel appliqué par une pointe.....	122
Fig.4.15	– Mesure vibratoire dans la direction normale durant l'exploration d'une ligne.....	122
Fig.4.16	– Distribution temporelle de la valeur instantanée de l'accélération mesurée et transformées continues en ondelettes.....	123
Fig.4.17	– Détail de plaque rainurée et de la position du doigt par rapport au capteur qui y est attaché.....	124
Fig.4.18	– Valeur RMS des signaux temporels obtenus pour chaque plaque caressée latéralement parallèlement (0°) aux rainures d'empreinte et perpendiculairement (90°).....	125

## Table des figures

---

Fig.4.19	Transformées de Fourier sur instants courts (TFCT).....	126
Fig.4.20	– Distribution temporelle de l'accélération mesurée dans la direction normale pour la plaque 3 dans la condition 0° et CWT.....	127
Fig.4.21	– Enregistrement du déplacement de la surface au vibromètre et restitution.....	129
<b>Chapitre 5</b>		
Fig.5.1	– SENSOTACT®.....	137
Fig.5.2	– Descripteur rugueux et détail de ses cinq échantillons.....	138
Fig.5.3	– Explication simplifiée du critère physique retenu par Roques-Carmes et son équipe.....	139
Fig.5.4	– Profil de rugosité pour les échantillons Tan Ra 15, 40, 75 et 100.....	140
Fig.5.5	– Stimuli haptique et mesure embarquée sur le doigt effectuée en chambre anéchoïque....	142
Fig.5.6	– Traitement des signaux.....	143
Fig.5.7	– Exemples d'échantillon par texture SENSOTACT® et scalogrammes associés.....	145
Fig.5.8	– Pression acoustique efficace mesurées sur le panel en fonction des notes.....	146
Fig.5.9	– Moyennes multipliées par 1000 des coefficients de détail pour chaque note dans chaque niveau de détail.....	148
Fig.5.10	– Classification ascendante hiérarchique.....	149
Fig.5.11	– Motifs obtenus sur des sphères de pâte à modeler.....	152
<b>Chapitre 6</b>		
Fig.6.1	– Tactor C2®.....	158
Fig.6.2	– VITAL.....	158
Fig.6.3	– Interface à moteurs radiocommandés à structure étagée.....	158
Fig.6.4	– Attraction ou répulsion d'aimants attachés sur la peau.....	158
Fig.6.5	– Optacon™.....	159
Fig.6.6	– Afficheur tactile piézoélectrique large bande.....	159
Fig.6.7	– Stimulateur tactile constitué de 88 éléments piézoélectriques alignés.....	159
Fig.6.8	– Système combiné utilisant un empilement de cristaux piézoélectriques.....	159
Fig.6.9	– Transducteur à ultrasons.....	159
Fig.6.10	– Interface à fluide électro-rhéologique.....	159
Fig.6.11	– Softness display interface.....	160
Fig.6.12	– Buses à expulsion d'air déformant une matrice de chambres en silicone.....	160
Fig.6.13	– Dispositif à succion localisée.....	160
Fig.6.14	– Dispositif d'étude de la perception du glissement.....	161
Fig.6.15	– « Slip Aestheasis ».....	161
Fig.6.16	– Le « SFD » (Shear force Display ou afficheur de forces de cisaillement).....	161
Fig.6.17	– Dispositif d'étirement de la peau dans la direction latérale.....	161
Fig.6.18	– Ondes élastiques se propageant dans une plaque dont la largeur décroît graduellement.....	161
Fig.6.19	– Utilisation de deux pots vibrants pour permettre l'infiltration d'air sous pression au contact et créer ainsi une lubrification.....	161
Fig.6.20	– Stimulation latérale de la peau à impédance mécanique contrôlable.....	162
Fig.6.21	– STRESS au design modulaire monté sur un pantographe.....	162
Fig.6.22	– Afficheur tactile SAW.....	162
Fig.6.23	– Afficheur tactile électrostatique à fin film.....	162
Fig.6.24	– Proposition de schéma de stimulation multiéchelle basée sur l'événement et compatible avec un processus d'exploration stochastique.....	167
<b>Annexes</b>		
Fig.A.1	– Recueil de l'empreinte à force d'appui et angle d'inclinaison contrôlé.....	175
Fig.A.2	– Taille des axes de l'ellipse en fonction de la force appliquée.....	175

## Table des figures

---

Fig.B.1	– a) Allure des fonctions de Bessel, de b) Neumann et module de la fonction de Hankel de deuxième espèce.....	177
Fig.B.2	– Allure des fonctions de Legendre normalisées pour les quatre premières harmoniques.....	178
Fig.C.1	– Spectre de puissance du bruit du système moteur–roue « à vide ».....	180
Fig.D.1	– Représentation imagée des différences d’approche entre la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes.....	181
Fig.D.2	– Fenêtrage ou analyse d’une portion de signal.....	183
Fig.D.3	– Calcul effectué pour $M=16$ avec l’outil Matlab Window Design and Analysis.....	184
Fig.D.4	– Différences entre les écarts types en temps et en fréquence du spectrogramme et du scalogramme.....	186
Fig.D.5	– DCWT avec l’ondelette de Meyer d’un signal sinusoïdal.....	190
Fig.D.6	– Banc de filtres associé à la transformée en ondelettes discrètes.....	192
Fig.D.7	– Ondelette de Meyer et sa fonction d’échelle.....	193
Fig.D.8	– Ondelettes de Haar, Daubechies ( $N = 2, 3, 4, 5, 10, 40$ ), Coiflets ( $N = 3, 4, 5$ ).....	194

---

## Liste des tableaux

---

### Chapitre 1

Tab.1.1	– Gestes, invariants et typicités associés aux procédures exploratoires.....	10
Tab.1.2	– Présentation des méthodes de mesures dédiées à l'identification des rôles de barrière physico-chimique de la peau.....	27
Tab.1.3	– Transition de la phase d'adhérence à la phase de glissement dans l'établissement du contact normal et le démarrage du geste du toucher latéral.....	29

### Chapitre 2

Tab.2.1	– Intensité des forces appliquées et leur contrôle.....	47
Tab.2.2	– Statistiques descriptives.....	53
Tab.2.3	– Observations ayant le plus contribué à la formation du facteur F1.....	57
Tab.2.4	– Paramètres de la transformation.....	58

### Chapitre 3

Tab.3.1	– Apports des études basées sur de la mesure optique à notre problématique.....	66
Tab.3.2	– Correspondances entre les échelles et fréquences centrales pour une ondelette de Meyer échantillonnée à 25,6 kHz.....	84
Tab.3.3	– Valeur moyenne des Kurtosis des distributions de coefficients pour les ondelettes de Haar, Meyer, Daubechies (2, 3, 4, 5), Symlets (4) et Coiflets (3, 4, 5).....	86

### Chapitre 4

Tab.4.1	– Correspondance entre les échelles et fréquences centrales pour une ondelette de Meyer échantillonnée à 100 kHz.....	106
Tab.4.2	– Accélération crête à crête en $m.s^{-2}$ fonction de l'angle et du sens.....	109

### Chapitre 5

Tab.5.1	– Rappel des correspondances entre les échelles et fréquences centrales pour une ondelette de Meyer échantillonnée à 25,6 kHz.....	144
Tab.5.2	– Décomposition dyadique sur huit niveaux avec l'ondelette discrète de Meyer.....	147
Tab.5.3	– Valeur moyenne des kurtosis calculés par bande de détail.....	147
Tab.5.4	– Analyse par bande de détail des corrélations entre les notes du descripteur « râpeux » et les moyennes des coefficients de la décomposition.....	152

### Annexes

Tab.D.1	– Description des fenêtres d'apodisation courantes.....	184
---------	---------------------------------------------------------	-----

---

## Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Alcove (agir et collaborer sur des objets virtuels complexes) de l'INRIA et du projet de conception de stimulateurs tactiles, STIMTAC supporté par l'IRCICA<sup>1</sup>.

Dans un contexte de recherche sur les ajouts de couplage sensorimoteur entre l'homme et les environnements artificiels générés par un ordinateur, nous voulons mieux comprendre les interactions complexes du toucher de texture, pour les modéliser et les simuler.

Un afficheur tactile posé sur un bureau pourrait permettre, lorsqu'on l'effleure avec la pulpe du doigt, avant bras posé, de ressentir des propriétés de surface virtuelle affichée sur un écran, comme sa rugosité ou son adhérence. La maîtrise technologique de la conception et de la commande d'effecteurs visant à simuler de telles sensations pourrait révolutionner la vente de tissus dans le e-commerce ou encore le diagnostic dermatologique.

Un effort considérable de recherche reste toutefois nécessaire avant de voir apparaître ces nouveaux liens entre l'homme et la machine. Ceci est particulièrement vrai pour les textures dont les aspérités sont de petites dimensions devant la pulpe du doigt. On ne sait pas encore pourquoi, dans le cas réel, l'homme a besoin de déplacer son doigt sur ces surfaces pour les percevoir de façon optimale. Elles sont pourtant les plus intéressantes à simuler car elles apportent un complément d'information à la vision.

Dans ce contexte, nous avons essayé de prendre provisoirement du recul par rapport aux problèmes d'ordre technologique, pour faire face au challenge de compréhension du rôle du mouvement dynamique dans la perception de la texture. C'est la raison pour laquelle cet ouvrage est consacré à l'instrumentation et à l'analyse du toucher de texture. Nous espérons, grâce à nos résultats, ouvrir la voie à de nouvelles méthodes de simulation de l'interaction doigt-texture.

Nos recherches bibliographiques sur la dynamique du toucher de texture nous ont conduits à rédiger une synthèse des aspects psychophysiques, neurophysiologiques et biomécaniques impliqués pour aborder ce sujet. Un tour d'horizon multidisciplinaire des connaissances en toucher de texture est par conséquent proposé dans un premier chapitre. Ce travail ne nous a pas permis d'accéder à une description suffisante du mouvement volontaire. Ensuite, nous n'avons pas pu discerner la nature du phénomène physique exploré. Enfin, tant les travaux de biomécanique nous ont enseigné l'importance de l'empreinte digitale dans les mécanismes du contact tactile, tant sa participation à la perception de la texture a été très peu étudiée et est aujourd'hui considérée comme nulle. C'est la raison pour laquelle nous proposons une contribution à l'étude du rôle du mouvement impliqué dans l'interaction du toucher entre un doigt et une texture.

---

<sup>1</sup> Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'Information et la Communication Avancée

Cette analyse des travaux antérieurs nous conduit, dans un deuxième chapitre, à débiter notre travail expérimental par l'étude des aspects moteurs impliqués pour appréhender la texture. Les aspects cinématiques du mouvement dirigé à l'échelle du doigt sont mesurés et décrits statistiquement pour permettre une analyse des invariants stratégiques mais aussi pour fournir des explications sur la variabilité entre les observations. En conclusion de ce chapitre, nous proposons, par l'étude de la dynamique du contact doigt-texture, de mieux comprendre quels effets recherchés sur la peau pourraient justifier cet effort physique.

Dans un troisième chapitre, nous abordons les phénomènes tribologiques impliqués dans le frottement en utilisant une approche vibroacoustique. Nous proposons de mesurer les variations de pression dans l'air avec un microphone à proximité de l'aire de contact pour obtenir une mesure image des contraintes imposées aux structures en surface. Nous modélisons les phénomènes d'interférence en géométrie sphérique pour garantir une influence négligeable de l'environnement dans la pondération fréquentielle applicable aux signaux. Dans l'expérience en chambre sourde, la peau est stimulée par une roue crantée actionnée par un moteur à ultrasons inaudible. Ceci nous conduit à effectuer une analyse échelle-temps. Nous trouvons alors des évolutions complexes des phénomènes dynamiques en fonction du mouvement relatif et une participation forte de l'empreinte aux mécanismes vibratoires à l'interface.

Le quatrième chapitre met en évidence l'importance des relations spatiales entre les textures du doigt et du matériau lorsqu'elles possèdent des dimensions similaires. Après avoir validé l'analyse du chapitre précédent par la mesure vibrométrique, nous cernons d'autant plus l'importance des crêtes épidermiques de l'empreinte dans les mécanismes dynamiques de la perception de la rugosité. Une série d'expériences avec des reliefs de texture commensurables avec les rainures de l'épiderme nous conduit à proposer une théorie, stochastique et multiéchelle de la perception de la rugosité de la texture: le mouvement volontairement aléatoire permet de générer des emboîtements dont la qualité détermine l'intensité de la rugosité perçue.

Dans le chapitre cinq, nous essayons de confronter notre explication aux textures originales du descripteur râpeux du SENSOTACT<sup>®</sup>, outil d'analyse sensorielle qui a été élaboré par Renault<sup>®</sup> et Quitessence<sup>®</sup>. Nous analysons les corrélations entre classes de sons images des effets superficiels et de la pénétration de la peau dans la texture avec la perception de la rugosité. Nous montrons que le mouvement aide à la perception de la rugosité en sollicitant les interactions sur l'empreinte mais que ce mécanisme a un poids négligeable dans le jugement dès qu'il y a macrocourbure de la peau entre les aspérités éloignées.

Le dernier chapitre offre, en complément d'étude, un état de l'art sur les afficheurs tactiles et des premières recommandations de conception formulées à partir des résultats de nos travaux.

# Chapitre 1

## Analyse des connaissances en toucher de texture

### Sommaire

---

<b>1.1 Motivations pour une meilleure compréhension du toucher de texture.....</b>	<b>4</b>
1.1.1 Importance fonctionnelle du toucher.....	4
1.1.2 Challenge de la texture.....	5
1.1.3 Attractivité des applications.....	6
<b>1.2 Sensations, perceptions et couplage sensorimoteur de la modalité.....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Description du système haptique.....	6
1.2.2 Rôle de l'exploration active ou de l'intérêt du couplage sensorimoteur.....	8
1.2.3 Procédures exploratoires du toucher actif.....	9
1.2.4 Discussion.....	10
<b>1.3 Somesthésie.....</b>	<b>11</b>
1.3.1 Proprioception, extéroception, thermoception et nociception.....	11
1.3.2 Description générale des récepteurs de l'information haptique.....	11
1.3.3 Caractérisation des mécanorécepteurs cutanés.....	12
1.3.4 Acheminement et traitement de l'information sensorielle depuis les fibres.....	14
<b>1.4 Sensibilité aux stimuli haptiques.....</b>	<b>16</b>
1.4.1 Dimension des stimuli candidats à la sensation.....	16
1.4.2 Acuité spatiale du système sensoriel.....	16
1.4.3 Sensibilité aux vibrations continues.....	17
1.4.4 Discussion.....	18
<b>1.5 Physique du toucher : des phénomènes multiéchelles.....</b>	<b>18</b>
1.5.1 Techniques de mesure des forces et des déplacements.....	19
1.5.2 Description à plusieurs niveaux : la main, la pulpe, la surface de la peau.....	20
1.5.3 Identification et modélisation du comportement mécanique du membre.....	21
1.5.4 Identification et modèles analytiques de la rhéologie des tissus.....	23
1.5.5 Modèles numériques à l'échelle des tissus.....	24
1.5.6 Comportement biomécanique en surface de la peau.....	25
1.5.7 Aspects tribologiques.....	26
<b>1.6 Déterminants de la perception de la rugosité de texture.....</b>	<b>30</b>
1.6.1 Étude des formes possibles de codage de la texture.....	30
1.6.2 Premières observations en faveur de la vibration.....	31
1.6.3 Implication des mécanismes intensifs et spatiaux.....	32
1.6.4 Arguments pour l'influence d'une dimension temporelle.....	34
1.6.5 Intégration intermodale des indices de texture.....	35
<b>1.7 Discussion sur le besoin de mieux caractériser le toucher latéral.....</b>	<b>37</b>

---



Par l'avènement du cinéma et de la télévision, les sens de la vision et de l'ouïe ont été étudiés de façon privilégiée au XX<sup>ème</sup> siècle. Aujourd'hui, les recherches en analyse sensorielle se focalisent complémentaiement sur le goût, l'odorat et le toucher. Si pendant longtemps ces travaux à dimension subjective ont pu paraître secondaires, nous espérons ou au contraire appréhendons que, prochainement, leurs résultats ne modifient considérablement notre existence tant nous sommes physiologiquement dépendants du sensoriel. Avec les recherches en industries agroalimentaires et cosmétiques, on connaît à présent mieux l'influence de la composition sur les préférences olfactives et gustatives. Pourtant ces études n'arrivent toujours pas à fournir des recommandations de formulation déterminant la qualité hédoniste, porteuse de sens biologique, symbolique et social du produit [Mac93].

La complexité qualitative et quantitative de la perception haptique ne permet même pas encore d'envisager une telle maîtrise car l'interaction physico-chimique entre l'homme et les objets n'est pas bien comprise. On le voit particulièrement pour les textures fibreuses, dont l'état de surface, à lui seul sans même considérer une interaction tactile, est déjà très délicat à évaluer d'un point de vue tribométrologique [TBBD05]. De plus, même si nous sommes capables de différencier les matières de manière très subtile par leurs propriétés de surface, nous éprouvons beaucoup de difficulté à nommer, mémoriser et classifier ces sensations par rapport aux couleurs.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les mécanismes de la perception haptique de la texture ; mais auparavant, commençons par rappeler les raisons de notre intérêt pour le domaine.

## **1.1 Motivations pour une meilleure compréhension du toucher de texture**

### **1.1.1 Importance fonctionnelle du toucher**

L'homme utilise le sens du toucher pour interagir physiquement avec son espace péri-personnel composé du monde et de ceux qui l'entourent. Le toucher est intentionnel et témoigne d'une implication volontaire dans une interaction physique. Par la nécessité de contact avec les objets environnants, l'homme, pour toucher, s'expose potentiellement au danger. Il peut même, par une éventuelle pénétration dans l'espace personnel d'autrui, outrepasser l'espace d'intimité [Mac00]. Ceci explique pourquoi certaines personnes ne considèrent pas le toucher comme naturel, plaisant ou informatif. Cependant, de nombreuses études, et plus particulièrement celles d'Hatwell et Stréri [HSG00], montrent le rôle fondamental de cette modalité sensorielle dans le développement des compétences telle l'habileté par exemple, au cours des cycles de la vie. Robles-De-La-Torre [RDLT06] explique que la déficience haptique a des conséquences catastrophiques sur la dextérité, la marche et bien d'autres facultés chez l'individu. De plus, ce dernier ne peut compenser une telle incapacité sensorielle en ayant recours à d'autres sens.

Le toucher est une modalité sensorielle aux fonctions riches et particulières. Afin de les décrire de manière originale et synthétique, nous avons trouvé judicieux de nous inspirer de la terminologie de Cadoz [Ca94] constituée de primitives qualifiant les fonctions du geste. L'homme touche pour connaître, agir et communiquer et en cela, les fonctions du toucher sont respectivement épistémiques, ergotiques et/ou sémiotiques.

*Fonction épistémique* : cette fonction cognitive permet des comportements d'identification, de discrimination ou de surveillance de l'environnement. Elle permet d'explorer la complexité du vivant, facilite la formation d'images mentales et l'accès au savoir. De manière ludique ou récréative, cette fonction peut permettre des expériences hédonistes en gratifiant un sens du confort et de l'esthétique grâce à la « tactilité » des objets. De cette façon, les sensations résultant de la caresse de la soie ou de l'interaction avec un jouet articulé peuvent procurer du plaisir. La fonction épistémique est activée indépendamment de la présence de geste : c'est aussi à partir de celle-ci que nous détectons la présence d'un moustique sur la peau.

*Fonction ergotique* : cette fonction de transport est associée à la notion de travail et à la capacité à transformer l'environnement par la manipulation ou la saisie. Cette fonction est intimement liée à l'activité musculaire et implique un transfert d'énergie entre les membres et l'environnement. Elle n'implique pas nécessairement un déplacement significatif des membres, c'est le cas lorsque l'on retient une porte ou que l'on s'agrippe à quelque chose.

*Fonction sémiotique* : cette fonction de communication non verbale permet l'expression et peut apporter un couplage bidirectionnel entre les hommes. Le toucher peut évoquer des symboles [HI05]. On y trouve des comportements de toucher affectif comme le tapotement dans le dos, le toucher de contrôle visant à entraîner une modification d'attitude (« vous avez quelque chose sur la joue »), le toucher rituel comme la poignée de main qui régule les relations interpersonnelles, et le toucher ludique qui permet de communiquer une information en mimant une activité de la réalité. On peut dire qu'en cela, il comporte une dimension sociale.

Grâce à ses fonctions, le toucher nous apporte un fort potentiel à interagir avec notre environnement. Pourtant, les couplages entre l'homme et le monde qui l'entoure, plus particulièrement avec les textures l'habillant, ne sont pas encore bien compris.

### 1.1.2 Challenge de la texture

La texture désigne communément une organisation superficielle de la matière sur un objet solide, identifiable soit visuellement, soit tactilement. Sa dimension esthétique est d'une importance primordiale puisqu'elle peut donner des indices sur des comportements mécaniques des objets. Ainsi, la perception visuelle des surfaces alimentaires dans l'assiette, mais aussi haptique lors du transport transport à la bouche sans couvert peuvent être très cohérents avec le comportement rhéologique perçu lors de la mastication. À titre d'exemple on prendra le cas d'une semoule « granuleuse » ou d'une rhubarbe « fibreuse ». La texture peut aussi contribuer par son frottement à la dextérité de saisie lors de la manipulation ou au contraire favoriser un mouvement relatif par un glissement approprié.

Dans ce contexte, le toucher de texture « fine » que nous allons en première instance définir comme une interaction de contact avec un état de surface dont l'espacement entre les éléments est inférieur à 1 mm, est un sujet de recherche particulièrement effervescent dans de nombreux domaines de recherche : psychophysique, biomécanique, neurophysiologie, mécatronique, etc... D'abord, son identification ou sa discrimination est facilitée par l'exploration tactile ou mouvement volontaire des membres qui compense alors les limites des performances visuelles

humaines. Toutefois, on ne connaît pas encore clairement la finalité de cet effort physique à la perception. Également, nous pouvons nous interroger sur la nature des contraintes sur les membres supérieurs. Si pour la texture grossière, celles-ci mènent à des déformations sur la peau qui sont des images du relief de texture, les effets différents sur les membres résultant d'interactions de frottement lors de l'exploration de texture fine restent encore obscurs. Enfin, dans un contexte de design d'afficheurs tactiles, compte-tenu des possibilités d'intégration offertes par les nouvelles technologies de capteurs et d'actionneurs permettant de mesurer ou d'opérer une mise en mouvement vibratoire des structures, nous aimerions simuler l'exploration de textures fines. Par conséquent, il nous semble pertinent de nous questionner sur la nature des contraintes dynamiques à générer sur la peau pour y parvenir.

### 1.1.3 Attractivité des applications

De nombreux secteurs d'activité souhaiteraient bénéficier d'une amélioration des connaissances sur les mécanismes du toucher de textures pour améliorer la performance de leurs produits ou services. À titre d'exemple nous citerons la médecine, l'informatique (e-commerce, réalité virtuelle), le design de l'industrie automobile, du jouet, des articles de sport, de l'aviation, de l'emballage, du textile, des cosmétiques.

Dans un contexte de *pathologie* ou de *déficience sensorielle* (maladie de Raynaud, cécité), une maîtrise des mécanismes du toucher de texture peut aider à la définition des diagnostics ou à proposer des solutions de substitution. On peut aussi envisager un apport pour les simulateurs médicaux de palpation en dermatologie ou encore la téléopération.

Pour réagir à l'*hyperchoix sur les marchés* et aux *exigences polysensorielles* du consommateur, il est important de connaître les mécanismes de sensibilité au caractère plaisant de la matière (tactilité). De manière parallèle, ceci peut aussi optimiser la démarche de conception produit dans un contexte où, par exemple, on chercherait à remplacer des matières naturelles par des matières artificielles.

En *réalité virtuelle*, où les environnements synthétiques générés par la machine doivent se comporter de manière tangible (du latin *tangere* : toucher), la disponibilité de cette dimension sensorielle est un prérequis indispensable à l'immersion et à la performance. Le contact direct provoque d'abord l'impression d'intervenir à l'intérieur des mondes avec un minimum d'abstraction interposée plutôt que de diriger ce qui s'y produit de l'extérieur. Dans les environnements virtuels collaboratifs, il peut également, comme dans le cas réel, renforcer les expériences partagées entre les hommes.

## 1.2 Sensation, perception et couplage sensorimoteur de la modalité

### 1.2.1 Description du système haptique

Le système haptique est composé de trois sous entités. Comme le montre la figure 1.1, le système sensoriel peut recevoir des informations de l'extérieur mais aussi du système moteur. Le

couplage sensorimoteur à l'environnement peut soumettre le système sensoriel à des contraintes extéroceptives élémentaires sollicitant notre sensibilité périphérique au tact, à la douleur ou à la température. Il peut aussi générer des contraintes proprioceptives stimulant une sensibilité plus « profonde » à des effets internes et provoqués par une propagation à longue distance des forces extérieures. Le système moteur agit, quant à lui, sur les entrées sensorielles par des contraintes proprioceptives en relation avec la position et le mouvement des membres.

Le flux haptique est bidirectionnel entre le système sensoriel et le système moteur colocalisés (voir bulle de la figure 1.1). La portée des communications dans la « boucle haptique » détermine le passage de la sensation à la perception. À courte portée, l'absence d'interprétation permise par l'apprentissage et la mémoire ne permet que des sorties du système sensoriel sous forme de sensation (à ne pas confondre avec l'émotion ou l'impression) ou de « perception immédiate », et de décharges vers le système moteur. À plus longue portée, un troisième sous-système appelé système cognitif régule le toucher. Il exploite le « feedback » apporté par le système sensoriel pour produire des consignes de mouvement pour le système moteur qui sont appropriées à une intention d'exploration des propriétés haptiques de l'environnement.

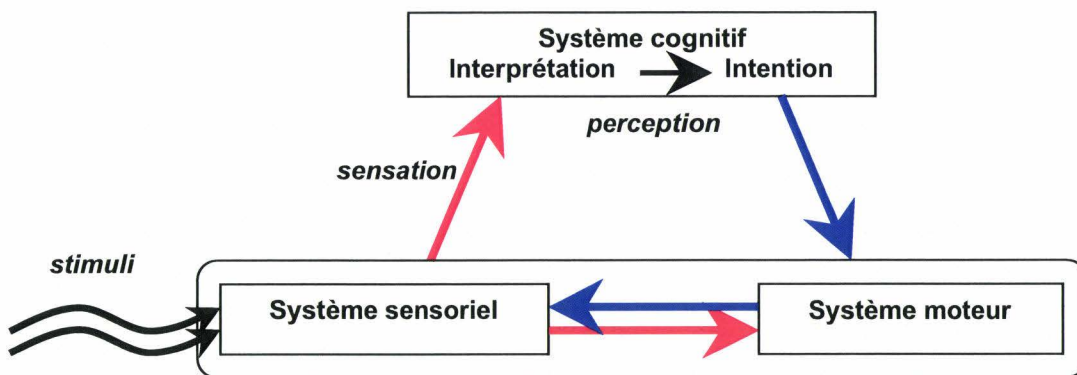


Fig. 1.1 – Système haptique et ses sous-systèmes sensoriel, moteur et cognitif

En partant de cette description, dans notre étude, la « sensation » fera toujours référence à une réception de donnée brute issue du système sensoriel qui est non interprétée. La « perception », quant à elle, renverra à l'image mentale porteuse de sens ou de cohérence par rapport à l'expérience, formée suite à une interprétation des sensations par le système cognitif. On dit souvent qu'elle contribue à la construction d'une « réalité ».

### 1.2.2 Rôle de l'exploration active ou de l'intérêt du couplage sensorimoteur

L'exploration haptique est une démarche volontaire de perception dans le sens où elle inclut l'intention, la manipulation, la sensation et son interprétation qui peut elle-même donner lieu à une nouvelle intention. Pourtant, on peut se demander quel est l'apport de la motricité à la perception haptique puisque le mouvement volontaire apparaît être une action plutôt réservée aux fonctions ergotiques ou sémiotiques du toucher. Des stimuli tactiles peuvent toujours être subis et

interprétés correctement en l'absence d'intervention calculée du système moteur. Par exemple, une piqûre de guêpe peut être perçue simplement par expérience par un homme immobile ou endormi.

Dans un livre publié en 1846, Weber note déjà l'importance de l'action dans la perception tactile [Web46]. Il affirme que l'on ne peut ni découvrir la forme, ni découvrir la texture d'un objet test si on ne déplace pas le doigt à sa surface. De même, en 1925, Katz [Ka25] considère que la richesse du monde palpable n'est accessible que par le mouvement. Ces deux auteurs pensent qu'en conditions passives (au sens où il y a absence de mouvement), la taille du champ perceptif est très réduite puisqu'elle est nécessairement semblable à celle du stimulus. Les conditions actives permettent de compenser cette exigüité et d'appréhender certains traits caractéristiques dans leur intégralité.

En 1852, dans *Mémoire sur la décomposition de la pensée* (tome 2), Maine de Biran [GDB02], philosophe, suggère que le toucher actif ne puisse être équivalent au « tact passif » en termes de communication. En toucher passif, nos sens nous révèlent des « existences étrangères » par des « signes » mais une « traduction » est ensuite nécessaire. En toucher actif, il existe une forme de « communication directe entre l'être moteur et les autres existences, entre le sujet et le terme extérieur de l'effort » qui « entend immédiatement le langage de la nature extérieure ». La volonté concourt ici avec une force extérieure à former la perception. Dans cette description, le toucher passif déclenche des sensations tandis que le toucher actif concourt à la formation des perceptions.

Par contre, Gibson définit le toucher passif comme un mécanisme de codage isolé de stimuli sensoriels par un observateur immobile [Gib62]. Il présente le toucher actif comme une réaction à un problème d'interprétation du sens à donner aux éléments saillants qui en ressortant prioritairement masquent leur contexte. L'exploration liée à l'action ou mouvement dirigé devient alors une démarche volontaire d'apprentissage en permettant la détection et la différenciation d'invariants environnementaux, stimuli non imposés. Par la découverte d'affordances, propriétés de l'environnement révélant au sujet ses potentialités d'interaction, la recherche d'indices peut être facilitée car le sujet a déjà acquis, par développement ou apprentissage antérieur, une capacité de compréhension de ces informations.

En accord avec cette approche, il existe une forme particulière d'exploration active quand l'objet est tenu dans la main et utilisé : le « toucher dynamique » [CT00]. Pour Turvey, le tenseur d'inertie (le toucher est alors statique si les forces inertielles sur les membres sont constantes) est un invariant dont les valeurs et vecteurs propres permettent la perception de la taille, forme et orientation. Cependant, l'échelle d'analyse du phénomène semble a priori impropre à la généralisation au cas de la texture.

Pour certains, la définition de Gibson est trop large car elle repose sur deux critères : la disponibilité et le contrôle du mouvement kinesthésique [LL84]. C'est la raison pour laquelle une distinction plus raffinée entre les conditions actives et passives a été proposée. En conditions passives, l'afférence kinesthésique (sensation liée au mouvement) est incluse de telle sorte que seul le contrôle actif de l'efférence kinesthésique (ici motricité planifiée et non effective) et les

informations issues des commandes motrices (non sensorielles) appelées décharges corollaires ou copies d'efférences pourraient distinguer les deux formes de toucher. En accord avec Loomis et Lederman [LL84], cette notion de contrôle sera étendue à l'utilisation de consignes gestuelles adaptées à la transduction des propriétés physiques recherchées (cf. section 1.2.3 qui suit). Symmons et ses collègues [SRW05] résument bien la conception généralement acceptée : le toucher actif dénote un contrôle personnel du lieu et de l'endroit où l'on atteint et reçoit l'information haptique. Il suffit qu'une entité externe affecte sa qualité pour que les conditions deviennent passives. En accord avec la précédente description du système haptique (section 1.2.1 pp. 6-7), c'est cette définition du toucher actif, exploration totalement libre et régulée par le système cognitif, qui sera retenue.

Birznieks [Bir03] propose une distinction neurophysiologique intéressante reliée au caractère actif-passif du comportement des objets touchés. Lorsque des objets « prévisibles » sont manipulés, les sujets utilisent l'information sur le but et le contexte et activent des programmes neuronaux permettant de générer des commandes motrices à partir de la mémoire procédurale. Il s'agit d'objets passifs. Les sujets réagissent différemment aux objets actifs. Comme ils sont imprévisibles, le contrôle est réactif (en accord avec Gibson) et s'effectue sous forme de prévisions à court-terme.


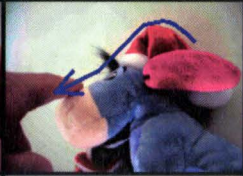


Compte tenu des différentes définitions entre le caractère actif et passif du toucher, des résultats sur l'analyse des performances qui sont dépendants des procédures expérimentales et des stimuli, nous ne pouvons pas vraiment conclure sur la supériorité liée au contrôle (définition de Loomis). Toutefois, la littérature amène raisonnablement à faire l'hypothèse de meilleures performances en conditions actives (définition de Gibson), pour le toucher de textures [Rob02] fines [GA01] et rigides [SM95]. Le lecteur désireux d'approfondir ses connaissances pourra se référer à la réflexion de Loomis et Lederman [LL84] et aux travaux récents de Richardson et son équipe [SRW05][SRW00], riches en références bibliographiques.

### 1.2.3 Procédures exploratoires du toucher actif

Afin de vérifier s'il existe réellement un « piggibacking » ou acquittement des fonctions sensorielles en fonctions motrices, Lederman et Klatzky ont fait l'hypothèse suivante : si la motricité améliore les performances de discrimination, alors un mouvement exploratoire dédié à la recherche d'une information haptique devrait être privilégié. L'observation des mouvements d'exploration a montré des comportements invariants en fonction d'un objectif de connaissance, ici, la propriété physique explorée. Ces procédures exploratoires ou « fenêtres » sont invoquées non seulement parce qu'elles sont suffisantes, mais parce qu'elles sont optimales, voire nécessaires à l'extraction d'une propriété physique [LK87].

Les propriétés haptiques accessibles sur les surfaces texturées se déclinent en grandeurs tribologiques et géométriques selon l'échelle à laquelle s'effectue l'exploration du relief (rugosité, forme, courbure,...), rhéologiques (élasticité, dureté, relaxation...) et thermodynamiques (conduction, convection,...). Toutefois des études de positionnement multidimensionnel entre surfaces texturées ont révélé que la rugosité est l'attribut le plus

important [HBKY00] suivi de la dureté. Aussi, en psychophysique, il est généralement d'usage d'utiliser le mot « texture » de manière interchangeable avec l'expression « rugosité de surface ». Toutefois, nous ne nous limitons pas encore à cette propriété particulière de surface et présentons quatre procédures exploratoires candidates au toucher surfacique : le toucher latéral, le suivi de contour, l'appui normal et le contact statique. Chacune possède des invariants et typicités. Le tableau 1.1 récapitule les quatre stéréotypes de mouvement volontaire [LK87].

<b>Gestes</b>				
<b>Invariants</b>	mouvement latéral	suivi de contour	force ou d'un couple appliqué à une partie mobile	contact statique
<b>Typicités</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-frottement sous forme d'allers-retours</li> <li>-zone petite et homogène</li> <li>-exploration des surfaces intérieures plutôt que des contours</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- recherche de forme exacte</li> <li>-mouvement non répétitif</li> <li>-arrêts ou changements de direction</li> <li>-ne se produit pas sur une surface homogène</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-objet stabilisé</li> <li>-signes évidents d'application d'une force comme lorsque l'on frappe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-la main repose sur l'objet</li> <li>-pas d'ajustement au contour de l'objet</li> </ul>

Tab. 1.1 – Gestes, invariants et typicités associés aux procédures exploratoires

#### 1.2.4 Discussion

Nous avons détaillé la composition en trois entités du système haptique, chacune jouant un rôle dédié dans les mécanismes de la sensation et de la perception. Partant du constat de leur interaction, nous nous sommes demandé ce que la boucle sensorimotrice du système haptique apporte réellement aux sensations et perceptions. Les résultats des différents travaux antérieurs mettent en évidence que la motricité permet non seulement d'élargir un champ d'exploration, mais surtout que son contrôle met à disposition des fenêtres d'exploration privilégiées à l'extraction de l'information.

Toutefois, la littérature ne s'étend pas davantage sur la caractérisation de la dynamique du toucher à l'échelle du système-main bras. Pour répondre à la question de son rôle dans les mécanismes perceptifs de la texture, il est nécessaire de bénéficier d'une meilleure caractérisation de ces stratégies. Notre deuxième chapitre visera à atteindre cet objectif.

À présent, voyons quels sont les éléments constitutifs du système sensoriel permettant de former la sensation tactile.

### 1.3 Somesthésie

#### 1.3.1 Proprioception, extéroception, thermoception et nociception

Le toucher implique deux types de sensibilités, l'une proprioceptive et profonde appelée sensibilité kinesthésique [LL86], se rapportant à un ressenti de phénomène physique atteignant l'intérieur du corps; et l'autre extéroceptive et superficielle que l'on appelle communément sensibilité cutanée orientée vers l'environnement. On l'appelle aussi « tact ». Comme le montre la figure 1.2, selon la nature de la tâche effectuée, ces deux systèmes influent de manière plus ou moins prononcée dans la médiation du ressenti haptique [LT01]. Ainsi le système kinesthésique intervient de manière plus prononcée lors des tâches de manipulation et de communication, tandis que le système cutané intervient plutôt lors de situation d'identification ou de discrimination de surface, pour évaluer des phénomènes à petite échelle.

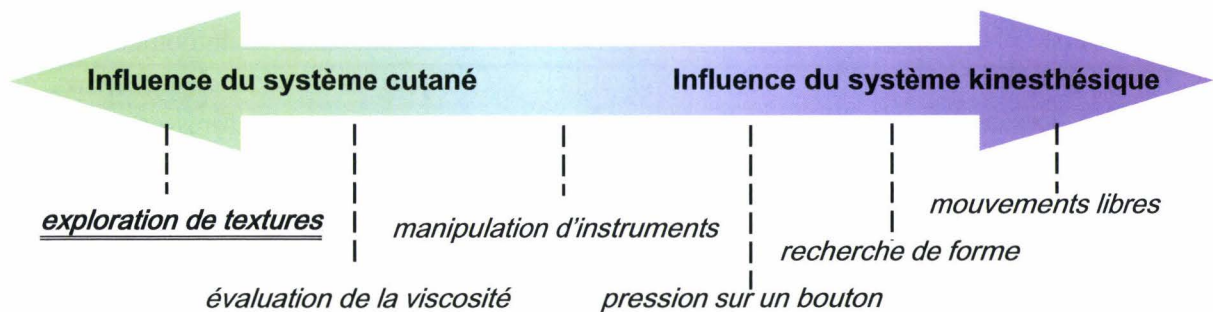


Fig. 1.2 – Influence des systèmes tactiles (inspiré de [LT01])

Le toucher est également associé à la sensibilité à la température (thermoception) et à la douleur (nociception). Toutefois, on a longtemps cru que ces sensations étaient régies par des canaux sensoriels complètement séparés du tact. De ce fait, on a analysé la thermoception et la nociception sous l'influence de la théorie de la séparabilité de Von Frey (fin 19<sup>ème</sup> siècle). Cet auteur faisait l'hypothèse qu'un neurone ne pouvait répondre qu'à une seule forme de stimulation. Même si on sait aujourd'hui que cette théorie n'est pas valide, la thermoception et la nociception doivent tout de même être traitées de manière « spéciale », comme des systèmes à part entière par rapport à l'extéroception et la proprioception à cause de la haute sélectivité des neurones [Gre04]. Ceci n'exclut pourtant pas des interactions entre les sous-systèmes de la somesthésie et des influences de la température sur les terminaisons comme les disques de Merkel [KV70] présentés dans la sous-section suivante.

#### 1.3.2 Description générale des récepteurs de l'information haptique

Le codage de l'information tactile dans la peau glabre de la main humaine s'effectue grâce à une population d'unités tactiles (environ 17000 dans la main [VJ04]) à terminaisons sensorielles reliées à des fibres de différents diamètres qui conduisent l'information au cerveau.



Les terminaisons sensorielles de la *sensibilité kinesthésique* ou récepteurs tendineux musculaires renseignent sur l'état dynamique d'étirement du tendon ou de contraction du muscle. Parmi ces transducteurs, on distingue :

- des récepteurs ligamentaires de Golgi quasi statiques, sensibles à la position de l'articulation et à la tension des ligaments reliés aux fibres ou axones myélinisés  $A_\alpha$ .
- des récepteurs capsulaires de Ruffini sensibles aux phases statiques et dynamiques des mouvements articulaires et des récepteurs de Pacini, sensibles aux accélérations de ces mouvements reliés aux fibres  $A_\beta$ .

La *sensibilité cutanée* aux stimuli mécaniques est due aux mécanorécepteurs de la peau (fig.1.3). Ceux-ci pourraient être aussi impliqués dans la sensibilité au mouvement [Edi04]. Parmi ces transducteurs de la peau glabre reliés aux fibres  $A_\beta$ , on trouve les disques de Merkel, les cylindres de Ruffini, les corpuscules de Meissner et les capsules sphériques de Pacini.

Les terminaisons nerveuses libres s'adaptent très lentement aux stimuli et permettent l'acquisition de l'information de température, de démangeaison mais aussi de la douleur. Ainsi, les thermorécepteurs répondent à des températures spécifiques ou à des changements de température. Les nocicepteurs sont sensibles aux pressions intenses, températures extrêmes ou brûlures chimiques (fibres  $A_\delta$  ou C si les nocicepteurs sont polymodaux).

### 1.3.3 Caractérisation des mécanorécepteurs cutanés

De nombreuses communications ont proposé des caractérisations du rôle et de la sensibilité des organes terminaux de Merkel, Ruffini, Meissner et Pacini. Si ce sujet est encore controversé, les résultats des travaux de Johnson et de ses collègues [JH92][Joh01], mais aussi de l'équipe de Johansson [JV83][VJ84] constituent de bonnes références sur le sujet dont les résultats sont généralement acceptés. Avant d'aborder une description en terme de sensibilité spatiotemporelle du système sensoriel, commençons par présenter les caractéristiques générales des mécanorécepteurs de la peau. Parmi les terminaisons neuronales qui transforment les contraintes mécaniques en potentiels d'action déchargés dans les fibres, on trouve (figure 1.3 page 13) :

- les *disques de Merkel*. Ces mécanorécepteurs à forme aplatie sont localisés dans les vallées de l'épiderme. Ils sont au nombre de 100 par  $\text{cm}^2$ . Ils répondent à une large gamme de déformations appliquées sur la peau, localisées ou non. Ils reflètent la distribution spatiale des densités d'énergie de déformation dans la peau avec une précision d'environ 0.5 mm sur leurs champs réceptifs qui mesurent de 2 à 3 mm. Leurs réponses sont indépendantes de la force d'application (précontrainte) dans le sens où ils sont surtout sensibles aux déviations de l'uniformité spatiale [BJ97][VBJ99]. Ainsi, ils sont très sensibles aux arêtes, aux coins, à la courbure, à l'orientation des objets et seraient majoritairement responsables de la perception du relief de la texture. Ils répondent aussi de manière forte et soutenue à l'étirement latéral et peuvent permettre de distinguer la direction de glissement. Ils sont aussi beaucoup plus sensibles aux stimuli dynamiques que statiques [JYV00].

- les *cylindres de Ruffini*. Ils innervent la peau de manière beaucoup moins dense que les autres mécanorécepteurs et sont situés dans le derme. Ils répondent mieux à l'étirement d'ensemble de la peau que les disques de Merkel, mais sont moins précis spatialement, et beaucoup moins sensibles à l'indentation normale. On considère qu'ils ne sont pas ou peu impliqués dans les mécanismes de la sensation résultants de contraintes de cisaillement et d'étirement localisées. Il pourrait par contre être prématuré d'affirmer qu'ils ne participent pas aux mécanismes de la perception de la texture. En effet, ils permettent le retour d'information sur le mouvement dirigé à basse vitesse [Edi04] ce qui est peut être important pour le bon déroulement de l'exploration (cf. 1.2.3 page 9). Ils expliquent certainement que la vibration d'un tendon s'accompagne d'une illusion de flexion du membre [CRG00].

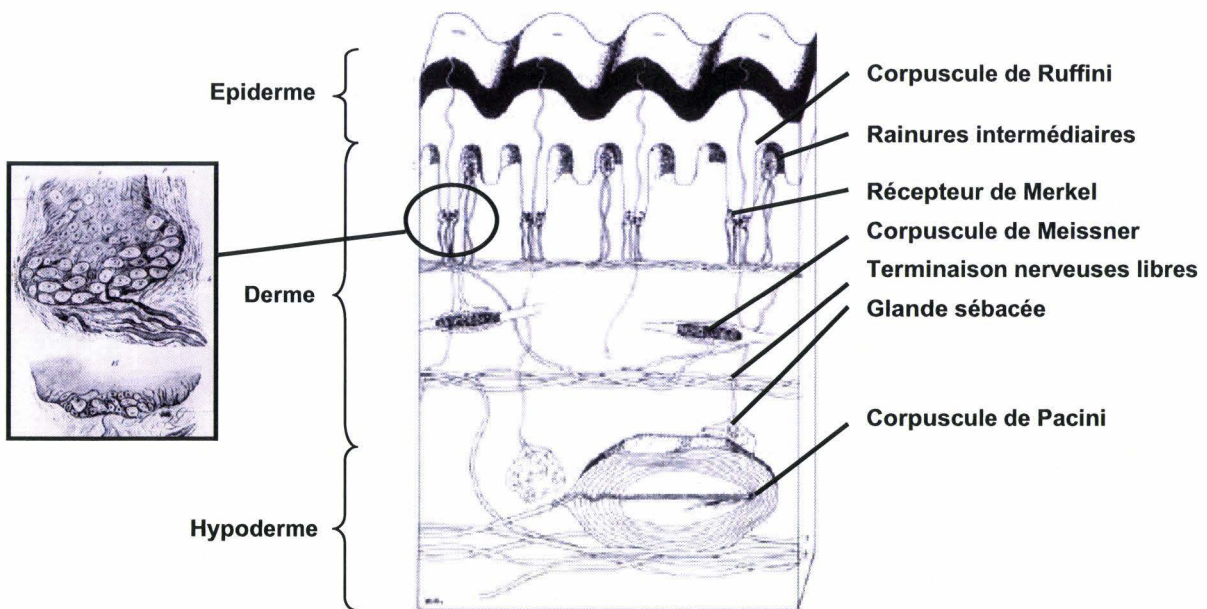


Fig. 1.3 – Vue en coupe de la pulpe du doigt (représentation de [Goo98]) et détail des « tastzellen » ou disques du toucher de Friedrich S. Merkel (tirés de sa publication originale de 1875).

- les *corpuscules de Meissner*. Ces piles de cellules aplaties situées immédiatement sous l'épiderme renseignent sur la vitesse au contact, les palpitations, le glissement et permettent de détecter les détails minces d'une surface pendant un frottement [SWL90]. Ils sont plus nombreux que les précédents avec une densité de 150 par  $\text{cm}^2$ . Ils sont essentiels au contrôle des forces de saisie des objets et leur réponse est encore significative lorsque le niveau de détail des stimuli dépasse la capacité de réponse des disques de Merkel [LW86][BCJ06b]. Ils sont insensibles aux stimuli statiques mais sont bien plus performants pour les contraintes dynamiques que les derniers. Ces transducteurs biologiques ne répondent qu'à des stimuli de faible profondeur [BJ97] et ont une faible acuité spatiale bien que nombreux.

- les *capsules sphériques de Pacini*. Il existe environ 300 corpuscules de ce type par doigt et 800 dans la main. Ces capsules, faites de plusieurs couches superposées, sont extrêmement

sensibles, bien plus encore que les mécanorécepteurs de Meissner, aux phénomènes dynamiques qu'ils soient continus ou transitoires. Elles n'ont pas ou très peu de résolution spatiale. Typiquement, elles seules traduisent les contraintes de faible intensité à haute fréquence lors du glissement ou de contact avec des détails nanométriques [SWL90].

Michel Paré et son équipe [PSR02] observent chez le singe une distribution relativement diffuse des axones qui innervent les corpuscules de Meissner, ainsi qu'une répartition des cellules de Merkel sur 80% de la base des rainures intermédiaires. La profondeur des corpuscules de Pacini, ainsi que la distribution des mécanorécepteurs de Ruffini, plutôt établie sur le pourtour de l'ongle que sur les tendons, les conduit à penser que les mécanorécepteurs de Meissner et Merkel sont les terminaisons les plus appropriées, d'un point de vue biomécanique, et sur des critères de propagation, pour relayer les entrées mécaniques superficielles du toucher latéral.

Dans la littérature les disques de Merkel, cylindres de Ruffini, corpuscules de Meissner et capsules de Pacini sont regroupés en fonctions des propriétés dynamiques en sortie de l'unité tactile qu'ils terminent et de leur champ récepteurs. Dans la littérature, elles sont appelées de deux manières : unités SAI (slowly-adapting), SAI, RA (rapidly-adapting), PC (pour pacinian) ou encore SAI, SAI, FAI (fast-adapting), FAI (équipe de Johansson). Cette dernière terminologie précise mieux l'étendue spatiale du champ récepteur (I pour un champ petit aux limites bien définies, II pour un champ de grande dimension aux frontières mal localisées).

#### 1.3.4 Acheminement et traitement de l'information sensorielle depuis les fibres

Les afférences kinesthésiques et cutanées transitent par les fibres SAI, SAI, RA et PC à une vitesse comprise entre 50 et 75 m.s<sup>-1</sup> [JV03] pour se regrouper autour de la corde spinale. Puis, elles atteignent le thalamus, le traversent et arrivent ensuite dans la partie antérieure du cortex pariétal où se situe la partie primaire (figure 1.4 page 15) qui contient quatre régions appelées aires de Brodmann 1, 2, 3a, 3b. Pour identifier les différentes zones d'activité du cerveau lors du toucher, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (fMRI) est généralement utilisée. On prend une image à haute résolution utilisée comme carte de référence, puis on effectue de nombreux balayages à basse résolution permettant de mesurer le niveau d'oxygénation dans le sang et donc la distribution spatiale de l'activité cérébrale par transformée de Fourier sur instants courts ou mieux, par ondelettes.

Lors de l'exploration de la texture, l'aire 3a répond principalement aux stimuli des propriocepteurs, les aires 1 et 3b aux stimuli cutanés. Les neurones de l'aire 2 répondent aux deux types de stimuli [AFH04] mais reçoivent plus particulièrement les afférences cutanées profondes et proprioceptives articulaires. Les aires 5 et 7 du cortex pariétal postérieur sont les lieux d'intégration et de formation de l'image mentale des différentes sensations car elles contiennent des neurones multimodaux sensibles à des stimuli plus complexes [Ka196]. Le cortex somatosensoriel secondaire (SII) reçoit des projections du cortex primaire (SI) et provoque des afférences dans l'amygdale et l'hippocampe (mémoire et apprentissage). De nombreuses interconnexions existent entre ces structures, les aires visuelles mais aussi les aires prémotrices et motrices [Kaa95], mais l'organisation générale des échanges reste encore difficile à évaluer.

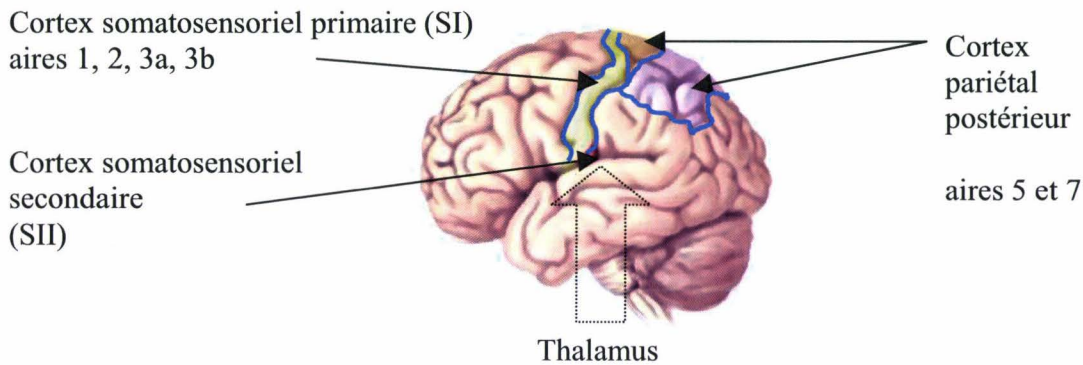


Fig. 1.4 – Aires de Brodmann

*Codage de l'intensité des stimuli* : depuis 1920, il est reconnu que l'information d'amplitude est transmise de manière fréquentielle par le taux de décharges ou nombre de potentiels d'action en transit dans les neurones par unité de temps. En dimensions logarithmiques, cette information d'intensité ( $I_{sensation}$ ) est décrite par la loi de Stevens [Ste57]. Celui-ci propose une fonction linéaire de puissance bâtie avec l'intensité du stimulus supraliminaire  $S - S_{seuil}$  en accord avec la loi de Weber, le nombre  $n$  de canaux parallèlement stimulés et une constante que nous appellerons  $k$ . La loi de Stevens s'écrit :

$$\log(I_{sensation}) = kn \log(S - S_{seuil})$$

*Codage de la localisation des stimuli* : à chaque type de mécanorécepteur est associée une taille de champ récepteur et la localisation s'effectue par gradient d'intensité entre les fibres.

*Codage de la fréquence des stimuli* : lorsqu'un stimulus reste constant dans la durée, la fréquence des potentiels d'action décroît en fonction du temps d'application. La vitesse de cette adaptation dépend du type de neurones spécialisés. Ainsi les disques de Merkel (SAI) et cylindres de Rufini (SAII) sont des mécanorécepteurs à adaptation lente qui émettent une information tonique (intensité et durée) tandis que les corpuscules de Meissner (RA) et capsules de Pacini (PC) s'adaptent rapidement et permettent un codage phasique de l'information basé sur la variation d'intensité du stimulus dans le temps. Des recherches récentes [JYV00] suggèrent un comportement plutôt phasico-tonique des mécanorécepteurs de type SAI.

Cependant, ces codes ne permettent pas à eux seuls d'expliquer l'incompatibilité entre la dynamique des taux de décharge et la complexité des contraintes/déformations impliquées dans la discrimination de surfaces complexes. Aussi, Johansson et Birznieks ont suggéré en 2004 que la coordination ou la séquence temporelle des décharges issues des fibres SAI, SAII et RA contiendrait un code suffisamment riche et rapide permettant de retranscrire les phénomènes mécaniques produits sur la peau [JB04]. Ce code reposerait plus sur l'ordre de réception des informations ou recrutement des neurones primaires reliés aux fibres SAI et RA.

## **1.4 Sensibilité aux stimuli haptiques**

Nous venons de voir en section 1.3.4 (pp. 14-15) que le système sensoriel de la modalité haptique possède des capacités d'acquisition, ainsi que de traitement de l'information d'amplitude, de distribution spatiale, et d'évolution temporelle. Nous allons à présent préciser notre description par un état de l'art visant à donner un aperçu plus concret des performances dans ces trois domaines : amplitude (section 1.4.1), espace (section 1.4.2), fréquence (section 1.4.3 page 17). Nous insistons particulièrement sur l'importance de la spécificité des procédures expérimentales qui ont permis d'obtenir ces ordres de grandeur.

### **1.4.1 Dimension des stimuli candidats à la sensation**

Johansson et LaMotte [JL83] ont mesuré les seuils de détection de la hauteur d'un point en toucher actif. Ils ont trouvé des seuils de détection moyens respectifs de 1.09, 2.94 et 5.97  $\mu\text{m}$  pour des points de diamètre 602, 231 et 40  $\mu\text{m}$ . LaMotte et Whitehouse [LW86] montrent par méthode microneurographique que pour un point de 550 $\mu\text{m}$  de diamètre, le canal RA répond au dessus de 2  $\mu\text{m}$ , le SAI au-dessus de 8  $\mu\text{m}$ . Une rainure de 0.075  $\mu\text{m}$  de hauteur (44  $\mu\text{m}$  de largeur) peut même être détectée grâce aux corpuscules de Pacini [LS91]. En termes de discrimination, Tan et son équipe [TATK06] évoquent un seuil de 3.9  $\mu\text{m}$  pour une texture à profil sinusoïdal de longueur d'onde égale à 2.5 mm et d'amplitude de référence de 50  $\mu\text{m}$ . En termes de sensibilité à l'amplitude de vibrations continues l'ordre de grandeur varie de 20  $\mu\text{m}$  en quasi statique à 0.1  $\mu\text{m}$  à 250 Hz. Pour l'amplitude vibratoire la fraction de Weber avoisine 25 % [Jon00]. Le canal pacinien répondrait encore pour des déplacements de 10 nm d'un cylindre tenu dans la main [BHJ99]. En termes de pression, Levin [Lev78] trouve des seuils de détection variant de 30 kPa chez la femme à 60 kPa chez l'homme en utilisant des filaments de Semmes-Weinstein (similaire à la technique de von Frey).

La sensibilité tactile dépend fortement du type de contrainte appliqué sur la peau. Pour une sonde collée sur la pulpe du doigt, de 1 mm de diamètre, se déplaçant à très basse vitesse (1 Hz, amplitude égale à 1.5 mm), Biggs et Srinivasan [BS02b] montrent que pour obtenir des sensations comparables avec un cisaillement de pulpe du doigt par une sonde à une compression de référence de 1.5 mm, le déplacement tangentiel doit être égal à deux tiers du déplacement normal et la force appliquée cinq fois plus élevée. Pour une autre preuve de l'importance des conditions expérimentales, on pourra aussi se référer à Gould et ses collègues [GVL79] qui montre que pour détecter la direction du mouvement un étirement pur de la peau de 0.6 mm (sonde collée) a la même efficacité qu'un passage d'une sonde sur 4.4 mm (étirement et translation).

### **1.4.2 Acuité spatiale du système sensoriel**

L'acuité spatiale tactile est aussi très dépendante du type de stimuli [TDT05]. Elle varie non seulement en fonction de la partie du corps, d'environ (moyenne) 1 mm sur les lèvres, la langue

et le bout du doigt à 40 mm sur le dos ou le ventre ; mais aussi avec l'âge de 1 à 4 mm pour l'extrémité du doigt [Jon03].

En psychophysique, on la quantifie grâce à la limite de distinction entre deux points (two-point limen), l'évaluation de l'orientation de plaques rainurées ou de crans (GO pour « grating or gap orientation ») ou encore la discrimination entre surface lisse-surface crantée (SG pour smooth-grooved). Les stimuli peuvent ainsi être statiques ou dynamiques.

Les recherches sur les performances haptiques en discrimination spatiale ont commencé avec Weber [Web48] qui utilisait une sorte de compas à deux pointes pour mesurer à partir de quelle distance deux points étaient ressentis comme distincts. Ces recherches reprises et complétées par Weistein [Wei68] indiquent des seuils de différenciation les plus bas de 2.5 mm sur le bout du doigt et une erreur de localisation de 1.5 mm. Dans une recherche sur l'évolution de l'acuité spatiale en fonction de l'âge, Stevens rapporte des variations de 1.95 mm à 5.03 mm pour les plus âgés [Ste92].

Les approches GO et SG ont permis de montrer que ces valeurs tendaient à sous-estimer l'acuité spatiale du système sensoriel. Grâce à une expérience de détection statique (GO), Philips et Johnson [PJ81] ont apporté des preuves qu'aucune information ne peut contribuer au processus de décision en ce qui concerne l'orientation de rainures présentées de façon statique tant que leur période spatiale reste inférieure à 1 mm. Cette distance correspond d'ailleurs à la résolution du canal SAI. En 1994, Van Boven et Johnson expliquent que le seuil de distinction entre deux points n'est pas le seuil d'acuité spatiale et précisent une valeur de 0.94 mm avec une tâche de type GO [VBJ94]. L'être humain est capable de discriminer des différences de largeur de rainure de 0.2 mm lorsque les stimuli sont imposés sur sa main immobile. Une longueur minimale de 0.8 mm est nécessaire à la détection de l'orientation [WG00].

La présentation du cas dynamique est plus délicate puisque l'on ne sait pas vraiment si la détection ou la discrimination s'effectue vraiment grâce aux performances spatiales. Philips et Johnson [PJ81] concluent sur une largeur de rainure de 0.2 mm à une tâche SG dynamique. Une étude de Loomis sur l'hyperacuité spatiale a permis de montrer que le déplacement d'un point effleuré (diamètre de 0.7 mm et hauteur de 1.3 mm) vers la gauche ou la droite à partir d'une position initiale (effleurement) peut être détecté avec une précision de 170  $\mu\text{m}$  [Loo79].

### 1.4.3 Sensibilité aux vibrations continues

Dans une étude [JLL82], la réponse des mécanorécepteurs cutanés à des déplacements sinusoïdaux appliqués perpendiculairement à la peau glabre de la paume de main, variant en amplitude (de 0.002 à 1 mm) et en fréquence (de 0.5 à 1024 Hz) a été présentée. Le critère de définition de la sensibilité est neurologique : c'est le nombre d'impulsions nerveuses par période d'onde sinusoïdale et non un seuil de détection. Les mécanorécepteurs de type SAI et SAII sont les plus sensitifs en dessous de 32 Hz, ceux de type RA entre 8 et 64 Hz et les PC entre 64 et 1000 Hz. Si les maxima de sensibilité se déplacent seulement de quelques Hz pour les unités SAI et SAII, la valeur des fréquences auxquelles les RA et PC sont les plus sensibles sont très

dépendantes de l'amplitude des stimuli. Il est intéressant de noter que ces réponses varient en fonction de la température [LW86].

Le seuil de détection humain issu d'études psychophysiques pour la détection des vibrations d'un simple indenteur est d'environ 28 dB pour un signal crête à crête d'amplitude 1µm de 0.4 à 3 Hz. Il décroît de -5 dB/octave entre 3 à 30 Hz puis de -12 dB/octave entre 30 et 250 Hz [BGV88]. Ces changements de pente obtenus pour des stimuli appliqués perpendiculairement à la paume de main avec un contacteur circulaire vibrant, après indentation statique de 0.5 mm, sont assez cohérentes avec les réponses neurophysiologiques [JLL82]. Il existe de nombreuses autres études sur la perception de la vibration avec des contacteurs simples ou multiples (cf. [BS02a]).

Pour la fréquence, la fraction de Weber peut être prise comme étant égale à 20 % et une évolution temporelle du déplacement est détectée dès 0.4 Hz [Jon00].

#### 1.4.4 Discussion

Dans la section précédente, nous avons décrit le système sensoriel à l'image d'une chaîne de mesure, puis présenté ses performances spatiotemporelles. La lecture de cette synthèse peut donner l'impression d'une connaissance actuelle poussée des mécanismes de la sensation haptique. Ainsi, connaissant les caractéristiques des biocapteurs et leur contribution à la sensation dans le cas de stimuli élémentaires, nous pourrions avoir envie d'utiliser ces résultats pour comprendre des interactions plus complexes. Il nous faut être prudents. Si cet état de l'art a indéniablement révélé des ordres de grandeur qu'il est important de connaître en situation d'analyse du toucher, il faut garder à l'esprit le protocole expérimental de ces travaux. Ce dernier impose toujours, par un choix de posture, de conditions d'application et de type de stimuli, et bien d'autres facteurs encore, un conditionnement spécifique de l'énergie mécanique qui parvient aux mécanorécepteurs. C'est la raison pour laquelle, avant même d'aborder les déterminants perceptifs de la texture, il nous semble particulièrement important d'apporter un socle de connaissance biomécanique sur notre sujet. En nous intéressant aux échelles des membres, des tissus et de la peau, nous allons immédiatement étudier les facteurs influençant la transmittance mécanique aux terminaisons des unités tactiles avant conversion mécanoélectrique.

### 1.5 Physique du toucher : des phénomènes multiéchelles

*« La mécanique de la peau et des tissus sous cutanés est aussi centrale au toucher que l'optique de l'œil à la vision ou encore l'acoustique de l'oreille à l'ouïe. »*

*Mandayam Srinivasan*

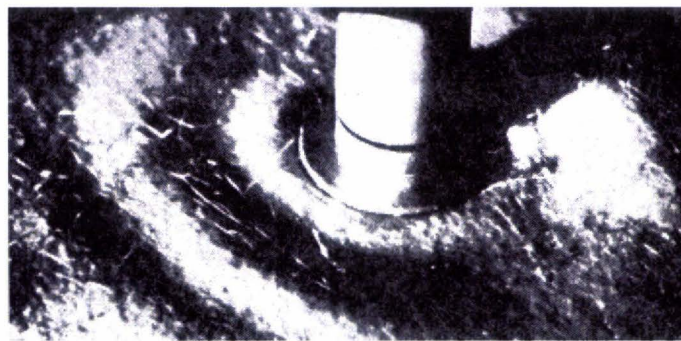
La perception tactile repose sur les états de contrainte/déformation des membres imposés par les contacts périphériques et les muscles. Dans cette partie, nous allons voir jusqu'à quel point les propriétés physiques du doigt humain lui donnent une dimension de filtre ou d'amplificateur de signaux mécaniques.

### 1.5.1 Mesure des forces et déplacements sur la peau

Avant de parler de modèles, il nous est apparu important de commencer par une description des techniques de mesure courantes qui permettent d'identifier les comportements qui mènent aux relations mathématiques.

Depuis le début des années 90, la mesure des forces et des déformations sur la pulpe du doigt est devenue un challenge particulièrement motivant. De fait, le toucher est un sens de contact que l'on ne peut espérer comprendre ou même simuler sans connaître précisément les phénomènes dynamiques à l'interface doigt-texture.

*Capteurs de force / pression* : les capteurs de force ou de pression à une ou plusieurs sorties (six ddl pour l'ATI Gamma utilisé par Smith et son équipe [SCD02]) ou encore les matrices d'éléments électroactifs [Paw97] sont les plus couramment utilisés. Plus récemment, on a constaté une tendance forte à la miniaturisation [LN99] des propositions avec l'apparition des MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), à l'innovation sur les principes de fonctionnement comme le montre le capteur tactile à fibre optique gravée d'un réseau de Bragg [HCL05], et à la réduction des coûts comme le suggère l'exemple du « clou » proposé par le CEA Leti [CEA06]. On retiendra aussi la photopléthysmographie ou utilisation de diodes électroluminescentes et de photodétecteurs fixés sur l'ongle [MA04] qui permet une mesure peu précise spatialement, mais non invasive dans l'interaction tribologique doigt-texture. Ces solutions ne permettent pas encore de mesurer précisément la distribution spatiale des contraintes sur la peau imposées lors de l'exploration de la texture. La « poussière intelligente » pourrait venir à bout de ces limites.



**Fig. 1.5 – Photographie de la propagation d'une onde de Rayleigh à la surface de la peau velue obtenue par illumination stroboscopique.**

*Mesure des déplacements* : les techniques optiques ont été les plus utilisées pour la mesure des déplacements et déformations. Roby, Dandekar et Srinivasan ont placé des marqueurs sur la pulpe du doigt pour analyser les déformations de la peau [RDS94]. En s'inspirant d'études en criminologie et de la méthode de Srinivasan utilisée en 1986, [LW86], Levesque et Hayward [LH03] utilisent une caméra pour enregistrer la séquence des motifs d'étirements latéraux créés par le bout du doigt en glissement sur une surface transparente. Cette technique est compatible avec des motifs simples comme des trous ou des bosses. La déformation de la peau peut être mesurée jusqu'à une fréquence de 60Hz avec une précision spatiale de 88 $\mu$ m à partir de la



position des pores sur la peau. Technique très ancienne, l'imagerie sonoélastique [FGOW51] a révélé qu'en plus des ondes de compression et de traction se propageant dans le volume des tissus, des ondes de surface (figure 1.5, page 19) peuvent se propager sur la peau velue suite à la mise en vibration par des forces périodiques ou impacts. Aujourd'hui, l'élastographie acousto-optique permet une meilleure qualité de mesure [Kir03]. La mesure des vibrations sur la peau peut également être permise par un transducteur à effet Hall [BH03] ou encore par vibrométrie [RMS99][CM05]. On peut aussi attacher un réflecteur à la peau et mesurer la déflexion d'un faisceau LASER (effectué sur un bilame excitant la peau [WH06a]). On remarquera aussi l'utilisation de la résonance magnétique pour suivre l'évolution des formes du doigt et ainsi ajuster les modèles par éléments finis [TNYM06].

### 1.5.2 Description à plusieurs niveaux : la main, la pulpe, la surface de la peau.

Pour analyser un comportement mécanique de manière pertinente, il est ensuite important d'identifier les différentes échelles des phénomènes. C'est la raison pour laquelle nous allons proposer une décomposition du problème à trois niveaux : la main, la pulpe et la surface de la peau.

Comme le montre la figure 1.6, la main peut être considérée comme un assemblage de solides, le métacarpe et les phalanges par des liaisons rotule (articulations radio-ulnaire distale et métacarpo-phalangienne) et des liaisons pivot (interphalangiennes proximale et distale). C'est un objet articulé qui comporte 28 degrés de liberté au total dont 6 sont définis au niveau du poignet. Si on ne considère qu'un doigt, les liaisons s'effectuent en série avec 4 degrés de liberté.

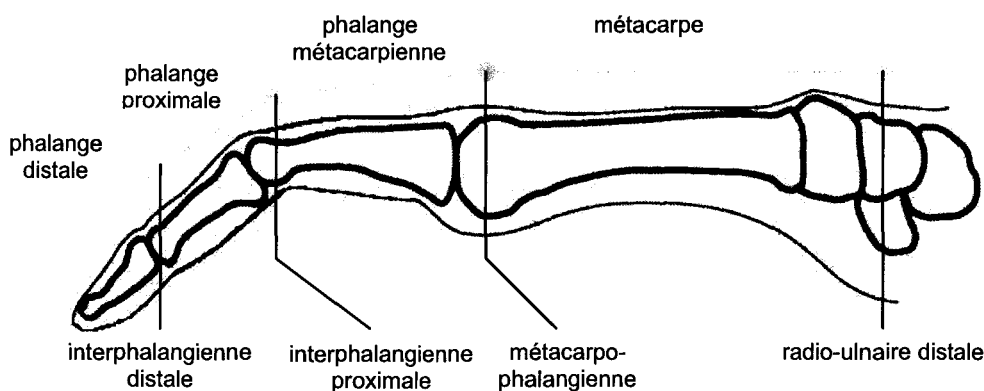


Fig. 1.6 – Représentation des articulations, du métacarpe de la main et des phalanges d'un doigt

La phalange distale consiste en un os couvert de tissus gras, l'hypoderme ( $E = 34$  Mpa, valeurs simplifiées issue de Maeno et al. [MKY98]) et de deux épaisseurs de peau glabre (par opposition à pileuse). La couche externe, appelée épiderme ( $E = 136$  MPa) mesure entre 0.07 et 0.12 mm d'épaisseur, tandis que le derme ( $E = 80$  Mpa), couche interne, mesure de 1 à 2 mm. La hauteur de ces couches peut être mesurée par microscopie confocale (sondes fluorescentes illuminées au LASER) ou par imagerie à ultrasons (rétrodiffusion par les tissus). Ces techniques

évoluées fournissent une indication sur l'élasticité des tissus. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est également performante pour permettre cette caractérisation comme le montre l'image de la figure 1.7 prise à l'échelle de la pulpe.

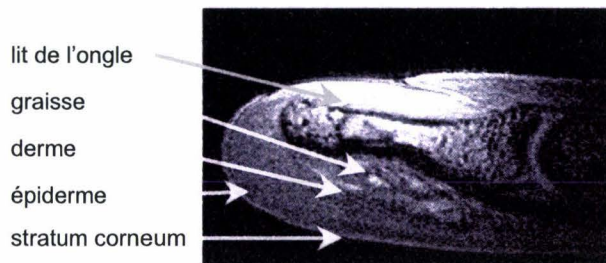


Fig. 1.7 - Imagerie par résonance magnétique de la phalange distale à 77°K [WSW99]



Fig. 1.8 - Empreinte digitale

La surface de la pulpe du doigt est caractérisée par la présence de crêtes épidermiques, lignes papillaires ou dermatoglyphes dont l'organisation géométrique forme l'empreinte digitale (fig. 1.8). Ces motifs ne peuvent être altérés (sauf mutilation ou accident) et sont formés dans les couches profondes du derme [Cau54]. Ils se répètent spatialement tous les 350  $\mu\text{m}$  et leur hauteur avoisine les 100  $\mu\text{m}$  [MKY98], comme celle du stratum corneum (figure 1.7), couche cornée faite de cellules mortes en superficie de l'épiderme. Communément à tous les individus, les crêtes épidermiques sont adjacentes sur les zones périphériques. Dans la direction proximale, elles subissent des changements de continuité appelés minuties. Les pores sont de petites ouvertures sur leur surface. Ils sont environ au nombre de cinq par  $\text{mm}^2$  [RS99]. En simplifiant, la raideur du stratum corneum est de 10 à 10000 fois plus élevée que celle du derme. Le module d'Young (élasticité) du stratum corneum varie de 2 kPa à 6 MPa dans des conditions d'humidité variant de 30 à 100 % [PB72]. Des valeurs moyennes [WH06a] de ce module de 3.61 et 1.54 MPa (empreinte étirée parallèlement et perpendiculairement à ses motifs) et comprimée de 1.36 et 0.96 MPa ont récemment été rapportées (empreinte compressée parallèlement et perpendiculairement à ses motifs).

### 1.5.3 Identification et modélisation du comportement mécanique à l'échelle du membre

La littérature fait état de nombreux modèles macroscopiques visant à identifier et modéliser l'impédance des membres supérieurs et ceci principalement en vue de parvenir à la stabilité des interfaces haptiques. On les utilise également pour décrire simplement les phénomènes de résonance subis par le système main-bras en situation d'utilisation des machines outils en vibration.

Nous allons présenter un panel non exhaustif des références les plus citées en gardant à l'esprit que l'impédance d'un membre peut considérablement varier suivant le nombre de degrés impliqués, les contraintes imposées sur la chaîne cinématique du doigt et les tâches complexes qui peuvent être accomplies.

En statique, Milner et Franklin ont cherché à évaluer la raideur du doigt dans des postures fléchies et étendues [MF98], dans les directions proximale et distale selon la direction d'application de la force. Pour cela, ils ont utilisé un cylindre appliquant des forces tangentielles sur la peau et procédé à une mesure extensométrique (effectuée grâce à des jauges de contrainte). Ils ont trouvé une anisotropie considérable en fonction de l'angle au contact. Les coefficients de raideur les moins importants sont égaux à  $0.5 \text{ N.cm}^{-1}$  et les plus importants à  $26.12 \text{ N.cm}^{-1}$  dans la direction proximale. L'extension du doigt favorise sa raideur.

Dans le cas dynamique, l'extrémité du doigt a été longtemps considérée comme une masse ponctuelle en oscillation. Aussi, des modèles linéaires du second ordre avec trois paramètres représentatifs tels que l'inertie, l'amortissement et la raideur ont été proposés. Ainsi, la réponse fréquentielle de l'index en abduction et adduction a été étudiée avec des degrés de liberté en rotation [BM90]. Pour des forces transitoires comprises entre 2 et 20 N en extension et entre 2 et 8 N en abduction, Hajian et Howe [HH97] simplifient encore cette approche. Ils représentent le doigt comme un système à un seul degré de liberté en translation en utilisant l'équation suivante :

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) = f(t)$$

Par un ajustement des paramètres de leur modèle aux données expérimentales, ils trouvent une masse comprise entre 2,7 et 6,7 g, un amortissement entre 2,2 et 4.0 N.s.  $\text{m}^{-1}$  et une raideur entre 200 et 800  $\text{N m}^{-1}$  lorsque le doigt subit des abductions avec des forces comprises entre 2 et 20 N. Leur coefficient d'amortissement  $\xi = b / 2\sqrt{mk} > 0.92$  suggère que le doigt ne subit pas d'oscillations prononcées. Dans les deux derniers travaux [HH97][BM90], la raideur et l'amortissement augmentent linéairement avec la contraction musculaire. Toutefois la fatigue musculaire ou encore l'articulation impliquée affectent fortement le comportement du système.

Comme nous l'avons précédemment évoqué, ces modèles linéaires sont les bienvenus pour permettre la commande des dispositifs à retour d'effort peu sensibles à de petites perturbations. Toutefois, ils ne reflètent pas tout à fait la réalité du comportement de la chaîne cinématique du doigt, laquelle, lorsqu'elle est soumise à des stimuli dynamiques, résonne dans des modes propres en relation avec ses propriétés structurelles et les conditions aux limites qui lui sont imposées. En utilisant un Vibromètre Laser à effet Doppler, des mesures directes de l'impédance du doigt pour des forces normales sinusoïdales faibles (0.05-0.5 N) ont été proposées [CM05]. Cette étude a été menée pour pallier des problèmes de consommation énergétique liés à la production de vibration dans les jeux de téléphone portable. Ses résultats ont permis de mettre en évidence qu'en fonction de la fréquence d'excitation, un modèle simple du second ordre ne peut rendre compte des variations des modes vibratoires excités (apparition de noeuds) de la structure. Ainsi, l'impédance ne varie plus linéairement au-dessus de 80 Hz en subissant une augmentation soudaine de sa valeur. Ce résultat est confirmé par les recherches sur la biodynamique du système main-bras [DWW05]. L'accélération transmise sur le doigt est amplifiée pour des stimuli vibratoires de fréquence égale à 100 Hz. Elle ne subit ni atténuation, ni amplification à 200 Hz

puis décroît progressivement pour atteindre  $-6$  dB à 1000 Hz. À 200 Hz, l'accélération est déjà atténuée de 40 dB si la mesure est effectuée au poignet.

#### 1.5.4 Identification et modèles analytiques de la rhéologie des tissus

De nombreux chercheurs ont utilisé des modèles de mécanique des solides pour analyser les distributions des déformations/contraintes résultant du contact haptique. Les mesures sont souvent effectuées dans le cadre d'expérience « in vivo », les tissus morts n'ayant pas un comportement mécanique du vivant. Des approches élastiques, viscoélastiques parfois formulées de manière quasi-élastique ont été proposées. Le comportement est modélisé soit très localement mais reflète alors bien les propriétés mésoscopiques des tissus ou soit de façon structurelle lorsque la géométrie doit être incluse dans la loi de comportement.

*Approches élastiques et membrane remplie de fluide incompressible* : le doigt a été modélisé comme un demi-espace élastique homogène et isotrope en déformation plane. Ce modèle permet d'évaluer les déformations infinitésimales (maximum de 1 % en allongement relatif) à des chargements de motifs rainurés et de les comparer aux profils de réponse des unités SAI [PJ81b]. Dans cette étude, il a été montré que la solution de Boussinesq modifiée de manière logarithmique par Timoshenko et Goodier représente l'approximation la plus simple de la déflexion observée du profil. Ce modèle calculé en deux dimensions est toutefois limité au cas d'inclusions ponctuelles de type ligne et aux petites déformations. Constatant de plus sa grande imprécision près des points de contact entre la peau et la texture, Srinivasan [Sri89] a par la suite proposé un modèle original pour étudier la déformation de structure à un chargement statique linéaire, le « waterbed model ». Conjointement à l'hypothèse des déformations finies d'un corps élastique, la pulpe du doigt des hommes et primates de l'expérience de validation a été considérée comme un milieu biologique riche en eau. Ceci a amené ce chercheur à considérer la pulpe comme une membrane élastique d'épaisseur négligeable remplie d'un fluide incompressible. Une autre approche a été utilisée par Pawluk [Paw97], celle du contact de Hertz. La pulpe du doigt est modélisée comme une sphère. Son module d'Young est alors modifié pour refléter les non-linéarités résultant du caractère multicouche des tissus. Ceci lui permet de proposer une méthode précise de calcul de la pression interfaciale et l'aire de contact avec des objets plats ou à géométrie sphérique. Sérina et ses collègues [SMM98] ont ensuite raffiné le modèle « waterbed » de Srinivasan [Sri89] en introduisant une membrane à élasticité non linéaire et une géométrie ellipsoïdale. Ceci permet d'introduire une inhomogénéité dans la répartition spatiale des contraintes et ce, toujours en grandes déformations. Ces modèles sont intéressants jusqu'à 15 % de déformation. Ensuite, on pourrait très bien de servir d'approches hyperélastiques (matériaux capables de subir de très grandes déformations) comme celle de Tatara de 1991 pour améliorer la description du contact dans le cas des forces d'appui élevées en introduisant des non linéarités dans le matériau, plus naturellement qu'avec la théorie de Hertz [LWB98].

*Approches viscoélastiques* : la peau de la pulpe du doigt se comporte localement comme un corps viscoélastique. Les contraintes qu'elle subit diminuent lorsqu'une déformation lui est

appliquée et maintenue constante : elle se relaxe. Elle continue à se déformer après qu'une force lui ait été appliquée et retirée : elle flue. Ses rhéogrammes présentent des cycles d'hystérésis. Pour rendre compte de ces comportements dans la direction perpendiculaire à sa surface les modèles viscoélastiques linéaires [Van89][SF98][MSTF00] de Voigt et Kelvin ont été mis à l'épreuve. Certains chercheurs [GBS98] ont proposé de tenir compte des aspects géométriques via une sphère (cas du talon facilement transposable au doigt), mais aussi d'étendre ces études à la direction tangentielle. Ces approches parviennent à une bonne modélisation de l'effet viscoélastique mais ne peuvent rendre compte de non-linéarités. Afin de décrire la réponse en force du doigt à des déplacements cycliques de la peau à basse vitesse, Pawluk et Howe [PH99] reprennent la formulation quasi-linéaire de Fung [Fun93] composée d'une fonction de réponse en force instantanée à un échelon de position  $T(x)$  et d'une fonction de relaxation dans le temps  $G(t)$ .

$$F(t) = \int_{-\infty}^t G(t-\tau) \frac{\partial T[x(\tau)]}{\partial \tau} d\tau$$

$$T(x) = \frac{b}{m} [e^{mx} - 1]$$

$$G(t) = \sum_{n=0}^M c_n e^{-v_n t}$$

Les paramètres de ces fonctions  $b$ ,  $m$ ,  $c_n$  et  $v_n$  sont alors ajustés avec des relevés expérimentaux. Superposées dans l'intégrale de Boltzmann, ces fonctions permettent le calcul de la réponse en force et ainsi l'élaboration de modèles appliqués à l'identification de matériaux touchés [KK06], à l'étude de la transmission des forces au système musculo-squelettique [JZB03] mais aussi au design ergonomique [PH99].

### 1.5.5 Modèles numériques à l'échelle des tissus

Les modèles numériques permettent de valider les modèles analytiques. Ils offrent non seulement une plus grande souplesse dans la prise en compte de l'hétérogénéité des tissus et de leur géométrie particulière, mais aussi une plus grande flexibilité dans la gamme des stimuli étudiés. Par exemple, un cran est totalement incompatible avec la majorité des approches analytiques, car on y fait l'hypothèse que le contact initial se fait par un point ou une ligne.

*Approches élastiques* : Srinivasan et Dandekar [SD96] ont testé la validité du modèle analytique de type « waterbed » par une comparaison entre les profils de déflexion de quatre géométries différentes : un milieu semi-infini, un carré fini, un cylindre et un cylindre avec une rigidité en son centre (os). Ils ont montré que la géométrie du doigt était déterminante pour décrire le profil de déformation, d'autant plus que la peau agit comme un filtre spatial passe-bas pour les mécanorécepteurs [SD96]. Ensuite, un modèle 3D à géométrie élaborée avec trois couches élastiques homogènes [DRS03] a été proposé. Il a permis de trouver un bon accord avec

les réponses des afférents nerveux de Philips et Johnson [PJ81a]. On notera aussi le modèle de Maeno et al. [MKY98] présenté en figure 1.9 sur lequel nous reviendrons plus en détail dans la section 1.5.6, puisqu'il intègre des microdétails de structure.

*Approches viscoélastiques* : ces modèles élastiques ne sont pas appropriés pour rendre compte des comportements significatifs d'hystérésis en grande déformation dynamique. Pour pallier ce problème, un nouveau modèle 2D [WDR02] est apparu où la peau a été considérée hyperélastique et les tissus sous-cutanés viscoélastiques. Seuls l'os et l'ongle sont élastiques. Le modèle a ensuite été affiné [WDS03] : la peau est hyperélastique et visqueuse tandis que les tissus sous-cutanés sont spongieux : le sang coule dans des tissus perméables et modifie fortement le comportement dynamique de la structure (modèle de matériau biphasique). La perméabilité du tissu dépend alors de sa compression. Ce modèle permet de quantifier le temps de séparation entre un indenteur en mouvement sinusoïdal sur la peau. Il montre son augmentation avec la fréquence et l'amplitude vibratoire et sa diminution fonction de la préindentation sur les tissus.

#### 1.5.6 Comportement biomécanique en surface de la peau

*Approches élastiques* : la puissance de la méthode par éléments finis a aussi permis d'aborder l'étude du rôle des microstructures de la peau comme les crêtes dermiques et épidermiques (figure 1.9) dans la répartition de l'énergie de déformation.

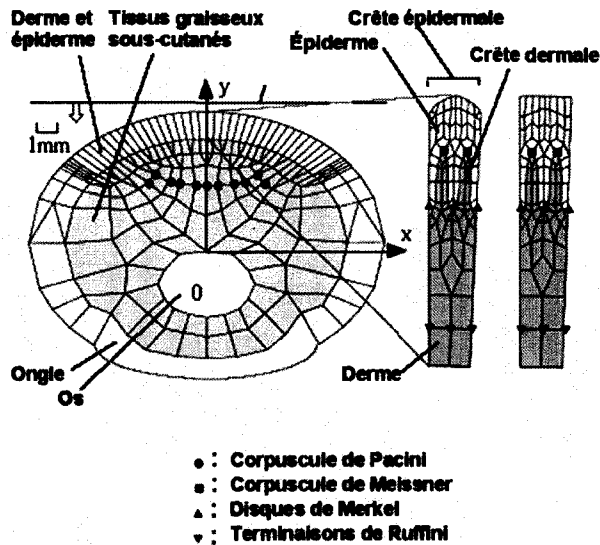


Fig. 1.9 – Modélisation de la relation entre la structure du doigt humain et la localisation des mécanorécepteurs cutanés [MKY98]. Une importance particulière est accordée à la géométrie en surface.

Ainsi, Takashi Maeno et son équipe [MKY98] montrent que les rainures épidermiques permettent d'amplifier les sensations tactiles de la saisie et du glissement en concentrant la densité d'énergie de déformation au voisinage des disques de Merkel et des corpuscules de Meissner. En utilisant le même modèle, Gerling a prouvé que les contraintes sont plus prononcées aux alentours des complexes de Merkel lorsqu'un cran exerce une contrainte statique sur la peau parallèlement aux crêtes épidermiques que perpendiculairement [GT05a]. Les crêtes dermiques jouent alors un rôle de « lentille » ou de concentrateur des champs de contraintes au voisinage des mécanorécepteurs superficiels [GT05b]. Dans une prépublication, il fournit des arguments solides contre un éventuel rôle de levier de la rainure d'empreinte sur les unités SAI : il n'y a pas de levier solide, le mouvement à une extrémité n'entraîne pas un mouvement opposé à l'autre extrémité et il n'y a pas de point d'appui [GT05c].

*Approches viscoélastiques* : la propagation d'ondes de surface sur un demi-espace viscoélastique sous contrainte dynamique d'un disque circulaire normalement à sa surface a été modélisée et vérifiée expérimentalement [RMS99] avec un gel aux propriétés rhéologiques proches de celles des tissus humains. On retiendra que le terme spatial de la solution à l'équation de propagation a pour solution une fonction de Bessel. Pereira, Mansour et Davis expliquent qu'elle est aussi dépendante de la fréquence des stimuli imposés sur la peau, de la précontrainte [PMD91a] et des propriétés des tissus sous-jacents [PMD91b].

En complément de nombreux travaux *in vitro* bien détaillés dans leur communication, Wang et Hayward [WH06a] ont récemment proposé un modèle viscoélastique linéaire du second ordre pour le cas *in vivo*. Celui permet de rendre compte de la présence de deux comportements différents de la pulpe du doigt en relaxation tangentielle à sa surface. À déformation constante, la peau subit des contraintes importantes s'atténuant d'abord très rapidement, puis plus lentement dans le temps.

### 1.5.7 Aspects tribologiques

Depuis les années 1960, les rôles physiologiques et les caractérisations physico-chimiques des comportements de la peau ont été particulièrement étudiés. Ceci s'explique par les challenges offerts par l'industrie des cosmétiques mais aussi par l'ingénierie biomédicale (fabrication de peau-prothèse artificielle).

D'un point de vue physique, la peau possède toutes les propriétés d'une barrière biologique et contribue à l'homéostasie générale de l'organisme en régulant les échanges, mécaniques inclus, avec l'environnement. Dans le tableau 1.2 qui suit en page 27, nous présentons les rôles de barrière à différents phénomènes décrits par Peel [Pee98]. Certains comportements de la peau, comme sa capacité à permettre la transpiration ou à réguler les échanges thermiques peuvent affecter la biomécanique des tissus et les réponses dans les voies somesthésiques. À elle seule, l'importance de l'humidité diffusée précédemment signalée (variation du module d'Young de la

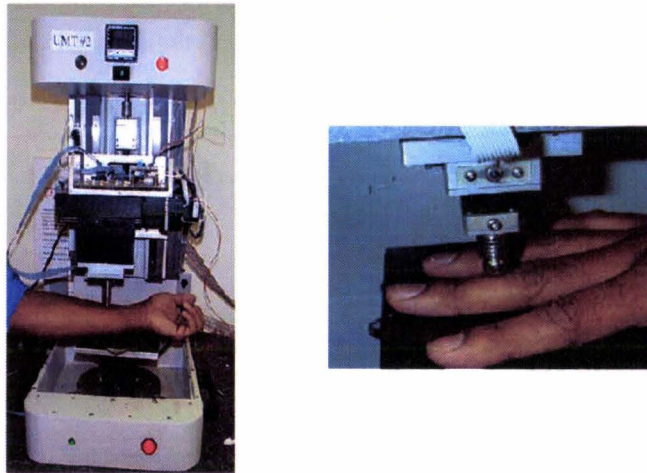
peau de 70% de sa valeur), devrait à elle seule nous persuader de l'importance de ces aspects. La connaissance de ce rôle protecteur de la peau est aussi capitale dans un contexte de conception de stimulateurs tactiles visant à la contraindre.

Rôle de barrière	Quantités mesurables	Méthodes de mesure
Diffusion	diffusion	perte d'eau insensible transépidermique, mesure de la diminution de la masse dans une atmosphère à humidité contrôlée (sudation, vapeur)
	perméabilité	diffusion du 4-cyanophénol à travers le tissu (Fick) et mesure des concentrations finales
Radiation infrarouge	absorbance	identification des raies absorbées ou transmises par spectroscopie infrarouge
	transmittance	
Radiation thermique	conductivité thermique	calorimétrie différentielle à balayage (DSC)
	chaleur massique	
Force mécanique	module de Young	traction-compression linéaire
	contrainte de rupture	
	graphique de contrainte-déformation	
Invasion microbiologique	dissolution-mélange-solvatation	mesure de concentration/densité, spectroscopie par résonance magnétique nucléaire ( <sup>1</sup> H RMN)
	taille des pores	microscopie électronique à balayage

Tab. 1.2 – Présentation des méthodes de mesures dédiées à l'identification du rôle de barrière physico-chimique de la peau.

En toucher latéral, le doigt subit un frottement typique de la procédure exploratoire. Sans aborder immédiatement sa perception, il est facile d'imaginer l'importance de la dynamique de ce contact lorsqu'il s'agit de concevoir une formulation pour un talc, une crème « peau douce » ou encore un préservatif. Aussi, la tribométrie permet d'obtenir une image des rugosités de surface et une quantification du frottement avec des sondes spécifiques ou tribomètres qui peuvent prendre des formes très particulières [ZVHM04][ZVLM04]. Toutefois, d'un point de vue technologique, ces dispositifs utilisent généralement des moteurs et des jauges de contrainte pour mesurer les forces en présence dans les directions normales et tangentielles. Différentes méthodes expérimentales peuvent aussi être utilisées. Soit on déplace une sonde dans la direction latérale, soit on presse un disque ou une roue en rotation (l'appareil de mesure du couple dermique est appelé twistomètre) avec un effort normal contrôlé [GS04]. Parmi les microscopes mécaniques à balayage proposés pour mesurer des coefficients de frottement, le « tribomètre » plus connu est certainement l'UMT (Universal Micro Tribometer) présenté en figure 1.10 de la page 28 et commercialisé par CETR-Campbell USA.





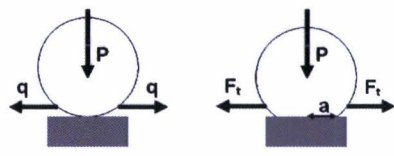
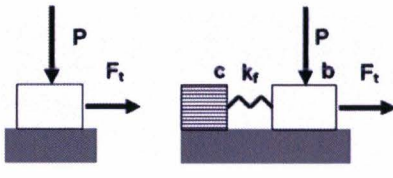
**Fig. 1.10 – Tribomètre biomédical UMT permettant la mesure in vivo du coefficient de frottement entre la peau et une bille**

Ces techniques sont efficaces pour évaluer la résistance relative au mouvement entre la peau et un objet qui peut faire office de sonde ou sa douceur. Par contre, ces mesures n'ont pas vocation à offrir une meilleure compréhension des effets du frottement sur la perception. De plus, l'absence de standardisation de ces mesures (sondes utilisées, hydratation de la peau, forces normales différentes, age, sexe) peut mener à des résultats très différents variant de 0.2 à 0.7 pour le coefficient de frottement. On le voit, indépendamment de l'objet frotté contre la peau, on note que le frottement augmente quand la peau est hydratée tandis qu'il diminue lorsque l'on applique des substances à base de corps gras, sous réserve d'une augmentation ultérieure. Le stratum corneum est un milieu diélectrique. Pour mesurer son hydratation, on peut procéder à des mesures de capacitance avec des courants de quelques microampères entre plaques chargée de manière opposée grâce à des appareils tels que le DERMODIAG<sup>®</sup> de l'Oréal. Cette hydratation résulte de la mouillabilité mais aussi de la diffusion. En effet, les formes des surfaces au contact affectent l'étalement des liquides en surface [SNM06] que l'on peut facilement évaluer avec un goniomètre en utilisant la méthode de la goutte. Une surface sur laquelle une goutte ne se disperse pas présente une adhérence moins élevée.

Si on recherche des instruments d'évaluation des paramètres physiques au contact, c'est surtout parce que la mesure est plus fiable que les prédictions des modèles : on ne sait pas simuler les interactions complexes de frottement sur la peau. Aussi, les chercheurs se limitent souvent à des descriptions très macroscopiques du glissement lors de l'établissement du contact normal (1) ou de l'établissement du frottement en toucher latéral (2) comme l'indique le tableau 1.3 en page 29. Les modèles de frottement d'établissement du contact dans la direction normale ont été plus largement développés, simplement parce que les modèles de déformation normale sont plus nombreux.

La spécificité de la peau (aspects micromécaniques) n'est pas encore intégrée aux modèles de frottement et glissement entre un doigt et une surface. Ceux-ci restent macroscopiques. On le voit dans les travaux récents de Tada et al. [TMK06] qui supposent une distribution gaussienne des

pressions à l'interface de contact, négligeant ainsi la géométrie de l'empreinte digitale, où dans l'approche de l'équipe de Nara [NTMb01] qui calculent une « fréquence » de stick-slip applicable à l'ensemble de la pulpe.

1) Frottement d'établissement du contact normal [BFSB04]	2) Frottement du toucher latéral [Nav98] simplification de [NTMb01]
Hypothèses : le doigt est une sphère distribution en pression axisymétrique	Hypothèses : frottement sec matériaux élastiques et linéaires
 $P = \int_0^a p(r)2\pi r dr,  q  \leq \mu_s p dA = F_s$ $M = \int_0^a \mu_d p(r)2\pi r^2 dr = Pr_m(a),$ $r(a) = P \frac{\int_0^a \mu_d p(r)2\pi r^2 dr}{\int_0^a p(r)2\pi r dr}$	 $F_t = \mu_d \ P\  \text{ quand } \ v\  > v_{\min}$ $f_d = k_f \ n\ (b-c) \text{ quand } 0 < \ v\  < v_{\min}$ $r_{\text{critique}} = \frac{\mu_s}{\mu_d} \ b-c\ $
<p><i>P désigne la force d'appui normale, M, le moment de la force de frottement, q une traction infinitésimale, A, l'aire de contact, <math>\mu_s</math> et <math>\mu_d</math> les coefficients de frottement respectivement statiques et dynamiques, <math>F_t</math> la force tangentielle, a le rayon de contact apparent, <math>r(a) &lt; a</math> le rayon de contact réel, la distance au centre, M et P sont indépendants du modèle de déformation au contact mais dépendent du choix de <math>p(r)</math> (Hertz classique ou modifié, viscoélastique, membrane remplie de fluide incompressible), <math>r_{\text{critique}}</math> est la distance du centre aux frontières de l'ellipse d'adhérence, v la vitesse tangentielle, <math>v_{\min}</math> sa valeur minimale et enfin <math>k_f</math> raideur du ressort qui à lui seul modélise reflète l'élasticité des deux matériaux et la lubrification au contact. c est la coordonnée pour <math>v=0</math>, b la coordonnée en déplacement.</i></p>	

**Tab. 1.3 – Transition de la phase d'adhérence à la phase de glissement avec frottement de Coulomb : 1) dans l'établissement du contact normal, 2) dans l'amorce du geste de toucher latéral.**

Dans cette section nous avons proposé une synthèse décomposée des comportements biomécaniques caractéristiques du toucher de surface en fonction de la portée spatiale des contraintes/déformations sur les membres. Ce travail nous a permis de réaliser la complexité des phénomènes de propagation biodynamique du toucher et donc la difficulté à évaluer les contraintes effectives sur les mécanorecepteurs qui permettraient de supporter les résultats de mesures en psychophysique et neurophysiologie. Tout en gardant cette analyse à l'esprit, nous allons à présent aborder le problème de la perception de la rugosité de texture dont la dimension de challenge scientifique (cf. section 1.1.2 page 5) peut à présent être bien mieux appréciée. En effet, parmi tous ces mécanismes et facteurs d'influence du toucher de surfaces élémentaires, il nous faut identifier ceux qui sont réellement impliqués dans le cas de la texture et tenter d'expliquer leur contribution au couplage sensorimoteur nécessaire à sa perception.

## 1.6 Déterminants de la perception de la rugosité de texture

Les premières recherches en psychophysique du toucher ont été dédiées à rechercher les déterminants majeurs de la rugosité perçue avec un doigt nu. Plus récemment, la neurophysiologie est venue critiquer ces résultats. Comme nous allons le voir, il existe une certitude absolue sur une dimension intensive contenue dans l'information. L'implication additionnelle de la dimension spatiale pour les textures grossières ou textures dont l'espacement entre les éléments est important ( $> 1 \text{ mm}$ ) a aussi été démontrée. Par contre, en dépit de la dynamique du toucher de texture, l'apport des informations à caractère temporel des vibrations transitoires ou continues est encore vivement débattu pour les textures dites « fines ».

Avant de présenter un état de l'art de ces recherches, commençons par un résumé des mécanismes potentiellement candidats au codage de la rugosité de texture.

### 1.6.1 Étude des formes possibles de codage de la texture

En nous inspirant des hypothèses de Richards (1979) et Johnson (1983) reprises par Loomis et Lederman [LL86], nous allons procéder à une présentation simplifiée des mécanismes de la chaîne de mesure du système sensoriel incluant les stimuli, leur exploration, le conditionnement mécanique et le codage neurophysiologique.

Considérons une aire de la pulpe du doigt stimulée en surface par une texture homogène. La texture est décrite par la distribution spatiale de sa hauteur  $z(x,y)$  par rapport à un plan de référence. On peut, en première approche, considérer  $\varepsilon(x,y,t)$ , une distribution spatiotemporelle de l'allongement relatif sur la peau en relation directe avec la hauteur de texture  $z(x,y)$  autorisée par la procédure exploratoire à l'instant  $t$  et  $\sigma_{\text{peau}}$  la contrainte associée. Reprenons à présent la chaîne de mesure du système sensoriel, que nous considérons constituée de quatre canaux ( $i=1..4$ ) associées aux quatre types d'unités tactiles. Nous considérons alors  $M_i$  fonction de transfert mécanique dont la réponse impulsionnelle  $m_i()$  va filtrer la contrainte  $\sigma_{\text{peau}}(x,y,t)$ . Nous tenons compte d'une délocalisation spatiale  $(\alpha_i, \beta_i)$  et d'un retard  $\tau_i$  moyens, spécifiques à la position spatiale des terminaisons de chaque canal et représentatifs du temps de propagation des ondes mécaniques dans les tissus jusqu'aux mécanorécepteurs associés aux unités de type  $i$ . Le résultat du produit de convolution de  $\sigma_{\text{peau}}$  avec  $m_i()$  que l'on appellera  $\sigma_i$  est la contrainte qui leur est appliquée définie dans le domaine spatiotemporel.

$$\sigma_i(x, y, t) = \int_t^{t+\Delta t} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \sigma_{\text{peau}}(x', y', t') m_i(\ ) dx' dy' dt'$$

où la fonction de transfert mécanique  $M_i$  a la réponse impulsionnelle :

$$m_i(\ ) = (x - x' - \alpha_i, y - y' - \beta_i, t - t' - \tau_i)$$

Lors de la transduction, il y a un passage d'une information continue dans le domaine spatial à une information discrète (cf. paragraphe 1.3.4 page 14) qui joue un rôle essentiel dans le codage de la localisation spatiale mais aussi de l'intensité, en accord avec la loi de Stevens. Aussi, plutôt que de définir, comme Loomis une réponse impulsionnelle par unité de mécanorécepteur, on définira  $g_i$  réponse simplifiée par canal. En effet, l'information spatiale en sortie d'une unité peut être absente bien que présente dans le canal, tout comme un code temporel résultant de la synchronisation d'information entre unités peut exister, toujours pour un canal.

On suppose que le code sensoriel de la texture est un vecteur  $C$  à quatre dimensions et que les quatre fonctions  $g_i$  possèdent toutes une dépendance spatiotemporelle à l'image des contraintes appliquées sur la peau.

$$C(x, y, t) = (g_1(\sigma_1(x, y, t)), g_2(\sigma_2(x, y, t)), g_3(\sigma_3(x, y, t)), g_4(\sigma_4(x, y, t)))$$

Le code de texture reste spatiotemporel et prend la forme  $C(x, y, t)$  tant qu'au moins une dépendance au temps et une dépendance à l'espace sont présentes parmi l'ensemble des quatre fonctions  $g_i$ . Le code devient spatial et s'écrit  $C(x, y)$  dès lors qu'il ne possède plus de dépendance au temps par au moins une de ses fonctions  $g_i$  constitutives. Sans dépendance à l'espace, le code  $C(t)$  est temporel. Il est intensif de forme  $C$  s'il est fonction de grandeurs scalaires indépendantes à la fois du temps et de l'espace.

Cette présentation des mécanismes de codage est fortement simplifiée par rapport aux mécanismes réels. On le voit, des travaux récents de Johansson et Bierznieks [JB04] suggèrent des formes de codage temporelles basées sur une compétition entre les différents canaux. Elle va par contre nous permettre de mieux comprendre les résultats des études sur la perception de la texture portant sur :

- la sensibilité haptique à l'information intensive, spatiale, temporelle de texture,
- la participation des voies somesthésiques dans les mécanismes de codage,
- le positionnement des performances haptiques par rapport à celles permises par les autres modalités.

### 1.6.2 Premières observations en faveur de la vibration

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, Katz [Ka25] a observé que l'on peut non seulement qualifier le matériau constitutif d'un objet avec lequel on interagit, mais aussi son état de surface par la vibration qu'il engendre sur la peau. Il a aussi remarqué une performance de localisation de la position spatiale des sources vibratoires, ce qui l'a amené à conclure que la vibration est essentielle à la perception de la texture, et plus particulièrement de sa rugosité, lors des situations d'exploration en contact direct avec la main nue [Ka36]. Bien qu'il ait mis en évidence l'importance de l'évolution spatiotemporelle des forces inertielles ressenties par la peau en contact avec les objets, nous allons voir qu'il avait probablement tort de les considérer comme socle des mécanismes perceptifs de la rugosité avec la main nue. Les connaissances actuelles font

plutôt état de l'importance de mécanismes intensifs et spatiaux que nous allons décrire maintenant.

### 1.6.3 Implication des mécanismes intensifs et spatiaux

Dans les années soixante-dix, Lederman et Taylor [LT72][Led74] ont mis en évidence expérimentalement que la perception de la rugosité était corrélée fortement et positivement avec la largeur des vallées entre les rainures (0.125-1 mm) de tablettes métalliques. L'augmentation de la largeur des crêtes avait un effet beaucoup moins important, tendant à diminuer la rugosité perçue. Ils ont ajouté que la vitesse du mouvement relatif entre la main et la texture avait une influence négligeable sur les perceptions mais que la rugosité perçue augmentait avec la force normale de contact. Leurs travaux de 1974 précisent qu'il peut exister un effet de « no land » ou d'absence de gradient de texture lorsque les vallées deviennent larges, ce qui tend à réduire l'intensité jugée. En 1975, ils ont aussi rapporté que la rugosité perçue d'une surface était directement reliée à l'aire totale de peau instantanément déformée par rapport à une ligne de référence au contact avec la surface [TL75]. Les mécanismes de codage ont d'abord été décrits comme intensifs car l'intégration semblait se faire sur toute la zone de contact, provoquant une perception unidimensionnelle. À l'époque, les limites technologiques en métrologie n'ont pourtant pas permis de valider l'approche en reliant le motif de déformation de la peau avec les estimations de rugosité.

En 1981, les recherches neurophysiologiques de Johnson et Lamb [JL81] ont supporté la consistance d'un code spatial formé à partir de la population d'unités SAI ; cependant, cette cohérence disparaît pour des interespacements entre éléments inférieurs à 1 mm. Pour des distances supérieures, le mouvement relatif doigt-surface tend à améliorer le contraste spatial entre crêtes et vallées, mais n'apporte pas de dimension temporelle dans le code de texture. Ce contraste est inexistant pour un contact statique. Le mouvement servirait donc à servir de meilleures performances sensorielles aux stimuli phasiques.

En 1983, Lederman [Led83] précise ses travaux de 1972 et 1974. Elle rapporte que ni la période spatiale, ni le rapport entre la largeur des vallées et des crêtes, ni une vitesse douze fois supérieure en conditions actives ou passives (cf. section 1.2.2, pp. 8-9) n'influencent la perception de la rugosité. Tous ces arguments vont en faveur du fait que l'humain tend à ne pas utiliser l'information vibratoire pour coder l'information.

L'une des démonstrations les plus élégantes supportant les mécanismes spatiaux est certainement celle de Connor et Johnson [CJ92] détaillée en figure 1.11 page 33. Les auteurs ont utilisé des surfaces sur lesquelles étaient inscrits des petits points dont l'espacement variait de 1.5 à 4 mm. Ils ont montré que la rugosité perçue est corrélée positivement avec l'augmentation de distance entre motifs, hypothèse spatiale dans l'expérience psychophysique. Ils ont expliqué ces résultats à partir d'enregistrements neurophysiologiques : ce n'est pas la moyenne mais la variation spatiale des taux de décharge des populations des unités SAI et RA qui expliquent la rugosité perçue. Leur résolution est comprise entre 1 et 2 mm.

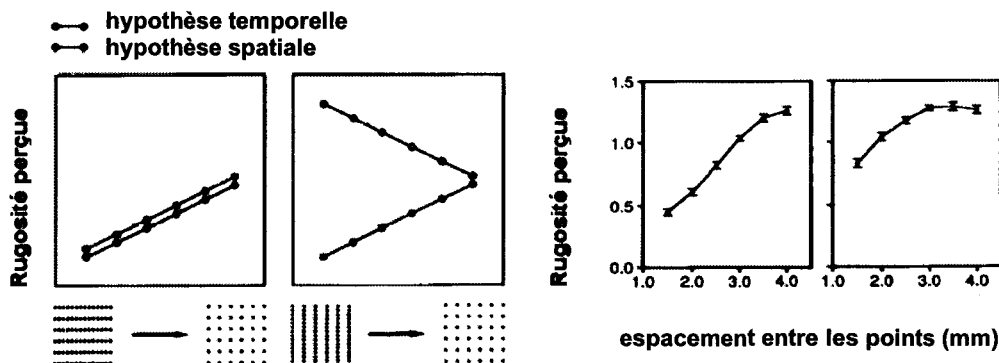


Fig. 1.11 – Expérience de 1992 de Connor et Johnson. Hypothèse temporelle invalidée pour les textures dont les éléments sont espacés de plus de 1 mm.

Ces approches ont été confortées par une autre étude neurophysiologique [BJ97] avec des formes surélevées de +/-280 à +/-620  $\mu\text{m}$  et variant en largeur de 0.2 à 7 mm. Celle-ci a permis de montrer que l'information intensive émise à partir de chacune des unités SAI correspond aux changements de hauteur de points surélevés en surface. Le code de texture intégré sur toutes les unités serait donc spatial. Les unités RA reflètent aussi le caractère spatial des petits mouvements sur la peau. Si elles sont sensibles aux dépressions en surface de faible intensité, leurs réponses saturent rapidement.

En 1999, Miyaoka et al. se sont intéressés plus particulièrement à des textures dont la taille des aspérités, mesurée au profilomètre, variait de 1 à 40  $\mu\text{m}$  et à des répartitions d'aspérités plus aléatoires ne favorisant pas la dimension spatiale. Les fractions de Weber qu'ils ont calculées montrent que l'être humain discrimine le papier abrasif à partir de l'information d'amplitude (intensive) présente dans la non-uniformité de surface [MMO99]. En utilisant des textures d'éléments espacés de 1,5 à 5 mm et une roue actionnée comportant des crans espacés de 2 à 5 mm, Meftah, Belingard et Chapman [MBC00] favorisent aussi l'explication intensive. Le mouvement dirigé filtrerait les réponses des afférents nerveux et sa vitesse compenserait la différence d'information pour conserver une représentation invariante de la rugosité.

Par ailleurs, Yoshioka et ses collègues ont montré qu'il n'existe pas de relation consistante entre les réponses dans le canal pacinien, aussi intenses pour tous les espacements et les jugements de rugosité [YGDS01]. Le code de rugosité reposerait des formes déterministes de décharge spatiale entre populations situées dans des champs récepteurs espacés d'environ 2-3 mm par rapport au motif de texture et des formes stochastiques pour des valeurs inférieures jusqu'à 100  $\mu\text{m}$ . La dimension stochastique (aléatoire mais corrélée au relief de texture) du code spatial deviendrait prédominante en dessous de 1 mm.

Très récemment, Bensmaïa, Craig, Johnson [BCJ06] et Yoshioka [BCYJ06] viennent de trouver que si les fibres SAI convoient des signaux modulés spatialement, il est possible que les signaux convoyés par le système sensoriel à adaptation rapide RA interfèrent dans la perception de la texture à cause de leur sensibilité phasique renforcée par l'augmentation des fréquences

vibratoires au contact. Toutefois, la vibration ne modifierait pas la qualité de l'information spatiale périphérique.

#### 1.6.4 Arguments pour l'influence d'une dimension temporelle

Nous l'avons vu dans la section 1.2.3 (pp. 9-10), le toucher latéral est une procédure optimale de jugement de la rugosité qui implique un mouvement relatif entre la peau et la surface [KL87]. Celle-ci génère du frottement et des vibrations au contact. Si elle servait seulement à favoriser une réponse phasique des unités tactile, pourquoi ne tapoterions nous pas sur la surface pour acquérir l'information de rugosité ? Voyons à présent quels sont les arguments en faveur d'un apport du mouvement relatif à la dimension temporelle du code de rugosité.

Il existe des arguments forts qui tendent à défendre l'hypothèse d'un codage uniquement spatial : ni les changements de vitesse du mouvement dirigé en toucher actif impliquant une compensation pour que la représentation reste invariante (argument aussi valable pour le cas spatial [MBC00]), ni une préadaptation à des stimuli vibrotactiles [Led82] n'apportent une perception différente de la rugosité. Ceci réduit considérablement la possibilité de mécanismes de codage vibratoires tant en fréquence qu'en amplitude. Malgré ces arguments assez forts, encore aujourd'hui, on pense qu'une dimension temporelle peut être présente et ce plus particulièrement en présence de textures fines.

Pour des surfaces avec des points élevés distants de 0.8 à 6.5 mm, Connor et ses collègues suggèrent qu'un code non spatial puisse être requis pour former la perception de la rugosité [CHPJ90] : en effet, les codes basés sur la variation temporelle du nombre de décharges des neurones par unité de temps la décrivent mieux que la variation spatiale entre neurones à un instant donné (points de 0.5 mm espacés de 1.5 mm au minimum). Dans leurs travaux, ils étendent la plage d'étude à des macro textures et montrent aussi que la sensation perçue est une fonction en U inversé qui comporte un maximum à 3 mm. Cependant, ils invalident l'hypothèse temporelle deux ans plus tard avec l'expérience [CJ92] présentée en figure 1.11 page 33.

Srinivasan et ses collaborateurs ont fortement contribué à réhabiliter l'importance de la dimension temporelle dans le cas de la microtexture. Ainsi, le frottement tangentiel sur la pulpe de microstructures isolées (points de 150 par 4  $\mu\text{m}$  de hauteur) sur un arrière plan non rugueux, contre la peau provoque une réponse immédiate des unités RA [SWL90]. Ils mesurent aussi des impulsions à occurrences périodiques dans le canal pacinien en réponse à des barres de hauteur micrométrique (0.33  $\mu\text{m}$ ) et de période spatiale égale à 100  $\mu\text{m}$  [LS91].

Hollins, Bensmaïa et Rissner [HBR98] proposent une série d'expériences visant à montrer que le mouvement permet une meilleure discrimination de textures dont la taille de grains est comprise entre 15 et 300  $\mu\text{m}$  pour défendre une théorie « duplexe » de la perception de la rugosité. En 2001, ils montrent que l'adaptation à des stimuli à hautes fréquences (inclus dans la bande passante des mécanorécepteurs de Pacini) dégrade la perception des textures fines mais pas des textures plus grossières [HBW01]. En 2003, ils utilisent un transducteur à effet Hall fixé sur l'arrière de la pulpe du doigt pour mettre en évidence la présence de vibrations sur la peau en

relation avec la période spatiale de la texture [BH03]. Toutefois ils rejettent une théorie fréquentielle et privilégient que la perception de la rugosité serait fonction de l'amplitude des vibrations, pondérée par la sensibilité fréquentielle du canal pacinien. En 2001, Gamzu et Ahissar [GA01] ont montré que les indices temporels liés au mouvement dirigé sont essentiels pour la discrimination de rainures de cuivre imprimées sur des plaques. En effet, ils sont si importants que les participants peuvent modifier leurs stratégies gestuelles pour les acquérir en l'absence d'indices spatiaux et ainsi améliorer leurs performances de discrimination. Cascio et Sathian [CS01] ont argumenté fortement contre le rejet du codage temporel. Pour des discriminations entre textures ou la largeur de cran varie (le creux mesure 1 mm et le cran s'étend de 0.5 à 1.95 mm), la fréquence vibratoire serait le principal déterminant de la discrimination. Cette étude s'appuie sur de nombreux travaux mentionnant des oscillations de neurones et un codage fréquentiel dans les neurones corticaux. Ce code se transformerait en code intensif lors du passage du cortex primaire au cortex secondaire. Un an après, Smith et ses associés ont suggéré que ni la force normale, ni la force tangentielle moyenne ne déterminent les perceptions de rugosité de surfaces polymères comportant des rainures. Si le coefficient de frottement varie d'une manière cohérente avec les estimations, il reste un moins bon indicateur que la dérivée temporelle de la force tangentielle [SCDL02] transmise à un capteur de force placé sous la texture dont les aspérités ont des dimensions supérieures à 2 mm.

Nous venons de résumer les recherches sur la nature des indices haptiques contribuant à la formation du code sensoriel de texture. Avant de conclure sur cette synthèse des connaissances en toucher de texture, il nous paraît important d'aborder la contribution des autres modalités à ce processus.

#### 1.6.5 Intégration intermodale des indices de texture

La représentation d'une texture peut résulter soit d'une acquisition d'information amodale, soit d'un transfert intermodal ou encore d'une intégration multimodale. On parle de perception amodale (situation peu probable) quand aucune modalité n'est optimale pour extraire les propriétés haptiques des objets communs. C'est ainsi que la texture grossière peut être à la fois ressentie par la vision et le toucher. Selon Yvette Hatwell [HGS00], il y a transfert intermodal quand une information reçue en conditions intramodales est utilisée correctement par une autre modalité. L'intégration intermodale consiste alors à mettre en relation des informations issues de chacune des modalités pour former un objet unique « multimodal ». À présent, nous allons voir qu'en fonction des indices disponibles sur les états de surface, la spécificité de chacune des modalités en termes de performance peut entraîner des prédominances marquées.

Comme le remarque Revesz en 1950, la perception haptique s'effectue de façon séquentielle contrairement à la perception visuelle qui est instantanée [Rev50]. L'audition, domaine du successif est la modalité la plus adaptée à la perception des stimuli temporels (durée, rythme, parole) tandis que la vision excelle dans le domaine spatial. Cependant, tout en ayant un fonctionnement potentiellement temporel comme nous venons de la voir, le toucher est une



modalité avant tout spatiale parce qu'elle ne se déroule pas de façon linéaire et dans un ordre imposé [HSG00]. Pour l'audition, l'ordre d'apparition des stimuli ne peut être modifié car il est porteur de sens. Le toucher peut revenir en arrière. Il peut explorer dans n'importe quelle direction, repasser plusieurs fois sur certaines parties du stimulus de la même façon que l'œil explore une scène ou une image de grandes dimensions.

Commençons par évoquer brièvement la relation toucher-ouïe avant de nous attarder plus longuement sur la relation toucher-vision. Lederman a montré en 1979 [Led79] que le toucher domine l'ouïe dans la discrimination de plaques rainurées. La perception acoustique de la rugosité augmente quand la période spatiale diminue. Par contre, une relation opposée apparaît quand le toucher est disponible, seul ou avec les indices acoustiques. Il est donc possible que les indices acoustiques de hauteur et d'intensité du son affectent les jugements de rugosité avec une pondération très faible par rapport aux indices haptiques. Les travaux de l'équipe de Spence montrent une capture tactile des indices auditifs [ZGS03][CSKS02].

Dans les premières réflexions philosophiques, George Berkeley [Ber09], comme ses contemporains, pensait qu'aucune analogie ne pouvait être faite entre le toucher et la vision. Ainsi, il considérait que le toucher donnait un accès immédiat aux objets et à leurs propriétés physiques tandis que l'idée issue de la vision d'un même objet pouvait être faussée par d'autres facteurs comme la distance et l'éclairage.

L'approche expérimentale de Rock et Victor a permis de montrer que, dans le cadre de la reconnaissance de formes carrées déformées par des lentilles pour apparaître rectangulaires, la vision domine fortement le toucher [RV63]. Ils suggèrent que l'information de type « forme » est difficile à atteindre pour la modalité haptique limitée par une proximo-réception caractéristique. Quand la taille d'un objet est élargie ou réduite, la vision prédomine et trompe le toucher qui est pourtant capable d'une reconnaissance de forme précise en conditions unimodales [RH67]. En 2002, pour les tâches visuohaptiques d'évaluation de la hauteur d'un objet, Ernst et Banks montrent que le système nerveux se comporte comme un intégrateur où la somme de la participation maximale des modalités visuelles et haptiques sont pondérées par un indice de leurs performances en conditions unimodales [EB02]. Cette combinaison permet une amélioration des performances par rapport aux conditions unimodales qui ne peut seulement résulter d'une distribution d'attention entre les modalités.

Dans le cadre de la perception multisensorielle des textures, les travaux existants suggèrent des mécanismes perceptifs différents. La sensibilité ou performance en condition bimodales n'est pas meilleure qu'en conditions unimodales car l'attention est distribuée (biais ou dominance d'une modalité). Il en va de même pour l'intensité du signal, ce qui montre qu'il ne peut y avoir de sommation entre les modalités (l'intégration unimodale est possible). Les entrées agissent comme des sources indépendantes d'information pondérées et potentiellement redondantes qui contribuent toutes deux au processus de décision [GS03a]. Grâce à une tâche d'appariement différencié de textures en conditions bimodales, Lederman et Abbott [LA81] proposent une pondération égale entre l'attention visuelle et tactile expliquée par le fait que lorsqu'une propriété physique est à la fois accessible par les deux canaux, un compromis s'établit. Heller [Hel82]

décrit une série d'expériences de toucher de texture où le toucher seul permet d'obtenir de meilleures performances de discrimination de rugosité que la vision seule. Il a constaté que l'interaction bimodale est plus avantageuse car la vision, qui ne fournit pas d'indice sur la géométrie de la texture (commutation) aide le sujet à orienter sa main de manière plus efficace. Pour les textures, Lederman et al. ont trouvé qu'il n'y a pas de hiérarchie prédéterminée dans la préférence d'une modalité mais que le choix dépend de la dimension du jugement : rugosité (haptique) - densité des grains (visuelle) [LTJ86]. En 2003, Guest et Spence montrent que lorsque les personnes cherchent à discriminer la rugosité d'échantillons textiles [GS03b], la vision peut être trompée par des distracteurs tactiles. Par contre, la situation inverse ne se produit pas, même si les distracteurs visuels sont plus discriminables que les cibles tactiles. Ils suggèrent que la modalité la plus appropriée n'est pas seulement fonction des capacités de discrimination mais qu'elle dépend aussi de la validité écologique qui joue un rôle lorsque l'on doit décider du sens utilisé pour une tâche donnée.

Le toucher est donc une modalité dont les indices semblent moins recevables que ceux de la vision quand il s'agit de décider de la forme. Par contre, ses indices sensoriels sont plus valides dans le cas de la rugosité.

## **1.7 Discussion sur le besoin de mieux caractériser du toucher latéral**

Ce chapitre nous a permis d'aborder les résultats des recherches sur les mécanismes sensorimoteurs de la perception de la texture. On le voit, en dépit d'un nombre considérable de travaux situés au carrefour de la psychophysique, la neurophysiologie et la biomécanique, notre connaissance reste encore très limitée.

Dans un contexte de design d'afficheurs de texture, pensés comme des interfaces tangibles pour permettre leur compatibilité avec les conditions actives d'exploration, il nous faut mieux comprendre quelles sont les spécificités des contraintes que l'homme s'impose en contrôlant un frottement de la texture du bout de son doigt.

Pour répondre au problème, nous allons d'abord nous intéresser au mouvement exploratoire. La littérature nous enseigne que la texture est caressée. Toutefois, tant les ordres de grandeur des paramètres cinématiques associés au geste que leur évolution dynamique restent encore obscurs. Pour identifier l'objectif de connaissance motivant l'action, il paraît pertinent de caractériser le contrôle exercé sur le système moteur. Ensuite, en dépit de nombreuses preuves supportant les mécanismes spatiaux de codage la texture, et de l'absence d'influence du mouvement sur la qualité de l'information somesthésique, des études suggèrent l'importance d'une dimension temporelle dans la formation du code de rugosité. C'est la raison pour laquelle nous allons essayer de mieux comprendre les effets dynamiques de ce mouvement exploratoire en termes de contraintes/déformations sur la peau. Enfin, compte-tenu de l'importance biomécanique de l'empreinte digitale, souvent négligée dans la littérature sur la perception de la rugosité dès lors que l'on dépasse l'ordre du micromètre, nous allons essayer de cerner sa participation effective aux mécanismes dynamiques au contact.

Les résultats d'expériences proposées dans ce travail vont peu à peu nous amener à découvrir une contribution significative de ce relief de la peau à la modification qualitative des contraintes/déformations dynamiques sur les membres en fonction de la posture et des conditions d'application des stimuli. Ceci expliquera une nécessité d'action contrôlée pour percevoir la texture.

Pour arriver à ce résultat, nous allons commencer par examiner et décrire les usages du toucher de texture. Dans le chapitre qui suit, nous allons nous intéresser aux aspects cinématiques du mouvement dirigé sous l'influence de motivations cognitives d'exploration. Nous allons chercher à identifier quelles sont les stratégies motrices privilégiées du toucher latéral par une caractérisation métrologique de ses espaces de travail, de ses directions d'exploration ou encore de ses gammes de force normale et de vitesse.

## Chapitre 2

### Caractérisation cinématique du toucher latéral

#### Sommaire

---

<b>2.1 Objectifs</b> .....	<b>40</b>
2.1.1 Compatibilité entre mouvement et vibration au contact.....	40
2.1.2 Caractérisation du mouvement volontaire de discrimination de texture.....	40
2.1.3 Compréhension de l'apport de la motricité.....	42
2.1.4 Design sensoriel.....	43
<b>2.2 Conception d'un instrument de mesure transparent</b> .....	<b>43</b>
2.2.1 Réflexion sur l'existant.....	44
2.2.2 Proposition de capteur et description du principe de fonctionnement .....	45
2.2.3 Considérations de dimensionnement.....	46
2.2.4 Linéarité, justesse et nécessité de filtrage .....	47
<b>2.3 Expérience</b> .....	<b>48</b>
2.3.1 Sujets.....	49
2.3.2 Matériel expérimental.....	49
2.3.3 Méthode.....	49
<b>2.4 Résultats</b> .....	<b>51</b>
2.4.1 Premières observations.....	51
- <i>Présence de mouvement</i> .....	51
- <i>Implication du toucher latéral</i> .....	51
- <i>Forme des trajectoires</i> .....	52
2.4.2 Détermination des éventuels invariants du mouvement.....	53
- <i>Procédure exploratoire impliquée</i> .....	53
- <i>Variabilité inter et intra-sujets considérable</i> .....	54
- <i>Absence d'influence des conditions expérimentales</i> .....	54
- <i>Explication ergonomique</i> .....	56
- <i>Restriction volontaire du mouvement</i> .....	57
2.4.3 Comparaison aux résultats de Smith, Gosselin et Houde.....	60
- <i>Trajectoires explorées</i> .....	60
- <i>Force normale</i> .....	61
<b>2.5 Discussion</b> .....	<b>61</b>

---

L'étude du rôle de l'action ou du mouvement dirigé dans la perception a vraiment commencé dans les années soixante à partir des conclusions de Gibson [Gib66] : pour percevoir, le sujet effectue une recherche et une construction structurée de règles de liaisons constantes entre les sensations qu'il reçoit et les commandes motrices qu'il impose. Depuis, de nombreux auteurs se sont demandé, pour les tâches de discrimination haptique de la texture, si les performances sont améliorées ou dégradées en présence du mouvement [Led82][GA01][CS01], et de son contrôle [RSA00][SRW05]. Toutefois, nous ne sommes toujours pas en mesure de savoir en quoi le contrôle du mouvement dirigé et la spécificité dynamique (chocs, vibrations, étirement latéral) qu'il permet au contact améliorent ou sont essentiels à la perception de la texture.

## **2.1 Objectifs**

Pour expliquer le rôle de la dynamique du toucher dans la perception de la texture, les études antérieures proposent deux approches. La première, à dimension spatiale fait état soit d'une optimisation de positionnement des champs réceptifs dans l'espace, soit d'un contrôle visant à la généralisation de la perception à l'ensemble de la surface. La seconde à dimension temporelle suggère une nécessité de stimulation phasique permettant soit de vaincre l'accommodation somesthésique, soit d'améliorer la sensibilité à l'intensité des contraintes sur la peau. Pour simuler un toucher actif, nous nous demandons plutôt dans quelle mesure le contrôle de l'action affecte la qualité des contraintes dynamiques sur les membres. Logiquement, nous devons d'abord nous assurer que le mouvement volontaire est compatible avec la vibration au contact. Ensuite, nous il nous faut améliorer sa caractérisation pour, au final, identifier son potentiel à acquérir une information sensorielle à caractère dynamique. Détaillons davantage ces objectifs.

### **2.1.1 Compatibilité entre mouvement et vibration au contact**

Le mouvement tangentiel du toucher de texture semble raisonnablement être une condition nécessaire à l'éventuelle présence de vibration soutenue au contact et à leur hypothétique propagation dans les tissus et sur les membres supérieurs. En effet, c'est par l'établissement d'une distribution temporelle de contraintes mécaniques générées sur la peau en défilement sur la texture ou de la texture sur la peau que ces phénomènes sont les plus enclins à survenir. Si le mouvement ne se produit que dans la direction normale, des vibrations transitoires de la texture résultant de chocs du doigt (tapotements) sur sa surface peuvent aussi éventuellement apparaître. L'absence de mouvement relatif apparaît incompatible avec une présence significative de vibration (autres que ceux liés aux tremblements ou au pouls).

### **2.1.2 Caractérisation du mouvement volontaire de discrimination de texture**

Supposons cette compatibilité. Si nous arrivons également à montrer que le toucher latéral est capital (vraiment optimal ou nécessaire) à l'identification de textures, nous pensons qu'il sera

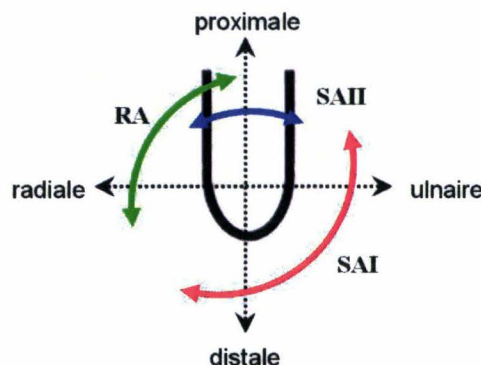
alors important d'améliorer la description qui en a été donnée par Lederman et Klatzky [KL87] (étude de référence) pour savoir si l'homme cherche à extraire des invariants sensorimoteurs :

*« The lateral motion EP (texture) manifests sideways movement between skin and object surface, i.e., rubbing. Typically, the fingers quickly rub back and forth across a small, homogeneous area of the surface, interior surfaces are explored rather than edges. »*

Dans cette description on apprend qu'il existe une caresse résultant de mouvements latéraux d'aller-retour du doigt sur la surface. Ceux-ci sont rapides, répétitifs et restent confinés dans une zone restreinte, l'intérieur plutôt que les extrémités. Cette caractérisation demeure qualitative. En effet, on ne sait pas si une forme de mouvement doit être privilégiée pour notre étude. On ne connaît pas non plus son amplitude ou s'il peut y avoir des éventuelles phases d'arrêt pendant l'exploration. On notera ensuite aussi une absence de renseignement sur les gammes de force et de vitesse. Enfin, la variabilité intra et inter-sujet(s) n'est pas abordée.

Attardons nous un instant sur l'importance de la forme du mouvement dans les mécanismes perceptifs de la rugosité de texture. Bien qu'on l'imagine plutôt rectiligne dans la direction radiale-ulnaire (figure 2.1) d'après le description de Klatzky et Lederman [KL87], des facteurs d'anisotropie dans la perception de la texture d'origine biomécanique, neurophysiologique ou encore cognitive, pourraient conduire à des directions d'exploration privilégiés.

Parmi ces facteurs, citons tout d'abord les crêtes de l'empreinte digitale. Leurs caractéristiques les plus importantes sont leur orientation locale dominante et leur anisotropie topographique [Jia05]. Ensuite viennent la dextérité des membres sollicités lors de l'exploration [BM97] et des motivations ergonomiques [VH01], qui peuvent forcer un guidage du mouvement. Puis, d'un point de vue rhéologique les tissus sont symétriques dans la direction radio-ulnaire (figure 1.9 page 25), mais pas dans la direction proximo-distale (figure 1.6 page 20). En accord avec Mansour et al. [PMD91b], la différence d'épaisseur des tissus sous-jacents peut induire des anisotropies de propagation des contraintes jusqu'aux terminaisons somesthésiques.



**Fig. 2.1 – Sensibilité directionnelle des unités SA et RA d'après Birznieks [Bir03]. La direction radiale est orientée vers le pouce.**

Ce n'est pas tout, les unités tactiles SAI, SAII et RA possèdent des directions de stimulation privilégiées. Ainsi, Birznieks [Bir03] révèle que le canal SAI répond de manière plus prononcée à des forces de tangentielles imposées dans les directions distales et ulnaires (adduction). Quant aux unités SAII, elles sont plus sensibles aux stimuli proximaux (vers la phalange proximale). Le canal RA est plus sollicité dans les directions proximales et radiales (celles du mouvement d'abduction). La sensibilité directionnelle est identique en statique ou les unités RA ne répondent plus. Enfin, dans une tâche de discrimination d'orientation de stries, Essock et ses collègues [EKP92] montrent que les participants sont plus sensibles à l'orientation dans la direction proximale-distale. En fonction de la modalité, les neurones impliqués réagissent davantage à certaines orientations spatiales. Les réponses peuvent aussi être influencées par des post-traitements à dimension cognitive [EKP97]. Il peut être intéressant de confronter ce point de vue avec la moins bonne sensibilité aux orientations obliques démontrée par Gentaz et Hatwell [GH95][GH96][GH97]. Elle s'explique par la nature des indices sensoriels d'origine gravitaire ou inertielle. Toutefois, la représentation de ces indices en fonction du cadre de référence utilisé, gravitaire ou égo-centré [KSG05] joue un rôle important dans cette sensibilité à l'orientation.

Deux études viennent toutefois apporter des précisions au stéréotype de procédure exploratoire proposé par Klatzky et Lederman [KL87].

Dans les travaux de Smith, Gosselin et Houde [SGH02], les stratégies gestuelles sont examinées, tout comme le déploiement des forces normales et tangentielles en situation d'exploration tactile de surfaces lisses possédant un seul défaut. Cependant, cette étude ne correspond pas à la finalité recherchée dans nos travaux. D'abord, elle se situe dans un contexte de localisation de cible tactile, ce qui encourage les participants à explorer toute la surface offerte tant que le défaut n'est pas détecté. Ensuite, les sujets optent pour une stratégie d'uniformité du mouvement visant à détecter la non-uniformité de surface. Enfin, ces travaux ne nous permettent pas d'accéder à une caractérisation métrologique suffisante du mouvement exploratoire.

Dans une étude très récente, Hughes [HUG06] fait état d'une sensibilité à l'orientation dépendante de la structure des surfaces, indépendante de la stratégie d'exploration. Il suggère un effet d'oblique fonction de l'angle de dépose de textures couvertes de points suivant un arrangement superficiel déterministe, mais non orienté. Dans l'expérience, l'enregistrement des trajectoires du doigt à la caméra permet de conclure à un geste tangentiel variable, sous contraintes minimales. Compte tenu de l'absence de données quantitatives sur la cinématique du mouvement, la taille des aspérités inconnue, l'arrangement des deux textures impliquées et la présence d'une zone centrale singulière (voir les conséquences d'une telle organisation [NHT06]) qui peut favoriser une stratégie de va-et-vient, nous ne pourrions pas discuter davantage de l'apport de ce travail dans notre recherche.

### 2.1.3 Compréhension de l'apport de la motricité

Susan Lederman a longtemps défendu l'existence de mécanismes de codage non temporels, en particuliers lors de ses travaux avec Taylor [LT72][Led74][TL75]. Puis, associée à Roberta

Klatzky [LK87], elle a montré que le toucher latéral est une procédure exploratoire optimale pour la discrimination de texture. On peut dès lors se demander pourquoi une procédure dynamique serait optimale au codage spatial ou intensif. Cependant, de manière cohérente avec les premiers travaux cités, elle précise que le mouvement sert à déplacer une fenêtre d'observation sur différents objets dans un but d'élargissement de l'expérience tactile et non à permettre l'observation du comportement d'objets en mouvement. Le mouvement aurait donc plutôt une fonction de navigation, comme le suggèrent les études qui montrent qu'un contrôle précis de la force ou de la vitesse d'exploration n'est pas déterminant dans les mécanismes perceptifs [Led83].

Les travaux de Smith, Gosselin et Houde [SGH02] révèlent paradoxalement que les sujets ajustent de manière optimale la force et la vitesse exploratoire pour observer avec le plus de constance possible les singularités de surface se présentant sous le doigt. Ils considèrent donc que le mouvement s'adapte automatiquement aux stimuli spatiotemporels, en plus d'être spatialement approprié à la propriété recherchée.

Pourtant, une étude récente de Lederman, Howe, Klatzky et Hamilton [LHKH04] met au contraire en lumière l'absence totale de contrôle de la force lors de l'exploration à vitesse gardée constante. Ce comportement pourrait apporter une meilleure sensibilité spatiale aux stimuli périphériques en permettant une réponse phasique des voies somesthésiques afférentes (cf. 1.6.3).

Il nous faut donc identifier clairement le rôle du mouvement de discrimination de texture, tâche qui pourrait nécessiter l'utilisation d'une stratégie différente par rapport à celles employées pour la détection de défaut ou le suivi de trajectoire.

#### 2.1.4 Design sensoriel

Nous avons expliqué en introduction qu'avant de concevoir un afficheur de texture, il est essentiel de mener une réflexion préliminaire basée sur des résultats psychophysiques. Aussi, au chapitre 6 nous proposons de traduire les résultats de notre contribution en recommandations de design à caractère technologique.

La caractérisation qui suit commence par nous renseigner sur les dimensions des espaces de travail et la résistance des capteurs/actionneurs à préférer pour ces afficheurs tactiles.

## 2.2 Conception d'un instrument de mesure transparent

Afin d'analyser les trajectoires de la pulpe du doigt au contact et les forces normales impliquées dans l'exploration de textures fines, il est nécessaire d'étudier quels moyens de mesure sont les mieux adaptés. Nous nous limitons à un modèle d'interaction bureautique transparent pour l'utilisateur, où celui-ci voit une texture affichée à l'écran, et peut la ressentir dans un espace de travail physique dédié à cet effet.



### 2.2.1 Réflexions sur l'existant.

*Mesure du mouvement* : de nombreux dispositifs isotoniques attachés ou non à l'homme ont été proposés pour faire l'acquisition du mouvement des membres supérieurs [Com95]. Outre le TDS (Tactile Display System) [RSA00], dispositif à chariot (figure 2.2) équipé de capteurs pour enregistrer le mouvement mais aussi de moteurs pour le restituer, de nombreuses solutions sont envisageables. On peut utiliser d'autres dispositifs à guidage par rails, des pantographes ou encore des traqueurs mécaniques comme le PHANToM<sup>®</sup> [KPNC04] de Sensable ou le DigiTracker [MPC04][ZGLM06] que nous avons conçu, équipés de dés ou de bagues appropriées (figure 2.3). Si l'inertie des pièces mobiles et/ou leur frottement peuvent être compensés mécaniquement ou si, comme dans le cas du DigiTracker, ces grandeurs sont transparentes pour l'utilisateur, l'étude de la stratégie de mouvement avec ces dispositifs nous est apparue incompatible avec la nécessité de liaison rigide du doigt à l'effecteur final. En effet, il est difficile de connaître précisément la position de l'extrémité du doigt au contact par rapport à celle de la sonde. Un système vidéo de capture du mouvement avec des marqueurs montés sur l'index a été testé mais n'a pas été retenu. L'encombrement de ces systèmes, même infrarouge [Com95] est prohibitif pour notre application..

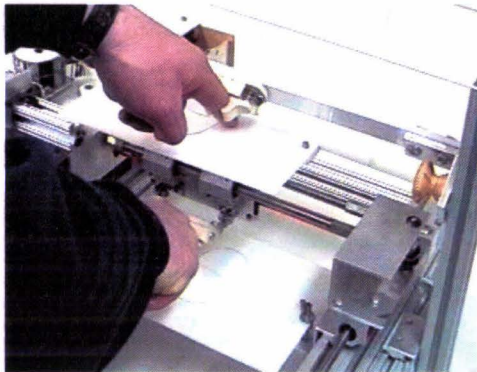


Fig. 2.2 – Tactile Display System

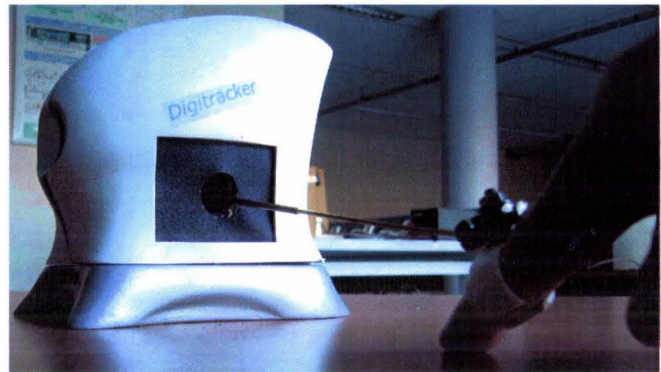


Fig. 2.3 – DigiTracker

*Mesure de la force d'appui* : la littérature fait état d'une grande variété de capteurs de force utilisables pour la réhabilitation fonctionnelle et les recherches en biomécanique. Parmi les technologies existantes, les jauges de contrainte sont les plus communément utilisées mais les films de fluoro-polymères (PVDF), les polymères conductifs, les matériaux piézoélectriques et les systèmes optiques (fibres optiques) peuvent aussi constituer des solutions plus compactes et précises.

Cependant, les capteurs du mouvement et des forces présentes au contact interfèrent souvent avec la gestuelle naturelle et la perception haptique des objets car ils sont situés entre le doigt et les surfaces ou sont trop près de la zone d'interaction (voir aussi 1.5.1). En ajoutant une masse additionnelle sur l'extrémité des membres supérieurs, ils peuvent perturber l'exploration. S'ils sont trop fragiles ils ne supporteront pas les forces importantes exercées par la main.

L'utilisation d'une plate-forme de Stewart schématisée sur la figure 2.4 nous est apparue être une alternative intéressante en terme de transparence. En effet, ces dispositifs sont généralement constitués d'une plate-forme mobile et d'une base jointes par six bras extensibles. Dans l'application envisagée, il est possible d'utiliser l'effecteur final comme support pour la texture et d'avoir recours à un design isométrique des bras. Ainsi, la position du point d'appui sur la texture et la force normale appliquée peuvent être mesurées.

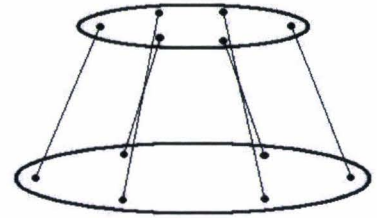


Fig. 2.4 – Plate-forme de Stewart

### 2.2.2 Proposition de capteur et description du principe de fonctionnement

En nous inspirant de la plate forme de stabilométrie créée par Bizzo en 1985 et normée par l'AFP (Association Française de Posturologie), nous avons conçu une plate-forme de force verticale à trois degrés de liberté (ddl) comme le montre la figure 2.5. Celle-ci permet l'acquisition du mouvement du doigt nu sur un plan de travail lisse à deux dimensions et de la force normale exercée par l'ensemble du doigt sur l'assiette. Elle mesure, à chaque instant d'échantillonnage, la position du point d'application des forces de réaction qui s'opposent au déplacement de la plate-forme sous l'effet des forces normales exercées par le doigt.

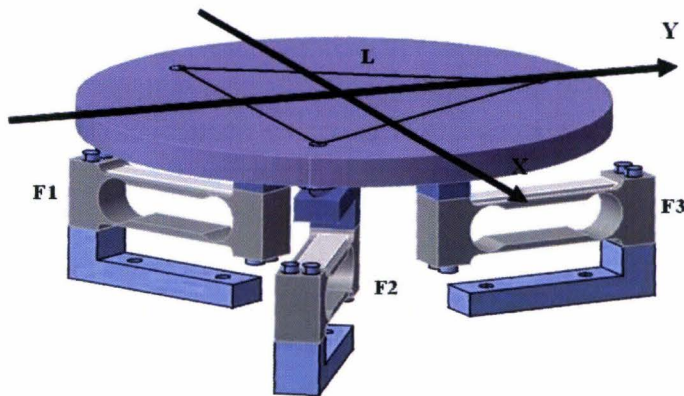


Fig. 2.5 – Plate forme de force verticale à trois degrés de liberté et pointage bureautique

Soient  $F_1, F_2, F_3$ , les intensités des forces normales qui sont appliquées de manière ponctuelle au sommet d'un triangle équilatéral de côté  $L$  centré sur l'assiette. Leur somme nommée  $F_{normale}$  détermine la force totale d'appui sur la surface. En utilisant la fonction vectorielle de Leibnitz et en faisant un changement de repère pour obtenir les déplacements suivant deux dimensions, il vient :

$$F_{normale} = F_1 + F_2 + F_3$$

$$X = \frac{L \times (F_2 - F_1)}{F_{normale}}$$

$$Y = \frac{L \times (2F_3 - F_2 - F_1)}{2 \times \sqrt{3} \times F_{normale}}$$

Ce dispositif de capture du mouvement dédié permet d'imposer des contraintes ergonomiques faibles car son effecteur final peut être encastré dans le meuble du bureau. Il peut ainsi remplacer une souris informatique. Nous avons décidé de l'équiper de cellules de pesée plutôt que de quartz piézoélectriques ou de plongeurs électromagnétiques, autres solutions possibles pour mesurer  $F_1, F_2, F_3$ .

### 2.2.3 Considérations de dimensionnement

En conditions bureautiques, un gain égal à deux entre l'espace de contrôle et l'espace d'affichage est recommandé dans les tâches de pointage, lorsque l'avant bras repose sur un support et que le poignet est libre en adduction/abduction [BM97]. Par exemple, lorsque l'extrémité de l'index parcourt une distance de 1mm, la distance parcourue à l'écran est de 2 mm. Ainsi, la distance  $L$ , égale à 227 mm a été choisie de telle sorte que l'on puisse bénéficier d'une aire de travail rectangulaire, quatre fois plus petite que celle de l'écran (17 pouces - zone d'affichage de 16 pouces) et centrée sur le centre de la plate-forme. Afin de choisir une étendue de mesure appropriée pour nos trois capteurs de force, il est nécessaire de connaître quelles sont les gammes potentielles de valeurs de la force normale appliquée en situation de reconnaissance de texture. Comme nous l'avons évoqué en introduction, en situation d'exploration d'un état de surface, quatre procédures peuvent être impliquées : la caresse latérale ou le suivi de contour (rugosité-forme), l'appui normal (élasticité), le toucher statique (température). Dans une activité de suivi de trajectoire et non d'exploration de texture, Lederman, Howe, Klatzky et Hamilton [LHKH04] ont étudié la variabilité de la force au contact avec le doigt nu immobile et en mouvement pour des vitesses de 22 et de 222 mm.s<sup>-1</sup>. Dans cette étude, les sujets frottent le doigt de manière latérale avec une amplitude de mouvement de 5 cm sur une surface lisse qui leur est dissimulée en appuyant de manière légère ou moyenne. Comme le montre le tableau 2.1 page 47, les forces restent inférieures à 3 N. Dans une activité où les sujets doivent presser une poutre en aluminium de toute leur force et maintenir l'appui durant cinq secondes avec l'extrémité de l'index, la moyenne des forces maximales contrôlables varient de 16.5 N pour l'interphalangienne proximale (voir fig. 1.6, page 20) à 55 N pour le poignet [TSEC94]. Cependant, il est généralement admis dans la littérature que les forces soient rarement supérieures à 10 N en situation d'exploration. Par conséquent, nous avons utilisé trois capteurs de pesage Scaime EP2 à

appui central en aluminium dont l'étendue de mesure (EM) est égale à 2 kg et dont l'erreur combinée (précision) est de 0.05 % de l'EM.

vitesse relative	nulle	22 mm.s <sup>-1</sup>	222 mm.s <sup>-1</sup>
force légère (N)	0.43	0.26	0.35
variation (%)	19	34	43
force moyenne (N)	2.04	1.29	1.40
variation (%)	8	22	21

Tab. 2.1 – Intensité des forces appliquées [LHKH04] et leur contrôle

Les conditionneurs sont réalisés avec des amplificateurs d'instrumentation (AD620) et des circuits de calibration. Les convertisseurs A/D sont des AD7707BR de 16 bits de précision opérant à basse fréquence (sigma-delta). Un microcontrôleur PIC 16C745 cadence l'envoi des informations par les liaisons série (USB).

Pour s'assurer de la parfaite transparence de la mesure par rapport au geste d'exploration, nous avons vérifié le comportement isométrique du plateau car il est effet important d'éviter toute sensation de déplacement de surface. Grâce à un vibromètre LASER Doppler, nous avons effectué une mesure en déplacement quasi-statique a posteriori et ainsi quantifié la raideur axiale du dispositif. Entre 0 et 10 N, nous avons obtenu une valeur maximale de 33N.mm<sup>-1</sup>. Selon Tan et al. [TSEC94], une raideur de 25 N.mm<sup>-1</sup> permet de ne pas ressentir de différence entre un « mur virtuel » et un « mur simulé » lorsque l'on presse un bouton. Casiez [Cas04] montre qu'une valeur de 15 N.mm<sup>-1</sup> est suffisante lorsque l'on utilise les doigts. Le dispositif possède une rigidité plus élevée que le seuil perceptif, de sorte qu'aucun déplacement de surface significatif ne viendra perturber le bon déroulement des mesures.

#### 2.2.4 Linéarité, justesse et nécessité de filtrage

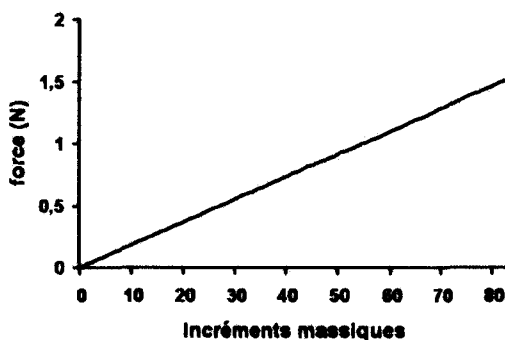


Fig. 2.6 – Étalonnage de vérification de la linéarité

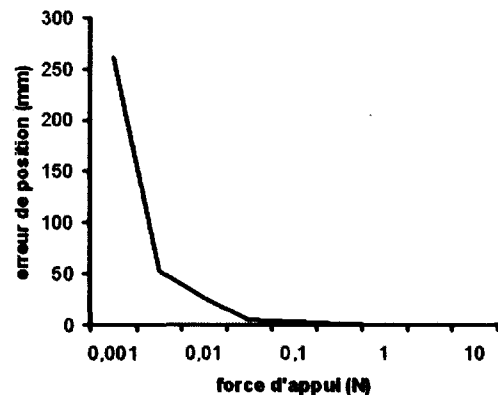


Fig. 2.7 – Erreur maximale théorique en mm

Nous avons vérifié la linéarité de la réponse du dispositif entre 0 et 1,5 N (figure 2.6) grâce à des masses de 1.87 g pesées à la balance et déposées à tour de rôle sur la plate-forme. Grâce à cet essai nous avons pu trouver une erreur de justesse maximale avoisinant les  $6.6 \cdot 10^{-3}$  N. Concernant la précision de la mesure en déplacement, l'erreur maximale théorique calculée avec les dérivées

partielles reste inférieure à 2 mm soit 1 % dans les deux directions (X, Y) pour des forces supérieures à 0.1 N comme le montre la figure 2.7. Les jauges et composants électroniques s'échauffent à la mise sous tension, et pour ce type de dispositif incluant trois montages en demi-pont de Wheatstone, ceci provoque des dérives thermiques du zéro. Par conséquent, un réglage du zéro garantissant la fidélité du dispositif est systématiquement effectué une heure après la mise sous tension avant le début des mesures.

La plate-forme de force peut être assimilée à une masse reposant sur trois ressorts. Le dispositif peut donc résonner dans ses modes propres et subir des oscillations de forte amplitude lorsqu'il est excité par des forces externes comme les impacts du doigt. Pour évaluer la dynamique de la structure de manière expérimentale, un accéléromètre a été posé au centre de l'assiette et un choc a été appliqué avec un marteau dédié à cet effet. La figure 2.8 indique la réponse temporelle à cette excitation et le spectre du gain par rapport à une valeur quadratique moyenne de  $10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$ . Le système est peu amorti et la résonance aiguë pour des fréquences avoisinant 100 Hz.

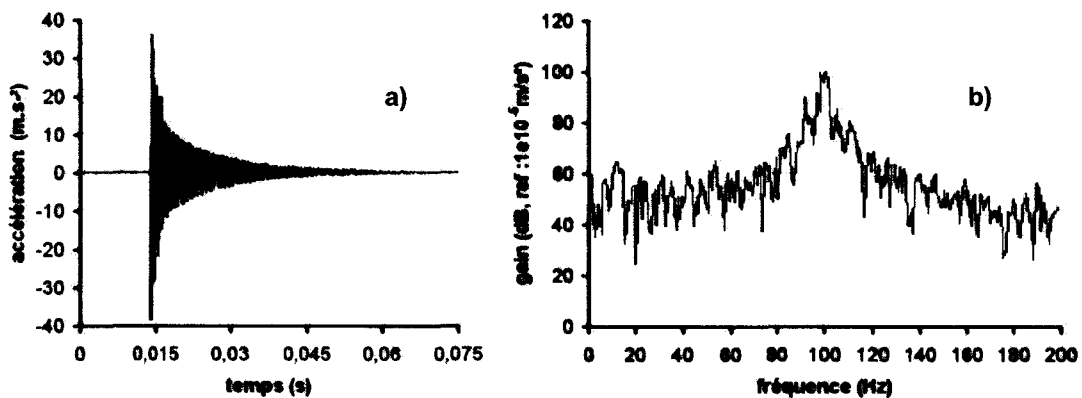


Fig. 2.8 – Réponse transitoire réponse temporelle a) et fréquentielle b) de la structure à un choc

Afin d'éviter tout enregistrement d'oscillations parasites liées à des excitations dans ces fréquences, un filtre passe-bas numérique de fréquence de coupure égale à 16.66 Hz est utilisé pour ne conserver que le macromouvement.

### 2.3 Expérience

Dans cette expérience, on propose aux sujets des activités tactiles d'identification et de discrimination afin d'étudier leur stratégie d'exploration dans le plan de la texture. Ceci vise à répondre aux objectifs que nous nous sommes fixés dans la section 2.1. (pp. 40-43) qui sont :

- la vérification de l'implication du mouvement tangentiel
- la caractérisation de la ou des procédure(s) exploratoire(s) impliquée(s) par ses invariants
- l'évaluation de l'apport du mouvement relatif
- l'analyse de l'espace de travail et de l'évolution des paramètres force et vitesse

Comme nous l'avons évoqué dans la section 2.2 en page 43, nous choisissons un modèle d'interaction bureautique non seulement pour inscrire cette étude dans le contexte du design d'afficheurs tactiles posés sur le bureau, mais aussi pour inscrire le sujet dans une activité de discrimination par la comparaison entre ce qu'il touche et ce qu'il voit grâce à deux afficheurs.

### 2.3.1 Sujets

Cette expérience a été menée avec un panel de dix étudiants volontaires droitiers (8 hommes, 2 femmes) âgés entre 18 et 25 ans. Les sujets sont choisis de telle sorte qu'ils soient naïfs sur la conception du dispositif de mesure et qu'ils n'aient jamais entendu parler du protocole expérimental auparavant. Nous leur demandons également d'ôter tout bijou porté sur les membres supérieurs.

### 2.3.2 Matériel expérimental

L'appareil de mesure est dissimulé dans une boîte parallélépipédique (30×30×60 cm) de telle sorte que l'axe X du dispositif soit orienté dans la direction proximale-distale du doigt. La boîte comporte une ouverture circulaire en façade et un repose-poignet en mousse confortable comme l'indique la figure 2.9. Tous les branchements électriques sont dissimulés. Un petit rideau permet de réduire le champs de son ouverture afin d'éviter que le sujet n'obtienne des informations visuelles sur le capteur<sup>2</sup> [LHKH04].

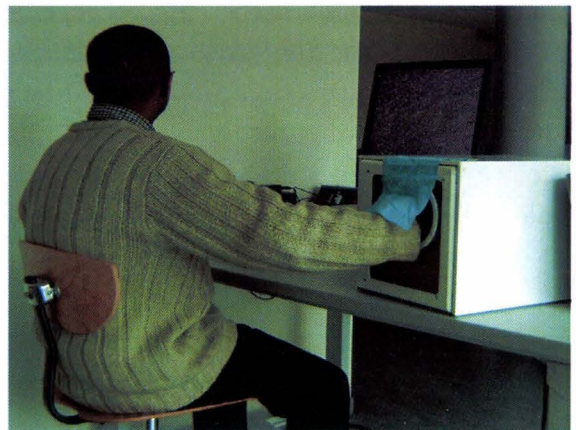


Fig. 2.9 – Mise en place expérimentale

Dans certaines phases de l'expérience, le sujet peut bénéficier de l'affichage (C++/OpenGL) à l'écran d'un avatar du doigt sur une texture sous forme de disque. Sa taille varie en fonction de l'approximation de l'aire de contact du doigt proposée en annexe A. Un film plastique et une épaisseur de mousse fixables sur le dispositif sont utilisés comme nous le spécifions par la suite. Une macro VBA-Excel permet une automatisation du traitement des résultats.

### 2.3.3 Méthode

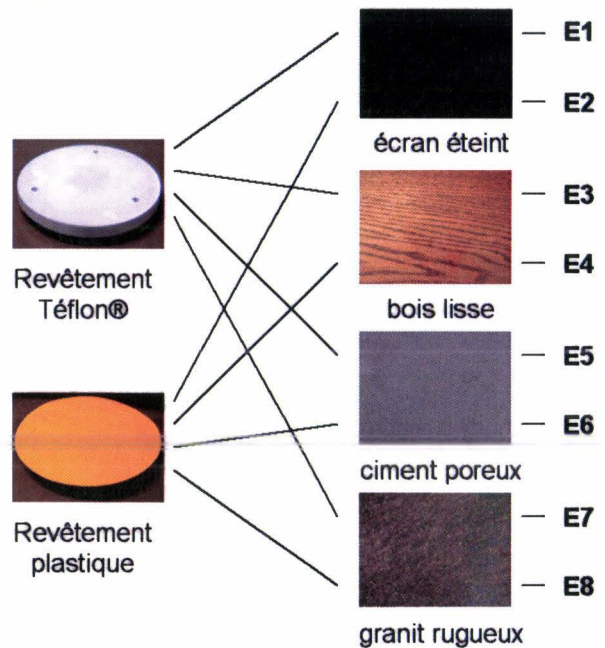
*-Aperçu général:* Afin de pouvoir analyser un geste du toucher obtenu dans des conditions naturelles, il nous est apparu indispensable que le sujet ne se focalise pas sur la mesure de son mouvement. Aussi, nous avons mis en place un protocole expérimental où l'on incite le sujet à une performance optimale dans la discrimination tactile de la texture. On lui demande donc à

---

<sup>2</sup> Mise en place expérimentale apparemment similaire utilisée pour des démonstrations très différentes. Travaux simultanés.

plusieurs reprises d'insérer la main dans la boîte pour explorer la surface avant de l'identifier. Notre dispositif permet l'enregistrement de la mesure de X, Y et  $F_n$  dès que  $F_n$  excède 0.1 N.

*-Protocole détaillé :* L'effecteur final du dispositif de mesure est utilisé comme texture fine. Afin d'obtenir plusieurs enregistrements ou « signatures gestuelles » pour chaque individu, nous effectuerons plusieurs essais. Nous avons mis en place un protocole pour éviter l'accommodation et contrôler l'importance du choix de surface sur le résultat obtenu. Chaque essai, effectué sur la plate-forme recouverte de lubrifiant de polytétrafluoréthylène (Téflon®), est accompagné d'un essai où celle-ci est recouverte d'un film plastique collé en sa surface. Bien que cette action ne modifie pas les propriétés métrologiques de la plate-forme, elle permet de bénéficier de surfaces physiques très différentes en fonction de leur tactilité, notamment des différences de frottement et de conductivité thermique qu'elles affichent. En effet, tandis que le plastique est plutôt collant et chaud, la surface de la plate-forme lubrifiée est froide et glissante avec un coefficient de frottement 1,3 fois moins élevé<sup>3</sup>. Le plastique possède aussi une moins bonne conductivité thermique<sup>4</sup>.



Exp. n°	matériau reconnu	identique affichage
E1		_____
E2		_____
E3		<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non
E..		<input type="checkbox"/> oui / <input type="checkbox"/> non
		..... / .....

Fig. 2.10 – Description des essais et du questionnaire d'évaluation

Parmi les quatre séquences de deux essais proposées, chacune est différente de par les conditions visuelles (figure 2.10). La première (E1-E2) s'effectue sans aucun affichage à l'écran, la seconde (E3-E4) s'effectue avec l'affichage d'un bois plastifié tandis que l'utilisateur contrôle le déplacement de son doigt à l'écran, la troisième et la quatrième de manière identique, mais respectivement avec un ciment d'apparence poreuse (E5-E6) et un gravier rugueux (E7-E8). Ceci permet de recueillir huit signatures. Ces textures incongrues sont utilisées pour faire inciter les participants à explorer la surface qui leur est présentée dans la boîte.

Les sujets ajustent tout d'abord leur posture tout comme lorsqu'ils sont en situation d'usage d'une souris informatique (figure 2.9). Ensuite, conformément aux indications du document qui leur est fourni, les participants doivent :

<sup>3</sup> Mesure du coefficient de frottement statique par l'angle limite de basculement de la plate-forme

<sup>4</sup> Dans la littérature, on donne des conductivités thermiques de 237, 0.25 et 0.03 W/mK pour l'aluminium, le Téflon® et le polyester

- Insérer leur main dans la boîte en la maintenant à l'horizontale et poser doucement leur poignet à l'emplacement prévu à cet effet.
- Sur indication de l'instructeur, **découvrir** une **nouvelle surface** présente 3cm en dessous de leur main **avec l'index**. L'essai débute dès qu'ils touchent la surface et prend fin au retentissement d'un signal sonore déclenché **cinq secondes** après le début de l'essai. Il ne leur est pas possible de recommencer.
- Entre chaque expérience, s'absenter environ une minute pour répondre au questionnaire puis revenir pour un nouvel essai.

Une phase de localisation de la surface est proposée à l'aide d'une épaisseur de mousse pour vérifier que le sujet a bien compris le protocole et qu'il ne cherche pas comment établir le contact avec la texture. On les prévient également qu'ils ne toucheront rien de sale, de désagréable ou même de dangereux.

Il est important de noter qu'aucune consigne suggérant la caresse, le frottement et même de manière plus générale le mouvement, n'est donnée à effectuer.

## 2.4 Résultats

La procédure exploratoire du toucher latéral est apparue nécessaire à la discrimination des textures fines. Les trajectoires, plutôt elliptiques (2.4.1, figure 2.11), font penser à un mouvement de badigeonnage, avec une variabilité très importante entre les paramètres d'amplitude, de force et de vitesse (2.4.2, figure 2.12). Ceci s'expliquerait en partie par des différences de stratégie d'utilisation de la chaîne cinématique des membres supérieurs (2.4.2, figure 2.14). Ces observations suggèrent que le mouvement relatif ne servirait qu'à élargir l'aire de stimulation. Toutefois, nous émettons des réserves : la restriction volontaire du mouvement pourrait aussi refléter une stratégie cachée de déplacement de l'aire de stimulation sur la pulpe et ceci en accord avec le caractère chaotique des trajectoires observées. Détaillons ces résultats.

### 2.4.1 Premières observations

*-Présence du mouvement* : tout d'abord, les enregistrements des trajectoires du mouvement (figure 2.11) montrent de manière évidente que la discrimination de texture est une forme de toucher dynamique<sup>5</sup> car le déplacement est omniprésent dans les essais. Ceci est un premier résultat qui est loin d'être évident puisque les participants pouvaient toujours opter pour une stratégie d'appui normal ou de contact statique avec le dispositif.

*-Implication du toucher latéral* : l'étalement des trajectoires dans tous les essais montre le caractère non plus optimal, mais nécessaire du frottement tangentiel lors de la discrimination de texture fine. En accord avec l'étude de Lederman et Klatzky [KL87], cela suggère que tous les sujets, à travers tous les essais, aient cherché à obtenir des informations sur la rugosité du matériau pour répondre au questionnaire. Toutefois, à ce stade, il est encore difficile de cerner si

---

<sup>5</sup> À ne pas confondre avec le « toucher dynamique » de Turvey [CT00]. Il désigne ici le contraire de statique



les sujets ont essayé d'évaluer simultanément la dureté du matériau en surface en appliquant un appui normal.

-*Discussion sur la forme* : l'observation des micromouvements d'exploration révèle des trajectoires très différentes qui ne semblent a priori privilégier aucune direction et témoigne d'une isotropie motrice. Parmi ces signatures, les mouvements « elliptiques » sont ceux qui semblent revenir le plus fréquemment. Ce résultat peut contraster avec le stéréotype proposé par Lederman et Klatzky et l'interprétation qui en est souvent faite. En effet, il est d'usage de penser que la texture est évaluée par un mouvement radial-ulnaire ou proximal-distal (« sideways movement »). Les formes obtenues révèlent plutôt un geste de « badigeonnage » comme si la pulpe du doigt pouvait s'enduire de la texture.

Dans leurs expériences sur la perception de la rugosité, Gamzu et Ahissar [GA01] considèrent que les sujets modifient la trajectoire de leur doigt comme bon leur semble. Ils pensent que les différences entre sujets pourraient s'expliquer par l'histoire idiosyncratique (individuelle et particulière) de leur expérience tactile. Dans notre expérience, les différences intra-sujet sont présentes, tout comme les différences inter-sujets. Avec nos stimuli, les sujets ne cherchent pas à reproduire un même geste pour explorer la texture.

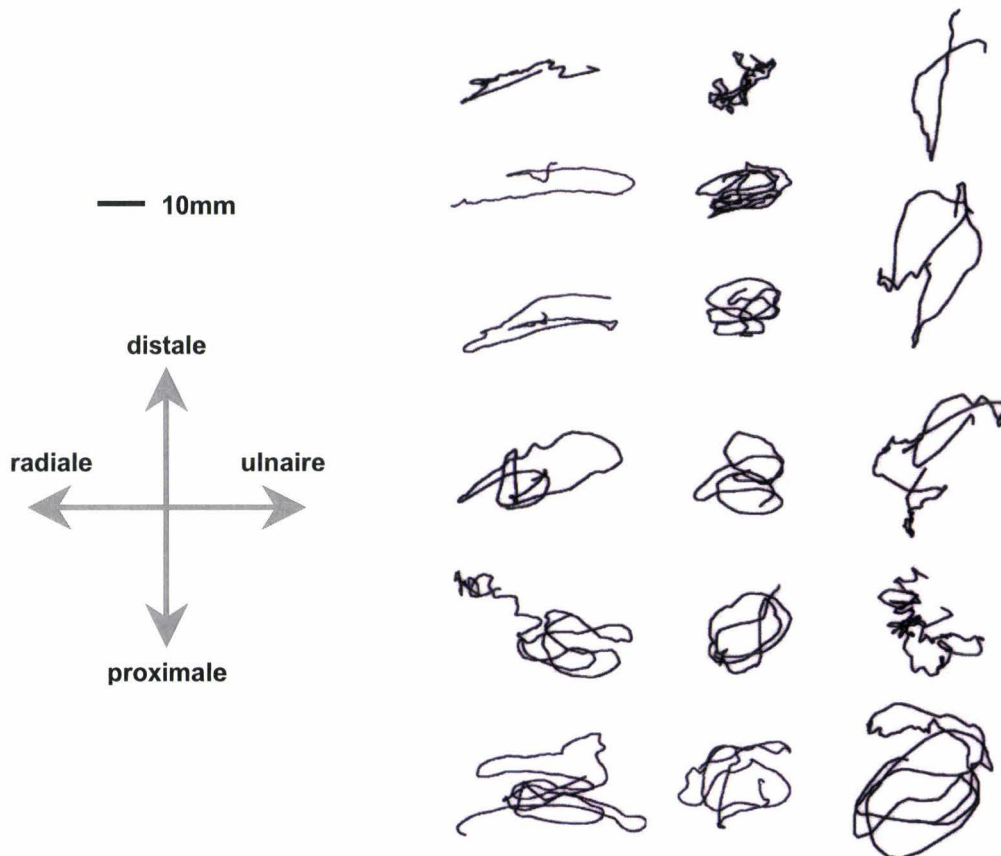


Fig. 2.11 – Trajectoires enregistrées au contact

2.4.2 Détermination des éventuels invariants du mouvement.

Outre la forme, l’amplitude des déplacements, la force moyenne, ainsi que la vitesse moyenne ont été examinées. La force maximale a aussi été retenue pour déterminer si d’autres procédures exploratoires comme l’appui normal peuvent accompagner les mouvements tangentiels.

	amp. X (mm)	amp. Y (mm)	force moy. (N)	force max. (N)	vitesse moy. (cm.s <sup>-1</sup> )
<b>moyenne M</b>	57,79	45,31	0,63	1,21	8,72
<b>I. C. à -95%</b>	52,76	41,39	0,53	1,01	7,97
<b>I. C. à 95%</b>	61,54	48,87	0,74	1,42	9,48
<b>minimum</b>	7,74	11,68	0,18	0,31	0,31
<b>maximum</b>	<b>137,00</b>	<b>93,68</b>	<b>2,06</b>	<b>5,48</b>	<b>18,04</b>
<b>5<sup>ème</sup> percentile</b>	22,86	18,26	0,19	0,37	4,05
<b>95<sup>ème</sup> percentile</b>	97,27	84,38	1,62	2,97	14,48
<b>écart type</b>	23,67	19,60	0,43	0,93	3,38

Tab. 2.2 – Statistiques descriptives

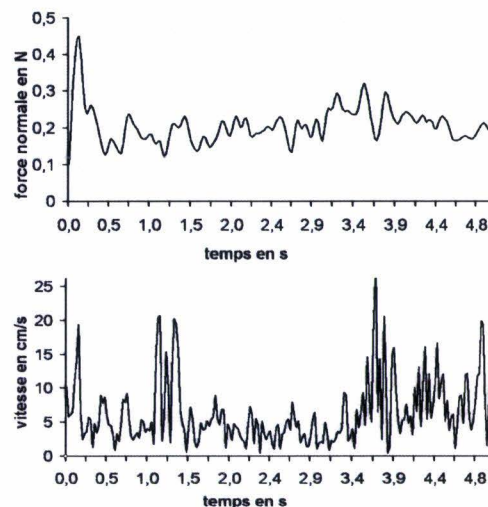


Fig. 2.12 – Force normale et vitesse au cours d’un essai

*Procédure exploratoire impliquée* : la description quantitative des résultats confirme que nous sommes en présence du toucher latéral. L’amplitude moyenne des mouvements est une valeur suffisante pour affirmer la présence d’un mouvement tangentiel contrôlé, les forces normales suffisamment faibles pour permettre le glissement. En l’absence de mouvement d’ensemble du doigt, l’ordre de grandeur du déplacement du barycentre sous la pulpe reste petit devant les amplitudes que nous avons trouvées. On peut s’en convaincre avec les dimensions de l’aire elliptique de stimulation (figure 2.13) entre un doigt statique et une surface. Celles-ci restent bien inférieures à celles décrites dans le tableau 2.2.

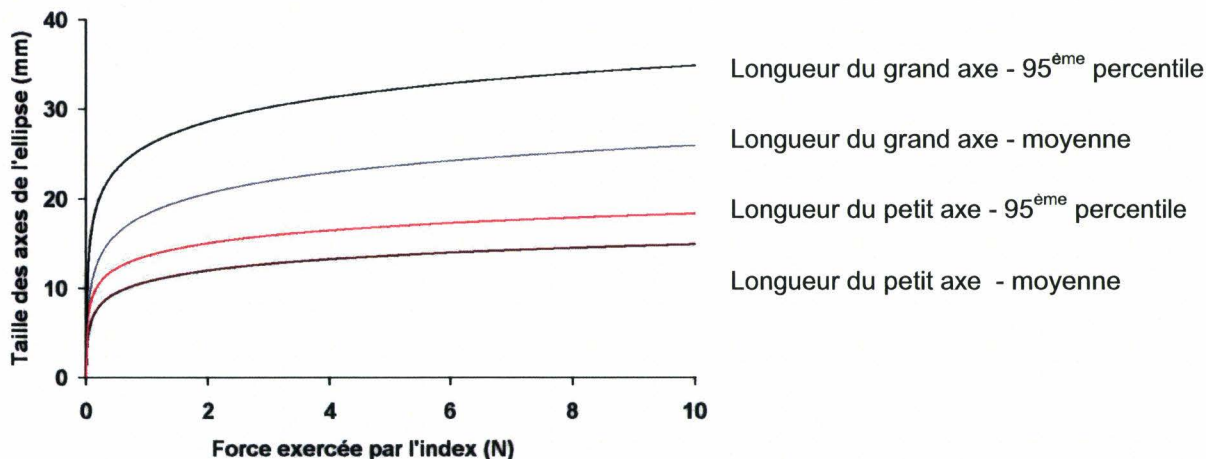


Fig. 2.13 – Taille des axes de l’ellipse en fonction de la force appliquée (cf. annexe A)

Aucune direction de mouvement n'est privilégiée. On retrouve bien des mouvements qui sont en moyenne de plus grande amplitude dans la direction radiale-ulnaire que dans la direction proximale-distale. Pourtant, on ne peut pas conclure à une direction d'exploration favorite dans le plan tangentiel. En accord avec Lederman et Klatzky, les sujets travaillent sur des « surfaces intérieures » (moyenne égale à 26,18 cm<sup>2</sup> et maximum de 128,37 cm<sup>2</sup>) quand on compare leur espace de travail à l'aire totale mise à leur disposition (412,90 cm<sup>2</sup>).

Bien qu'une force de 5.48 N ait été enregistrée, une valeur moyenne de 0,63 N pour la force moyenne appliquée montre que les sujets ne cherchent pas à évaluer l'élasticité du dispositif par un appui normal important. Cette valeur est même inférieure à celle que les sujets ont adopté dans l'étude de Lederman, Howe, Klatzky et Hamilton, dont les résultats sont résumés dans le tableau 2.1.

Une vitesse moyenne de 8.72 cm.s<sup>-1</sup> a été calculée. Cependant, l'examen des profils de distribution en vitesse suggère des valeurs plus importantes comprises entre 10 et 25 cm.s<sup>-1</sup>, lorsque le doigt effectue des déplacements de plusieurs centimètres. Ces valeurs contrastent avec celles obtenues par Peine, Foucher et Howe [PFH97]. Dans leur expérience, des chirurgiens expérimentés devaient localiser des tumeurs simulées dans des tissus mous. Une mesure de déplacement (tracking) optique a révélé des maxima de 120 mm.s<sup>-1</sup> pour 90% des participants. Cependant cette différence s'explique assez facilement. L'appui normal est une procédure exploratoire privilégiée pour la discrimination de l'élasticité. Nos résultats décrivent une autre forme d'exploration caractérisée comme le montre la figure 2.12 de la page 53, par une faible force d'appui accompagnant un geste rapide.

*Variabilité intra et inter-sujets importante* : dans la section précédente, une grande diversité des formes du mouvement a été présentée et les essais permettent de constater une grande variabilité inter et intra sujets dans l'amplitude des mouvements. En ce qui concerne la force d'appui (tableau 2.2), nous obtenons un coefficient de variation de la force normale (rapport entre l'écart type et la moyenne) supérieur à 68%. Ceci nous permet de rejoindre les conclusions de Lederman, Howe, Klatzky et Hamilton : un contrôle précis de la force d'appui ne fait pas partie du comportement naturel du sujet durant l'exploration. La présente expérience supporte encore plus cette hypothèse puisque les sujets sont réellement en situation de discrimination de texture. Dans l'étude précédente, on leur demandait de parcourir la texture en maintenant une force constante. La gamme de vitesse utilisée est également être très étalée. Il est donc nécessaire d'approfondir l'explication de ce constat. Ainsi, nous nous demandons si de telles différences de comportement font réellement partie de la stratégie d'exploration ou si elles peuvent être imputées à d'autres facteurs inhérents aux conditions expérimentales.

*Absence d'influence des conditions expérimentales* : dans cette expérience, nous avons utilisé trois artifices visant à réduire l'accommodation que sont le changement de texture physique, l'affichage à l'écran et la modification du grain de texture affichée par paire. Nous nous demandons si un biais expérimental peut expliquer la variabilité. Pour répondre à cette question,

nous avons effectué des analyses de variance multiples plus connues sous le nom de *MANOVAs*. Avant même d'aborder des procédures statistiques multivariées, il faut s'assurer que toutes les variables suivent bien une distribution normale. Pour cela, le test de Shapiro-Wilks (W) et celui de Levene pour l'homogénéité de variance sont utilisés. L'amplitude du mouvement suivant X est la seule variable à suivre une loi normale. La force moyenne et la force maximale suivent une distribution de Weibull avec une fréquence très importante de faibles valeurs. Pour pouvoir tester les effets des conditions expérimentales, il est proposé d'effectuer une transformation de Box-Cox des données afin de les normaliser et d'homogénéiser leurs variances. La fonction suivante est utilisée :

$$BC(X) = (X^\lambda - 1) / \lambda$$

avec :  $\lambda = 0,65$  pour la correction de l'amplitude du mouvement et la vitesse et  $\lambda = -0,25$  pour la « normalisation » des distributions de Weibull. Ceci nous permet de préserver une corrélation positive (Pearson) de 0.99, 1.00, 0.92, 0.88, 1 entre le nouveau jeu de variables dépendantes (VDs) et les variables amp. X, amp. Y, force moy., force max., vitesse moy.

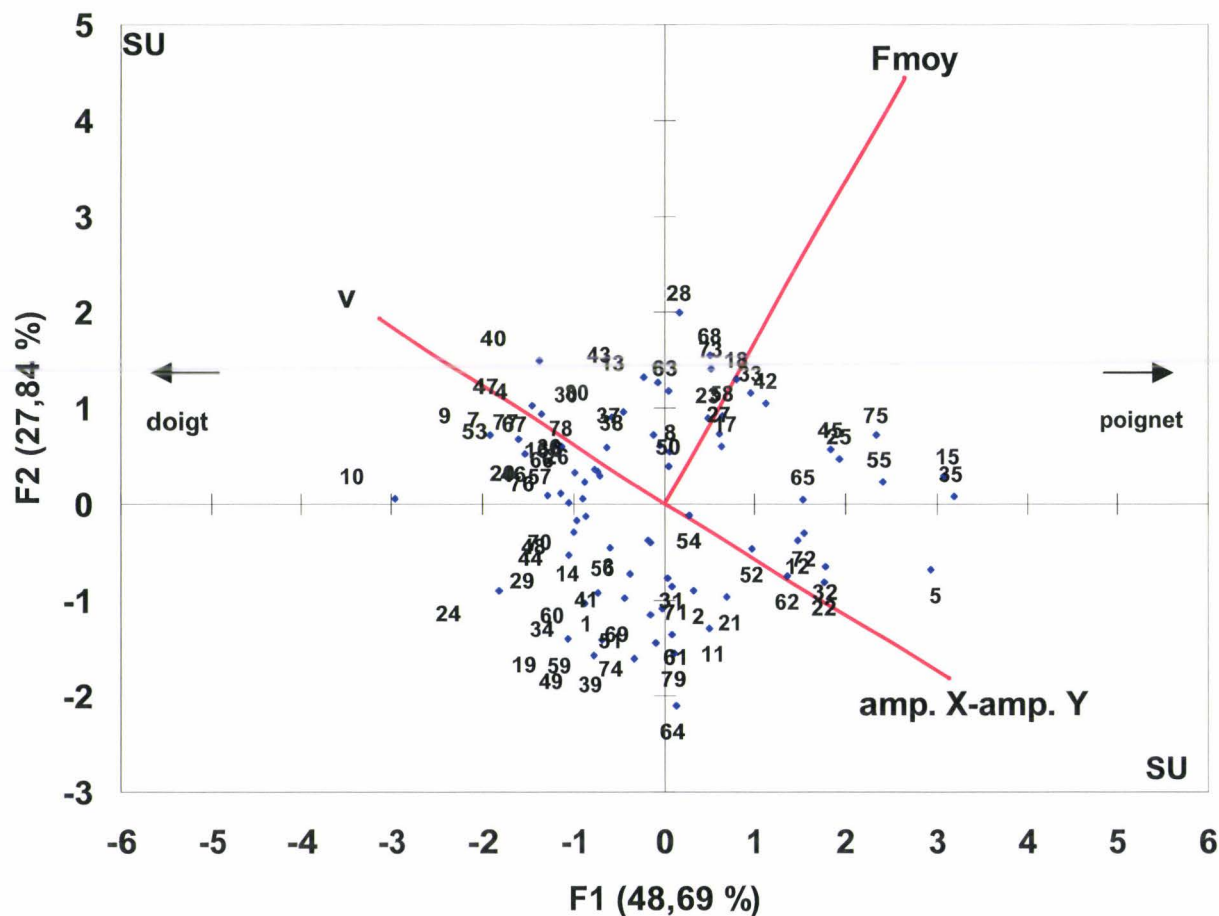
Vérifions à présent si les conditions expérimentales ont entraîné des différences de moyennes entre les VDs des différents groupes. Les analyses de variance multiples (MANOVAs) sont des tests statistiques basées sur le calcul des interdistances entre les vecteurs des valeurs moyennes (centroïdes). Chaque variable dépendante y est pondérée pour maximiser le F de Fisher entre les groupes de variables dépendantes (cf. annexe I). Leurs avantages sont multiples. D'abord elles permettent de trouver en un seul test quel facteur est vraiment important. Ensuite, elles protègent contre les erreurs de type I (l'hypothèse nulle est rejetée alors qu'elle est vraie). Enfin, elles peuvent révéler des différences non découvertes par des tests univariés (ANOVA). Vérifions si nos données sont compatibles avec ces tests. Le logiciel *Statsoft Statistica*<sup>®</sup> nous permet de calculer une valeur de 1,65 (< 3) pour le PK (test basé sur le kurtosis multivarié) du test de Mardia ce qui indique que la normalité multivariée est présente. Le test de sphéricité de Bartlett, garant de l'homoscédasticité des variances est significatif ( $p=0.021$ ). Ceci permet de rejeter l'hypothèse nulle suivant laquelle il n'y aurait pas de corrélation entre les variables.

Si l'on examine les différences de moyennes des VDs issues des conditions expérimentales E pairs et E impairs signalés sur la figure 2.10 en page 50, on obtient un *Wilks'lambda* = 0.87,  $F(5, 74) = 2.21$ ,  $p = 0.06$ . Au seuil de confiance de 95%, ceci ne permet pas d'assurer qu'il existe des différences significatives de moyenne entre le groupe d'observations où le revêtement Téflon a été touché et celui où le revêtement plastique a été touché, même par combinaison linéaire optimisée entre les VDs.

Intéressons nous à présent aux différences de moyennes entre les VDs issues de E<sub>1,2</sub> et les E<sub>3,4,5,6,7,8</sub>. Comme les deux groupes ne comportent pas le même nombre d'individus, on calculera, conformément aux recommandations de Milliken et Johnson, une somme des carrés des écarts de type III, tenant compte de la variance comme si les groupes étaient de même taille (la fonction

testée est indépendante du nombre d'observations). Le test statistique -  $Wilks'lambda = 0.94, F(5, 74) = 0.86, p = 0.51$  - ne permet pas de montrer qu'il existe un effet du facteur affichage.

Si on s'intéresse au facteur « texture affichée » en essayant de voir si des différences entre les paramètres ont pu émerger entre les groupes  $E_{3,4}$ ,  $E_{5,6}$  et  $E_{7,8}$ , on ne trouve pas non plus d'effet significatif avec un  $Wilks'lambda = 0.86, F(10, 106) = 0.81, p = 0.62$ .



**Fig. 2.14 – Biplot de corrélation – La longueur du vecteur variable est représentative de son écart-type. L'angle entre les variables est lié à leur corrélation. La projection d'une observation sur une variable permet de conclure quant à son niveau relatif sur celle-ci. La distance entre deux observations est proportionnelle à la distance de Mahalanobis sans unité (SU) entre les vecteurs.**

*Explication ergonomique :* par l'analyse des relations linéaires entre variables dépendantes, l'analyse en composantes principales (ACP) permet l'identification intuitive de la présence de corrélations entre variables et de groupes homogènes d'observations ou au contraire d'observations atypiques. Dans le paragraphe ci-dessus, nous avons constaté que la conception de notre protocole expérimental ne nous permet pas d'expliquer les différences stratégiques. Nous allons analyser si des groupes peuvent se dégager par d'autres facteurs issus d'une recherche lexicale sur le sens à donner aux corrélations et au positionnement des individus par rapport aux valeurs des variables. Dans notre étude nous allons retenir trois variables quantitatives : la force

moyenne  $F_{moy.}$ , la vitesse moyenne  $v$  et une troisième variable que nous appellerons « forme ». Cette dernière est égale à la différence entre l'amplitude du mouvement dans la direction radiale/ulnaire et celle suivant la direction proximale/distale. Ceci nous permet d'évaluer la corrélation entre la forme de nos signatures et les paramètres force et vitesse. Ici, nous projetons donc les observations depuis l'espace à 3 dimensions de nos variables vers un espace à 2 dimensions des facteurs explicatifs pour que la quantité maximale de l'information contenue dans la variance totale du nuage de points soit conservée (figure 2.14, page 56). Les tests de normalité et d'homoscédasticité multivariées sont effectués avec les mêmes méthodes que précédemment. Le logiciel SPSS® est utilisé pour vérifier que les données sont bien factorisables grâce à l'indice Kaiser-Meyer-Olkin. L'indice KMO de 0.74 prédit une factorisation de qualité moyenne, ce qui est satisfaisant compte tenu qu'il existe des corrélations significatives entre les variables. Notre analyse permet d'expliquer 76,53 % de la variance grâce à deux facteurs. Cependant, seul le premier facteur (F1) possède une valeur propre égale à 1.46 (une valeur propre doit être considérée si elle est supérieure à 1). Aussi, l'analyse sera limitée à celui-ci car nous avons une valeur de 0.835 pour le suivant. Ce facteur émerge grâce aux contributions de la vitesse à hauteur de 37 %, de la force normale à 26 % et de la variable forme à 37 %.

Comme le montre la figure 2.14 page 56, le facteur F1 semble être un facteur ergonomique/biomécanique qui fait apparaître une variabilité liée aux articulations impliquées dans le mouvement. En effet, les coefficients de corrélation de Pearson, mesure de la relation linéaire entre le facteur F1 et ces mêmes variables sont respectivement égaux à -0,732, 0.735 et 0.620. Les mouvements rapides se font au détriment de la force d'appui et des mouvements d'adduction/abduction du poignet dans la direction radiale/ulnaire. Ainsi, les trajectoires dans la direction proximales-distales s'accompagnent d'appuis légers. Le positionnement des individus sur cet axe confirme cette interprétation, comme le montre le tableau 2.3, où nous reportons, par ordre de contribution au résultat, les valeurs obtenues des six observations les plus représentatives de la variance. Il est aussi intéressant de noter qu'il n'existe pas de corrélation entre la force d'appui et les deux autres variables dépendantes. Nous pouvions déjà nous en apercevoir en examinant les relevés comme ceux la figure 2.14 de la page 56 : les accélérations ou décélérations du doigt ne s'accompagnent pas nécessairement de variation de force normale.

Numéro de l'observation	Contributions des observations au facteur F1 (%)	amp. X (mm)	amp. Y (mm)	force moy. (N)	vitesse moy. (cm.s <sup>-1</sup> )
35	8,9	113,1	28,0	1,8	5,0
15	8,2	96,3	28,2	1,2	4,3
10	7,6	10,1	51,6	0,3	18,0
5	7,5	137,0	35,0	0,9	5,4
55	5,0	73,9	23,7	0,89	5,0
75	4,7	79,3	45,3	1,5	3,9

Tab. 2.3 – Observations ayant le plus contribué à la formation du facteur F1

*Restriction volontaire du mouvement* : on veut savoir, compte-tenu des résultats présentés dans les tableaux 2.3 et 2.4, si l'homme restreint volontairement son mouvement pour des raisons de

confort ergonomique du fait de limitations anthropométriques ou si, au contraire, un petit mouvement sur la surface décrite suffit vraiment à la perception. Nous avons trouvé une étude très complète sur la cinématique des doigts, pouce excepté, appliquée au design des interfaces homme-machine dans la littérature [VH01]. Elle contient des représentations illustrées de l'espace maximal atteignable avec les doigts de la main à l'exception du pouce. Cependant, ce travail ne nous permet pas d'évaluer précisément la surface utile au contact en situation réelle de toucher. D'une part, l'intersection volume-surface avec contrainte d'inclinaison maximale pour que la pulpe du doigt reste au contact avec la surface n'est pas disponible. D'autre part, cette étude ne tient pas compte de conditions de travail ergonomiques : le sujet pourrait choisir de ne pas exploiter tout l'espace qu'il est en mesure d'atteindre pour des raisons de confort. Dans cette étude, Venema et Hannaford utilisent les données de Buchholz qui fournissent les longueurs entre articulations d'un homme de taille moyenne. À cause d'une recherche bibliographique divergente sur les angles maximaux décrits par les articulations, ils les mesurent finalement sur leur propre doigt et proposent un angle de  $50^\circ$  en extension pour la phalange distale. Pour notre part, nous considérerons que cette phalange ne peut subir d'extension.

${}_{paume}^{poignet}T$	poignet	adduction	$\theta_{poignet}$	$47^\circ \times \sigma$
		abduction		$27^\circ \times \sigma$
		flexion	$\varphi_{poignet}$	$90^\circ \times \sigma$
		extension		$85^\circ \times \sigma$
	paume	longueur	$l_{paume}$	100 mm
${}_{pm}^{amp}T$	articulation métacarpo-phalangienne	adduction	$\theta_{amp}$	$15^\circ \times \sigma$
		abduction		$15^\circ \times \sigma$
		flexion	$\varphi_{amp}$	$90^\circ \times \sigma$
		extension		$45^\circ \times \sigma$
	phalange métacarpienne	longueur	$l_{pm}$	48.3 mm
${}_{pp}^{aip}T$	articulation interphalangienne proximale	flexion	$\varphi_{aip}$	$105^\circ \times \sigma$
	phalange proximale	longueur	$l_{pp}$	28.2 mm
${}_{pd}^{aid}T$	articulation interphalangienne distale	flexion	$\varphi_{aip}$	$90^\circ \times \sigma$
	phalange distale	longueur	$l_{pd}$	19.1 mm

Tab. 2.4 – Paramètres de la transformation. Nous introduisons un indice d'inconfort  $\sigma$  nous permettant de définir une zone d'exploration en situation de confort.

Nous proposons d'effectuer une transformation en cinématique avant directe entre l'espace à six dimensions du mouvement des articulations et l'espace cartésien à trois dimensions où le doigt peut évoluer. Cette transformation nommée  ${}_{pd}^{poignet}CA$ , permet de calculer l'espace de travail atteignable par le bout du doigt. Il est fonction de l'amplitude en rotation des articulations, allant du poignet à l'articulation interphalangienne distale et suit la relation :

$${}^{poignet}_{pd}CA = {}^{poignet}_{paume}T {}^{amp}_{pm}T {}^{aip}_{pp}T {}^{aid}_{pd}T$$

où  ${}^a_bT$  suivant les valeurs indiquées dans le tableau 2.4 s'exprime comme une matrice de transformation en coordonnées homogènes qui permet d'appliquer à un point de l'espace cartésien une translation de  $a$  à  $b$  puis des rotations d'adduction/abduction et/ou de flexion/extension autour de l'articulation a telles que :

$${}^a_bT = \begin{pmatrix} \cos(\theta_a) & -\sin(\beta_a) & 0 & -\sin(\beta_a)l_b \\ \cos(\varphi_a)\sin(\theta_a) & \cos(\varphi_a)\cos(\theta_a) & -\sin(\theta_a) & \cos(\varphi_a)\cos(\theta_a)l_b \\ \sin(\varphi_a)\sin(\theta_a) & \sin(\varphi_a)\cos(\theta_a) & \cos(\theta_a) & \sin(\varphi_a)\cos(\theta_a)l_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

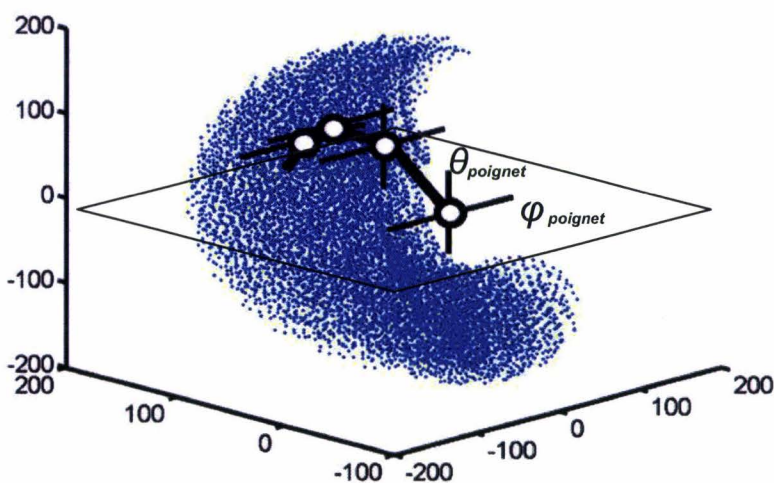


Fig. 2.15 – Espace maximal atteignable par l'extrémité de l'index en conditions avant bras posé. Les dimensions sont exprimées en mm. L'indice d'inconfort est maximal -  $\sigma=1.0$ .

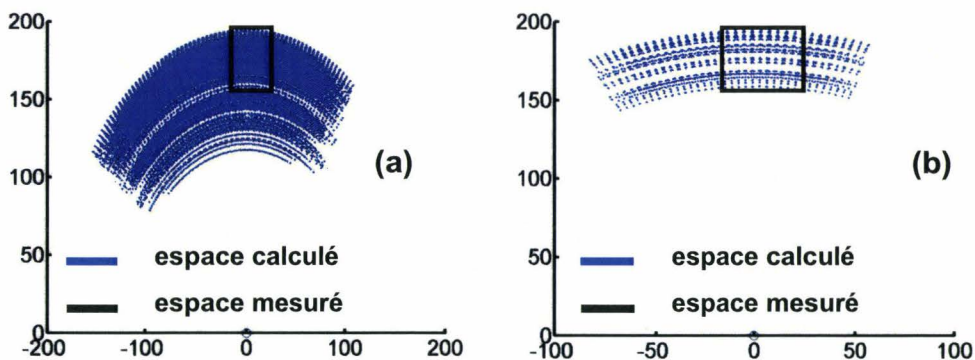


Fig. 2.16 – Espace maximal atteignable par la pulpe au contact, avant bras posé au contact. L'angle d'inclinaison entre la phalange distale et la surface reste inférieur à  $90^\circ$ . La figure (a) représente l'espace atteignable avec un indice d'inconfort  $\sigma=1.0$  tandis que  $\sigma=0.5$  pour la figure (b).



Le calcul de chacun des points constitutifs du volume occasionne un temps de calcul considérable. Nous discrétiserons donc l'espace du mouvement avec un pas de  $2,5^\circ$  suivant chacune des dimensions (figure 2.15, page 59).

Le figure 2.16 de la page 59 montre qu'une limitation de nature cinématique est possible dans la direction proximale distale. Cependant, même dans ces conditions, les participants auraient pu bénéficier d'un espace de travail considérablement plus grand en utilisant les adductions/abductions du poignet. Il semblerait donc que cette restriction du mouvement soit caractéristique de la stratégie exploratoire. Le toucher latéral est donc aussi caractérisé par des amplitudes de mouvement très confortables qui ne devraient pas entraîner un effort musculaire significatif.

#### 2.4.3 Comparaison aux résultats de Smith, Gosselin et Houde

Dans la section précédente, nous avons comparé nos observations aux résultats de Lederman et ses associés. Nous avons trouvé une forte concordance. Étudions à présent notre positionnement par rapport à l'étude concurrente de Smith, Gosselin et Houde [SGH02].

*Trajectoires explorées* : Smith et ses collègues ont trouvé qu'il existe une forte consistance dans la stratégie exploratoire employée par les sujets. Après leurs premiers essais, les sujets touchaient la périphérie du disque pour débiter l'exploration à partir d'une balise spatiale ou d'un repère qu'ils s'étaient fixé. Ensuite, ils effectuaient des mouvements de balayage de gauche à droite. Aucun d'entre eux ne formait des trajectoires dans la direction distale-proximale suivant l'axe de l'index mais un sujet effectuait occasionnellement une recherche en forme de spirale. Notre étude ne rejoint pas du tout ces conclusions car nous avons trouvé des trajectoires tout à fait bidimensionnelles dans le plan de la texture générées aléatoirement par les sujets. Les amplitudes de mouvement sont très restreintes et ne sont imposées ni par la géométrie de la surface, ni par des limitations anthropométriques. Smith et ses collègues suggèrent une explication aux différences trouvées par rapport aux résultats de Lederman et Klatzky auxquels nous adhérons davantage : la tâche de localisation de cible tactile et l'absence de retour visuel ne conduirait pas au même geste exploratoire que celui constaté lors de la discrimination de rugosité. Notre étude ne révèle cependant pas de différence significative sur les paramètres du mouvement occasionnée par des différences entre les conditions en aveugle et les conditions visuelles. Ainsi, nous favorisons leur première explication : le mouvement dirigé de leurs sujets vise à localiser un défaut. Dans l'approche de Lederman, Klatzky et la nôtre, la taille de l'espace de travail est relativement constante pour tous les essais, puisque quelques allers-retour du doigt sur un petit espace peuvent suffire. Dans l'étude concurrente, les dimensions de l'espace de travail peuvent augmenter d'autant plus que la singularité n'a pas été détectée. Au contraire, l'action peut s'arrêter ou devenir très locale dès qu'elle l'est. La procédure exploratoire invoquée n'est dès lors pas celle du toucher latéral et s'apparente au « contour following » ou suivi de contour, une procédure exploratoire dynamique de la main qui maintient un contact sur le contour d'un objet en défilement. Typiquement l'action est peu appuyée et non répétitive sur un segment du contour,

stoppant ou changeant de direction lors de discontinuités. En général, cette procédure exploratoire ne se produit pas sur une surface homogène.

*Force normale* : la valeur moyenne de 0.63 N de la force normale que nous avons trouvée est tout à fait comparable aux valeurs moyennes rapportées comprises entre 0.49 N et 0.64 N. Cependant, la faible variabilité des résultats de Smith, Gosselin et Houde contraste vraiment avec la forte variabilité des nôtres (> 68 %), supportée par les études de Lederman, Howe, Klatzky et Hamilton. Dans ces dernières la variation de la force normale est comprise entre 8 % et 43 %, alors que l'on demande explicitement aux sujets de contrôler leur force. Afin de justifier le fait que la saillance de la variation en force ne n'apporte rien à la perception, Smith et al. se sont appuyés sur les études neurophysiologiques de Blake [BJ97]. Dans leur tâche de localisation d'une non-uniformité, ils suggèrent que la force normale au contact soit suffisante pour causer la déformation de la peau autour d'une aspérité en surface et que son accroissement ne fait qu'augmenter la pression sur la peau. Au contraire lorsque la peau est au contact de structures enfoncées (trous), l'accroissement de la force normale peut contribuer à l'emprisonnement de la peau. Dans ces études le geste du toucher dessert pourtant une stratégie d'autostimulation par une constance des paramètres du mouvement impliqués dans les stratégies.

Au final, l'étude de Smith et al. [SGH02] constitue une référence particulièrement intéressante pour notre étude car elle montre à quel point la procédure exploratoire invoquée peut différer à l'occasion d'une recherche d'information en relation avec le détail de forme sur une surface.

## **2.5 Discussion**

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé le mouvement volontaire du toucher de texture à l'échelle du système main-doigt. Ceci nous a permis de vérifier sa compatibilité avec la vibration au contact, de mieux le caractériser et de discuter son implication dans les mécanismes perceptifs. De plus, les résultats de mesure obtenus pourront nous aider dans un sixième chapitre à réfléchir à une conception de stimulateurs de texture centrée sur l'usage.

Nos résultats supportent l'implication possible de la vibration dans les mécanismes perceptifs puisqu'un mouvement de glissement tangentiel a *nécessairement* été mis en œuvre par notre panel de sujets. Toutefois, la variabilité des paramètres force et vitesse et la faible amplitude des mouvements, nous amène à faire l'hypothèse, du fait de l'absence de stratégie de constance, de mécanismes transitoires comme il est courant d'en rencontrer en tribologie avec le stick-slip sur lequel nous reviendrons.

L'aspect chaotique des trajectoires ne permet pas de conclure sur une orientation privilégiée résultant de facteurs d'anisotropie dans la perception de la texture d'origine biomécanique, neurophysiologique ou encore cognitive.

Nos résultats sont proches des conclusions de Klatzky et Lederman [KL87] sur un rôle de fenêtre du mouvement volontaire. Pourtant, nous nous interrogeons cependant sur son caractère à la fois systématique et restreint dans son déploiement spatial. Ces deux traits simultanés nous

paraissent incompatibles avec des rôles d'élargissement de la taille du champ perceptif et de recherche de la non-uniformité. En effet, nous avons appris que nous préférons passer plusieurs fois sur une zone déjà explorée plutôt que d'étendre davantage notre geste dans l'espace comme le montre la figure 2.11 page 52. Par ailleurs, ce comportement est aussi en décalage avec une stratégie cohérente d'obtention de réponse phasique des unités tactiles : pourquoi ne pas simplement tapoter sur la surface ou encore n'effectuer que des grands mouvements très larges pour conserver des niveaux constants en intensité ?

Nous nous demandons alors si ce mouvement ne sert pas d'autres objectifs de connaissance. Ainsi la vibration transitoire ou encore la nature du déplacement de l'aire de contact sur la pulpe pourraient très bien contenir de l'information de rugosité. Ce mouvement pourrait aussi jouer d'autres rôles, à dimension sensorielle cette fois : compte tenu de la sensibilité multidirectionnelle des unités tactiles, un geste d'exploration, même aléatoire dans toutes les directions pourrait élargir la largeur de bande passante somesthésique et ainsi faciliter la perception de la texture.

Une étude sur les phénomènes dynamiques en présence au contact peut apporter des réponses. En nous inspirant d'une étude sur la déformation de la peau de Levesque et Hayward [LH03], nous allons à présent, nous intéresser, de façon complémentaire, aux aspects méso et microscopique (tissus et topographie de la peau) du toucher latéral dans le domaine temporel.

Au chapitre 3 qui suit, nous proposons une méthode de caractérisation du frottement entre un doigt et une texture. Ainsi, en comprenant mieux la dimension temporelle des contraintes  $\sigma_{peau}$  (voir section 1.6.1 en page 30) du toucher latéral, même si  $C(t)$  ou  $C(x,y,t)$  ne font pas partie des codes recherchés pour percevoir la rugosité, nous restreindrons certainement notre champs d'investigation.

## Chapitre 3

### Vibroacoustique du frottement et codage temporel

#### Sommaire

---

<b>3.1 Motivations pour une caractérisation vibroacoustique.....</b>	<b>64</b>
3.1.1 Vibration ou « fréquence temporelle » de la texture.....	64
3.1.2 Expérience élémentaire.....	65
3.1.3. Études supportant cette hypothèse.....	66
3.1.4 Motivations pour la mesure microphonique et originalité de notre approche.....	67
<b>3.2 Prérequis avant la mesure : étude du rayonnement acoustique.....</b>	<b>68</b>
3.2.1 Synthèse multipôle .....	69
3.2.2 Prise en compte de la géométrie du doigt : le cas du dipôle.....	69
3.2.3 Synthèse multipôle et champ rayonné en l'absence de texture.....	70
3.2.4 Perturbation du rayonnement lié à la présence de la texture : l'effet dièdre.....	74
3.2.5 Placement de microphone et filtrage.....	77
<b>3.3 Protocole expérimental .....</b>	<b>79</b>
3.3.1 Présentation générale du banc d'essai et de la méthode.....	79
3.3.2 Choix de l'environnement et caractérisation de ses propriétés acoustiques.....	80
3.3.3 Stimuli.....	80
3.3.4 Contrôle de la force normale d'appui du doigt et de la vitesse du moteur.....	81
3.3.5 Description du capteur et du matériel d'acquisition.....	82
<b>3.4 Résultats.....</b>	<b>83</b>
3.4.1 Préférence pour l'analyse des signaux par ondelettes.....	83
3.4.2 Choix de l'ondelette de Meyer.....	84
3.4.3 Scalogrammes en fonction de la vitesse et de l'orientation relative.....	86
3.4.4 Inconsistance du frottement avec le codage à dimension temporelle.....	90
<b>3.5 Discussion ouverte sur les mécanismes d'émergence du bruit au contact.....</b>	<b>90</b>
3.5.1 Frottement et perception de la rugosité.....	91
3.5.2 Résonateurs sous influence de mécanismes d'interaction multiples.....	92
3.5.3 Forces impulsionnelles.....	93
3.5.4 Forces d'excitation périodique.....	94
3.5.5 Forces dépendantes de la vitesse et stick-slip.....	95
3.5.6 Forces d'adhérence et oscillations de décollement (stick-snap).....	96
3.5.7 Forces d'origine aérodynamique.....	98
<b>3.6 Bilan : nécessité d'expériences complémentaires.....</b>	<b>99</b>

---

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés aux aspects cinématiques du toucher latéral avec l'index de la main. Nous n'avons pas trouvé de justification évidente à la nécessité d'un mouvement aussi spécifique par rapport aux autres procédures exploratoires du toucher de surface. En effet, le badigeonnage effectué avec le doigt dans un espace de travail restreint avec des trajectoires et des distributions de force et vitesse aléatoires ne favorise pas particulièrement une dimension parmi celles qui peuvent participer aux mécanismes de codage de la rugosité abordés dans la section 1.6.1 en page 30.

Afin d'examiner les mécanismes dynamiques impliqués dans le déplacement relatif entre un doigt et une texture au contact, nous proposons, dans ce chapitre, d'utiliser un capteur à la fois connu et original : le microphone. Mais avant cela, commençons par rappeler les faits qui nous amènent à vouloir caractériser cette interaction physique de manière plus approfondie.

### 3.1 Motivations pour une caractérisation vibroacoustique

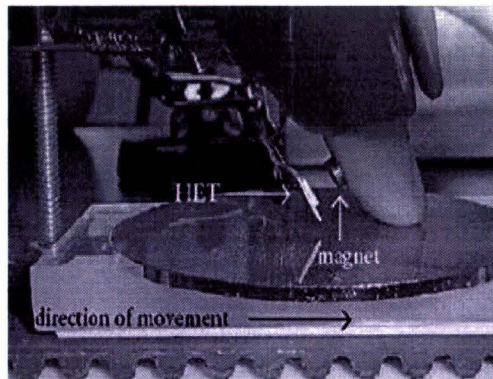
Dans un contexte de recherches particulièrement effervescentes sur notre problème (cf. 1.6.2-1.6.4, pp. 31-34), nous savons à présent que certaines grandeurs temporelles, comme la variation des forces tangentielles ou encore les vibrations créées sur la pulpe par l'excitation périodique de la texture pourraient jouer un rôle dans la perception de la rugosité en apportant une meilleure sensibilité au détail. Pourtant, notre synthèse des travaux de recherche sur les déterminants psychophysiques des jugements de rugosité, permettent de se rendre compte que les mécanismes tribologiques aboutissant à la formation du code  $\sigma_{peau}(x,y,t)$  (cf. 1.6.1, p. 30), sont déjà mal compris. Aussi, nous allons nous intéresser davantage aux processus de formation de ce code au contact.

#### 3.1.1 Vibration ou « fréquence temporelle » de la texture

Revenons aux études [BH03][CS01] ayant fourni des arguments sur la nécessité du mouvement dans les mécanismes perceptifs de la rugosité de texture. Jusqu'à présent, celles-ci ont montré l'existence de corrélations plus ou moins directes entre des estimations de la rugosité et des grandeurs physiques en relation avec des paramètres fréquentiels [CS01][BH03] ou temporels [SCDL02]. Cependant dans toutes ces études, à vitesse de doigt constante, la fréquence des oscillations est toujours reliée aux caractéristiques spatiales de la texture. On le voit dans l'étude de Cascio et Sathian [CS01], où la fréquence d'intérêt, où  $F_t$  est définie comme suit :

$$F_t = \frac{S}{G + R}$$

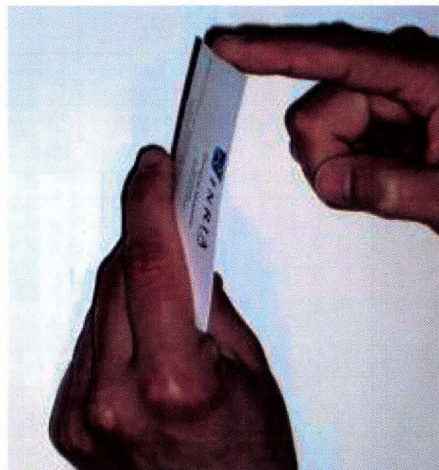
où  $G$  désigne la largeur d'inter espacement entre des crans de largeur  $R$ , appartenant à une texture sur laquelle le doigt défile à une vitesse  $S$ . On le constate également dans les travaux de Bensmaïa et Hollins [BH03] présentés en figure 3.1 et dans l'étude de Smith et ses collègues [SCDL02] où les convertisseurs de signaux limités à 250 Hz ne permettent pas d'acquérir des phénomènes vibratoires à plus haute fréquence.



**Fig. 3.1 – Expérience de Bensmaïa et Hollins [BH03] dans « *The Vibration of Texture* » : utilisation d'un capteur à effet Hall pour mesurer les vibrations en surface sur la peau.**

La réalité du contact entre un doigt et une texture indique clairement une interaction tribologique entre deux surfaces texturées. Ceci est d'autant plus vrai que les détails de la texture, mais aussi du relief de l'empreinte digitale ont des échelles proches. Alors, nous nous demandons s'il ne serait pas plus approprié de parler de « vibration de textures » en considérant deux surfaces en vibration et si des interactions de contact ayant un rôle dans la perception de la rugosité de texture ne seraient pas passées inaperçues pour des raisons métrologiques. Pour mieux comprendre nos interrogations, examinons l'expérience proposée ci-dessous.

### 3.1.2 Expérience élémentaire



**Fig. 3.2 – Expérience permettant de comprendre l'importance de la structure périodique de l'empreinte dans la vibration de contact.**

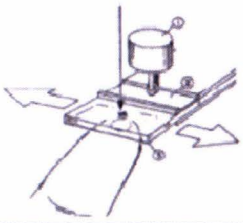

Amusons-nous, comme le suggère la figure 3.2, à tenir fermement une carte de visite et à la frotter contre la pulpe du doigt dans différentes orientations. On peut entendre que le bruit qu'elle émet change mais aussi ressentir qu'elle vibre différemment sur la pulpe. Si maintenant on emboîte le rebord de cette carte dans un creux du relief de l'empreinte digitale et que l'on

effectue un frottement perpendiculaire à la direction où les motifs sont adjacents, on se rend compte qu'un seul cran de texture peut provoquer des oscillations sur la peau.

Ceci suggère que l'empreinte digitale, par l'adjacence de ses motifs, pourrait apporter d'autres phénomènes vibratoires au contact. Nous l'avons vu, ce relief de texture de l'épiderme est capable de faire vibrer la carte de visite qui émet alors un son caractéristique du matériau constitutif et des contraintes que ce dernier subit (saisie incluse). La rugosité de la pulpe ou son relief pourrait très bien faire vibrer la texture et ainsi imposer des contraintes additionnelles sur la peau. Symétriquement, et en accord avec les précédents auteurs, plusieurs crans de texture adjacents ou plusieurs cartes de visite dans notre exemple peuvent exciter la peau. Celle-ci, comme l'ont montré Franke et ses collègues sur la cuisse (figure 1.5, page 19), propage des ondes mécaniques de surface et vibre [FGOW51]. Aussi, dans ce chapitre, nous allons essayer de mettre en œuvre un protocole expérimental défendant l'hypothèse suivante :

*Les excitations mécaniques imposées sur la pulpe du doigt et les oscillations de la peau résultantes peuvent dépendre d'autres caractéristiques physiques de l'interaction que la vitesse du doigt et la topographie de la texture fine à cause des crêtes épidermiques.*

### 3.1.3 Études supportant cette hypothèse

	A	B
<b>AUTEURS</b>	Srinivasan, LaMotte, Whitehouse [LW86][SLW00]	Levesque, Hayward [LH03]
<b>TECHNIQUES</b>	Caméra montée sur un microscope enregistrant le motif de déformation. Une vitre en défilement peut comporter un point	Enregistrement du motif de déformation à travers un prisme illuminé. Une face lisse comporte un point ou un trou
<b>ILLUSTRATIONS</b>		
<b>APPORTS</b>	Déclenchement d'une réponse dans les fibres RA et PC lors d'impacts entre reliefs de la peau et défaut de surface	Déformation tangentielle en l'absence de forme. Motifs de compression et d'expansion en présence de singularités. Stick-slip de crêtes épidermiques ou bruit de mesure

Tab. 3.1 – Apports des études basées sur de la mesure optique.

Dans un ouvrage de référence sur les origines et l'évolution des primates, Martin [Mar90] suggère que les crêtes épidermiques jouent un double rôle : leur structure anatomique favoriserait la perception tactile tandis qu'elles contribueraient à l'adhérence de saisie. Chez l'homme, des études révèlent aussi une importance possible de la texture de la pulpe dans les mécanismes tribologiques du toucher latéral. Nous les avons détaillées dans le tableau 3.1. Les crêtes épidermiques participeraient non seulement à des mécanismes d'impact (A) favorisant la perception de détails isolés de petite dimension (point de diamètre égal à 550  $\mu\text{m}$  et de hauteur comprise entre 1 et 3  $\mu\text{m}$ ), mais aussi à un étirement de la peau et d'éventuels mécanismes de stick-slip (B) avec des trous et des bosses (formes gaussiennes de 0.5 mm).

Les études à dimension spatiale font de la topographie de l'épiderme un acteur biomécanique central dans la relation d'interaction avec des détails fins de surface. Dans les études sur la perception de la texture, sa participation aux phénomènes de contrainte/déformation au contact n'est pas abordée. Nous proposons donc d'analyser les vibrations au contact et de rechercher si l'empreinte digitale en est en partie responsable. Mais avant, cela, il nous faut trouver un moyen de mesure approprié.

#### 3.1.4 Motivations pour la mesure microphonique et originalité de notre approche

Les instruments de mesure des forces au contact ou encore, des déplacements de la peau et de ses grandeurs dérivées (section 1.5.1 en page 19, voir aussi [MPC05a]), ont été largement utilisés pour valider des modèles mathématiques et/ou mieux comprendre le comportement biomécanique in vivo de la pulpe du doigt. Idéalement, il serait avantageux de bénéficier d'un capteur non invasif permettant d'obtenir une cartographie dynamique des contraintes/déformations sur la pulpe en mouvement tout en ayant la possibilité de pouvoir obtenir cette information sur tout type de surface. Les méthodes par ultrasons [WRS03][RSGS03] et MRI [MS04] sont efficaces pour caractériser la structure des tissus humains, mais tant leur résolution, que leur mise en oeuvre sont mal adaptées aux dimensions des phénomènes physiques du frottement sur la peau. Les méthodes de mesure optiques distantes présentent l'avantage de ne pas ajouter de masse additionnelle sur la structure en vibration. Par contre, elles nécessitent des surfaces apparentes. Ainsi, pour une caractérisation vibroacoustique, l'étendue de mesure d'un vibrométrie LASER Doppler semble bien adaptée à notre problème et complémentaire à la vidéomicroscopie qui est limitée par des fréquences d'acquisition de caméra souvent inférieures à 200 Hz. L'utilisation d'accéléromètres ou de tout autre capteur (capteur à effet Hall [BH03]) à fixer directement sur l'arrière de la pulpe ou sur l'ongle [MA04] est envisageable. Toutefois, la peau jouera inévitablement un rôle de filtre mécanique dont il faudra évaluer la fonction de transfert si on veut savoir ce qui se passe au contact.

Il existe de nombreux travaux dans les domaines de la mesure [RP00], la perception [KPK00] et la synthèse des sons de contact [FC91][DP98][ASR05]. Ces sons sont fascinants par leur richesse d'information. On peut le voir avec la description en primitives de Gaver [GA88]. Ils renseignent sur le matériau (dureté, frottement interne, amortissement, structure interne),



l'interaction (type, force) et la configuration (cavités résonantes, taille, forme). Ils nous ont intéressés car ils résultent de la tribologie (du grec *tribein* qui veut dire frotter) ou encore de phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux ou plusieurs corps en contact sont animés de mouvements relatifs. Les corps étant bien souvent déformables, les sons portent aussi une signature rhéologique (l'élasticité, la viscosité) et des indices de forme (forme globale, rugosité) selon l'échelle à laquelle se produit l'interaction de contact. Parallèlement, ils apportent aussi une information aérodynamique sur l'environnement de propagation (milieu, réflexions) et sa participation à l'interaction (cavités résonantes, ...).

Le microphone peut être employé comme outil de mesure de signatures utilisables pour la caractérisation et la classification bioacoustique. Il a permis à Brian Amento et ses collègues [AHT02] de détecter les mouvements des doigts. Ce capteur peut aussi aider à calculer des indices de « douceur de la peau ou des cheveux » afin de quantifier l'impact d'un produit cosmétique. Plus précisément, une collaboration entre un laboratoire français de tribologie, le LTDS (Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes), et l'institut Pierre Fabre (recherche dermocosmétique) a abouti à deux propositions d'instruments triboacoustiques [ZVHM04][ZVLM04]. Pour le premier, le microphone est inséré dans une texture tandis que pour le second, il est placé dans un corps creux préhensile, destiné à être en contact avec la surface.

Dans cette thèse, nous allons élaborer un protocole de mesure dans un but d'identification. Nous voulons obtenir une mesure image des phénomènes de déformation sur les structures pour mettre en évidence les phénomènes physiques sous-jacents de la tribologie du toucher. Pour ce faire, nous allons rechercher en premier lieu quel est l'endroit optimal pour placer notre capteur et quelle est la pondération à appliquer à nos signaux pour pouvoir négliger l'influence de l'environnement. Ainsi, nous pourrons accéder à une mesure image des phénomènes sur la peau.

### **3.2 Prérequis avant la mesure : étude du rayonnement acoustique**

Quand la pulpe du doigt caresse un profil de texture, les interactions mécaniques entre aspérités génèrent des vibrations mécaniques dans les structures au contact qui se dissipent sous forme de chaleur. En surface, les oscillations peuvent perturber les molécules d'air avoisinantes et être responsable d'une propagation d'ondes longitudinales dans l'environnement : le son. Mais entre le moment où les molécules d'air possèdent un mouvement en relation avec celui de la peau ou de la texture et le moment où elles perturbent la membrane du microphone, l'environnement joue un rôle important dans les mécanismes de propagation. Dans cette section, nous allons montrer comment les propriétés physiques et la géométrie de la pulpe du doigt peuvent conditionner le rayonnement. Ceci nous permettra au final, de pouvoir justifier le placement de notre microphone et la pondération applicable aux signaux pour analyser les signaux sans les biais d'interférences dont nous allons immédiatement expliquer les mécanismes.

### 3.2.1 Synthèse multipôle

Une source de dimensions finies et de forme quelconque peut être considérée comme ponctuelle dès lors que sa plus grande dimension est très petite devant la longueur d'onde émise. Pourtant, si les modèles de rayonnement de type sphère pulsante [Jou99] ou monopôle émettant dans toutes les directions de l'espace possèdent une description simple, leur application n'est pas adaptée pour modéliser le rayonnement réel en champ proche. Il faut davantage prendre en compte la géométrie de la source et envisager un réseau de sources élémentaires positionné de manière stratégique dans l'espace. Dans le cas du doigt, cela revient à disposer plusieurs monopôles à proximité de l'aire de contact où se trouvent, a priori, les sources de bruit. La géométrie de la pulpe nous conduit à un travail en géométrie sphérique. Nous en tirerons parti pour exprimer simplement les conditions aux limites et considérer qu'un élément de surface  $\delta S$  de la peau se comporte comme un monopôle. Cette approche, beaucoup plus réaliste, nous permet aussi d'intégrer la perturbation des interférences sur la mesure.

### 3.2.2 Prise en compte de la géométrie du doigt : le cas du dipôle

Dans un premier temps, on considère le doigt comme une sphère, couverte de monopôles ou sphères pulsantes de petites dimensions vibrant à la même fréquence et en phase. Si un monopôle est omnidirectionnel, l'association de plusieurs monopôles induit un champ rayonné interférentiel qui possède des propriétés directives. Ainsi, dans la zone de Fresnel où la distance entre les sources peut être significative devant les longueurs d'onde, la géométrie sphérique régule le flux aérodynamique. Pour un monopôle, la pression s'exprime :

$$p(r,t) = jk\rho c \frac{A}{r} \exp^{-j(kr+\omega t)}$$

avec  $k = \omega/c = 2\pi f/c$ , le nombre d'onde associé au milieu fluide,  $c$  la célérité du son dans l'air et  $\rho$ , la densité du milieu de propagation. Comme le montre la figure 3.3, si la pression en M résultant de la présence signalée en rouge de deux monopôles s'apparente à une simple somme, il existe en M' une différence de chemin entre les monopôles égale à  $2\Delta r$ .

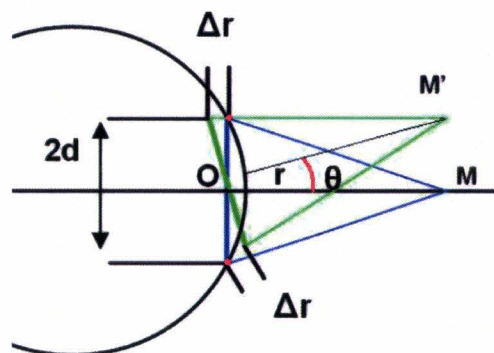


Fig. 3.3 – Mécanismes de création des interférences en géométrie sphérique.

L'expression qui suit montre que la répartition spatiale du champ de pression de la fréquence vibratoire des sources avec  $k$ , de leur localisation géométrique avec  $d$ , mais aussi de l'angle de mesure polaire ou azimutal sur une sphère que l'on appellera  $\theta$ . On peut voir que le champ de pression est sujet à des phénomènes d'interférences constructives ou destructives, et ceci d'autant plus que le produit  $kd$  augmente, puisque cela favorise l'annulation de la fonction cosinus.

$$p(r, \theta) = \frac{A}{r + \Delta r} \exp^{-jk(r+\Delta r)} + \frac{A}{r - \Delta r} \exp^{-jk(r-\Delta r)} = \frac{2A}{r} \cos(kd \sin \theta) \exp^{-jkr}$$

Cet exemple permet de comprendre les mécanismes d'apparition d'interférences dans le champ rayonné en fonction de la géométrie et du comportement des sources en pulsation. Ainsi, comme les basses fréquences possèdent des longueurs d'onde prononcées, le champ rayonné n'est pas sensible aux différences de phase résultant de la géométrie de la source. Aussi, ces sons sont dits « enveloppants ». Par contre, lorsque les sources émettent des ondes de longueur courte, les différences de position entre les sources génèrent des différences de phase importantes à courte distance qui génèrent des interférences de manière directive. Cette directivité peut affecter l'estimation de la réponse en fréquence de notre système. C'est la raison pour laquelle nous allons l'étudier grâce à un modèle plus élaboré.

### 3.2.3 Synthèse multipôle et champ rayonné en l'absence de texture

Des modèles d'interaction différents peuvent être nécessaires pour représenter fidèlement la contribution de chacun des phénomènes physiques à la définition des sources de bruit ou de la répartition des vitesses particulières sur la sphère. En ce qui concerne le modèle de rayonnement, il est généralisable aux différents types de sources car elles sont localisées au même endroit, sur une géométrie commune, et elles émettent dans un même environnement.

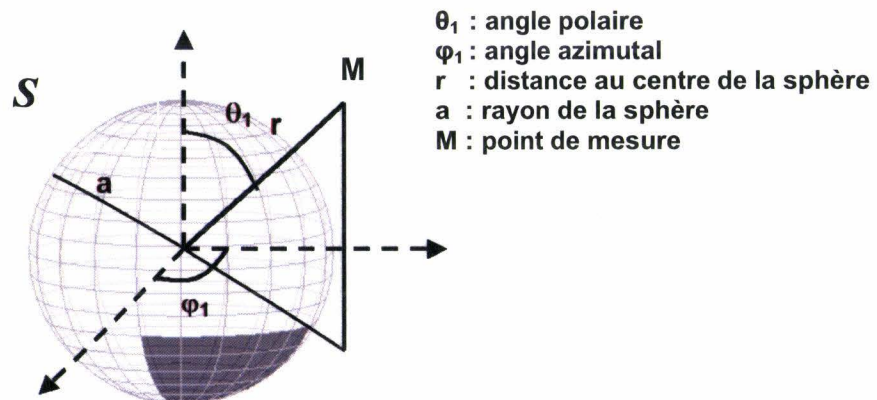


Fig. 3.4 – Géométrie du problème en l'absence de texture.

Dans notre approche, nous proposons d'abord de négliger les premières réflexions sur la texture. Le réseau de sources sonores équivalent à une portion de la pulpe du doigt (partie grise sur la figure 3.4 page 70) mise en vibration est modélisé géométriquement comme une portion de sphère en vibration. L'amplitude vibratoire est définie comme étant non nulle à proximité immédiate de l'aire de contact, pour être représentative de la localisation des sources sonores lors du frottement.

Lorsque l'on cherche des solutions harmoniques à l'équation de propagation des ondes, la partie  $P(\vec{r})$  dépendant des coordonnées spatiales de la solution  $P(\vec{r})E(t)$  doit, pour une sphère, satisfaire l'équation de Helmholtz en coordonnées sphériques qui s'écrit :

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 P}{\partial \varphi^2} + k^2 P = 0$$

Comme nous le présentons en annexe B, la solution de cette équation est composée d'un produit de fonctions de Hankel, solutions dans la direction radiale, de polynômes de Legendre, solutions dans la direction polaire, et d'un terme exponentiel solution de la composante azimutale. Elle nous permet alors d'écrire la pression acoustique  $p(r, \theta_1, \varphi_1)$  au point M de coordonnées  $(r, \theta_1, \varphi_1)$ , comme une somme d'harmoniques sphériques divergentes encore appelées fonctions propres sphériques :

$$p_1(r, \theta_1, \varphi_1) = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m A_{mn}^{ref} h_m^2(kr) P_{mn}(\cos \theta_1) e^{jn\varphi_1}$$

où  $h_m^2()$  désigne la fonction sphérique de Hankel de deuxième espèce d'ordre m,  $P_{m|n}()$  la fonction de Legendre d'ordre (m,n).

En régime harmonique de pulsation  $\omega = 2\pi f$  la dépendance temporelle est la suivante :

$$p(M, t) = p(r, \theta_1, \varphi_1) e^{-j\omega t}$$

On considère à présent une sphère avec une distribution de multipôles sur ses éléments de surface  $\delta S$ . Nous imposons une vitesse particulière  $V_p$  égale à  $V_0$  sur une portion de sphère proche de la zone de contact de telle sorte que :

$$V_p(\theta_1, \varphi_1) = \begin{cases} |V_0| & \text{pour } \begin{cases} \theta_1 \in [\theta_0 - \delta\theta_0, \theta_0 + \delta\theta_0] \\ \varphi_1 \in [\varphi_0 - \delta\varphi_0, \varphi_0 + \delta\varphi_0] \end{cases} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour obtenir l'expression de la vitesse particulière sur la sphère, on calcule la dérivée partielle de la pression dans la direction radiale pour un rayon a de 7 mm :

$$V_p(\theta_1, \varphi_1) = -\frac{1}{j\omega\rho} \left. \frac{\partial p_1}{\partial r} \right|_{r=a}$$

$$= -\frac{1}{j\omega\rho} \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^{+m} A_{mn}^{ref} kh_m^2(ka) P_{m|n|}(\cos\theta_1) e^{jn\varphi} = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^{+m} V_{mn}^{ref} h_m^2(kr) P_{m|n|}(\cos\theta_1) e^{jn\varphi}$$

Comme pour les coefficients de Fourier qui peuvent être exprimés sur les fonctions de base sinus et cosinus, les coefficients  $V_{mn}$  sont exprimés sur les fonctions harmoniques sphériques :

$$V_{mn}^{ref} = V_0 \frac{(2m+1)(m-|n|)!}{4\pi(m+|n|)!} e^{jn\varphi_0} \frac{\sin(n\delta\varphi_0)}{n/2} \int_{\theta_0-\delta\theta_0}^{\theta_0+\delta\theta_0} P_{m|n|} \cos\theta \sin\theta d\theta$$

et notés  $V_{mn}^{ref}$  ou coefficients de référence, car ils sont calculés en l'absence de texture.

Ce calcul nous permet d'évaluer les coefficients  $A_{mn}^{ref}$  de notre première série comme suit :

$$A_{mn}^{ref} = \frac{j\rho c V_{mn}^{ref}}{h_m^2(ka)}$$

À présent, la valeur de la pression acoustique  $p(r, \theta_1, \varphi_1)$  en l'absence de texture est déterminable en chaque point de l'espace.

Pour effectuer le calcul, prenons une vitesse du son dans l'air  $c$  de  $340 \text{ m.s}^{-1}$ . Nous choisissons une densité d'air  $\rho$  égale à 1. Le doigt est considéré comme une sphère de rayon 7 mm tandis que nous évaluons le champ acoustique en champ libre à une distance très proche comprise entre 10 à 40 mm de son centre pour conserver des intensités sonores élevées. Ceci s'effectue dans le plan où  $\theta_1 = \pi/2$  car il est difficile de choisir un angle plus élevé pour des raisons d'encombrement de microphone. De plus, plus l'angle est petit, plus nous nous éloignons des sources. Pour déterminer  $V_0$ , amplitude de la vitesse particulière, nous avons pris une vitesse de compression correspondant à une vitesse de glissement du doigt égale à  $0.1 \text{ m.s}^{-1}$ . Compte tenu de la faible distance du point de mesure, les pertes dans l'air par frottement et échanges thermiques non réversibles peuvent être négligés (pour un taux d'humidité de 50 % à 20°, nous aurions une atténuation maximale de 0,02 dB à 12500 Hz).

Sur la figure 3.5 de la page suivante, nous représentons le niveau de pression  $L_p$  exprimé en dB du champ de pression efficace rayonné par rapport au seuil d'audibilité pour une « oreille moyenne » avec :

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p_{eff}}{p_{ref}} \right) \quad \text{avec } p_{eff} = p_{max} / \sqrt{2} \quad \text{et } p_{ref} = 2.10^{-5} \text{ Pa}$$

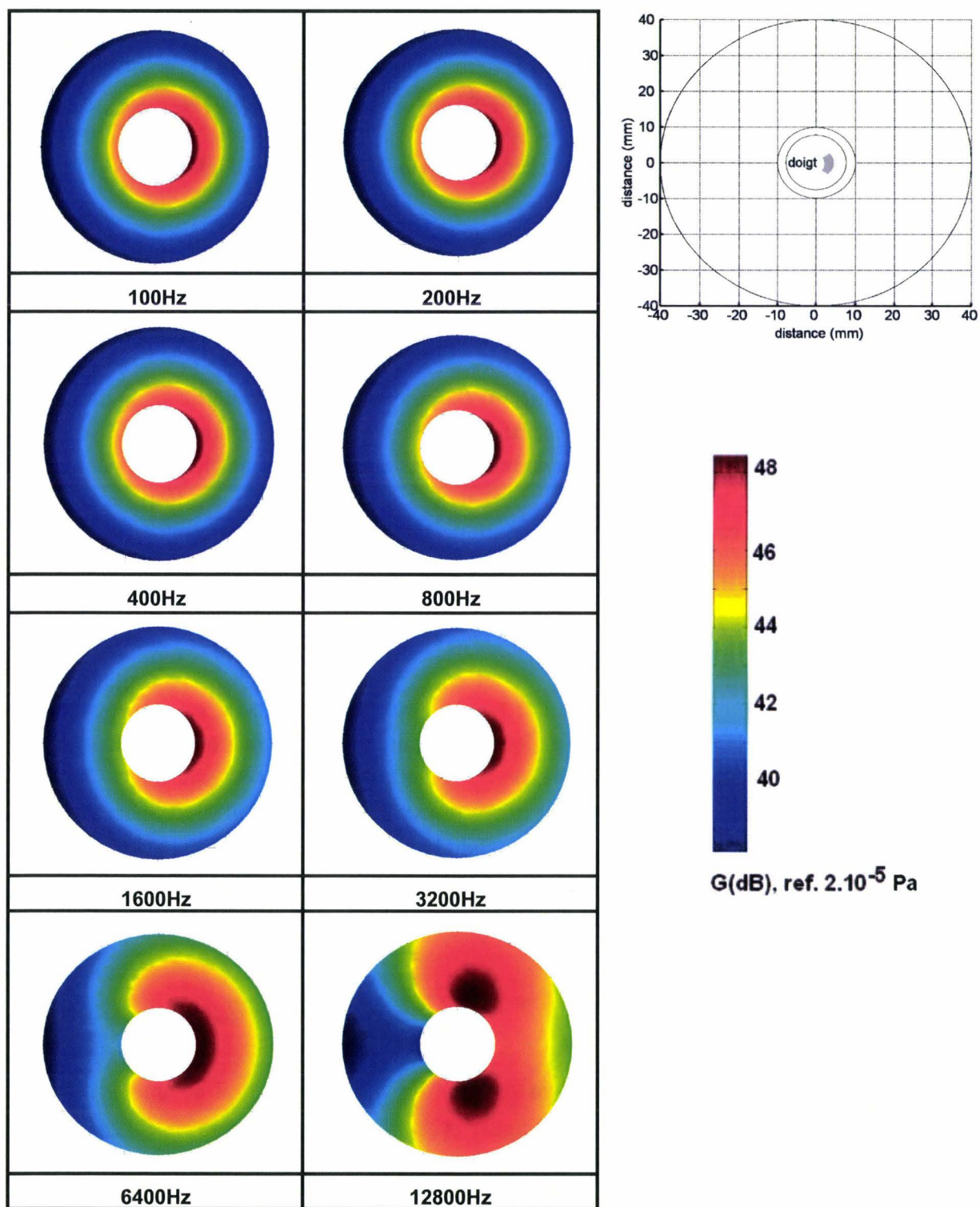


Fig. 3.5 – Effet de « baffle » de la sphère en champ libre (absence de la texture) pour r variant de 10 à 30 mm,  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ,  $\varphi = [0..2\pi]$ .

En accord avec les dimensions de la sphère, la zone de Fresnel reste très localisée autour du doigt. Pour les grandes longueurs d'onde; la sphère n'a pas l'effet de « baffle » sur le champ rayonné. La directivité devient d'autant plus marquée que la fréquence augmente.

### 3.2.4 Perturbation du rayonnement lié à la présence de la texture : l'effet dièdre

À présent nous allons nous intéresser à la directivité d'émission dans la configuration sphérique ainsi qu'à l'amplification due à l'effet dièdre ou « effet trompette ». Utilisé par Emil Berliner pour permettre à l'oreille humaine d'entendre les oscillations mécaniques de l'aiguille du gramophone, cet effet physique est courant. Dès que des sources sonores sont localisées au sein d'une géométrie en forme de trompette, il se produit une augmentation de pression résultant d'interférences acoustiques. Ici, l'effet de baffle n'est pas créé par la géométrie seule du doigt, mais par la présence de la texture qui, par les réflexions qu'elle génère nous conduit à un système équivalent à une trompette. À présent, le rayonnement des sources, déjà bafflé par la géométrie du doigt va être en plus bafflé par la texture. Dans le cas du pneumatique, décrit également comme une sphéroïde au contact d'une surface parfaitement réfléchissante [Kle98][Kle00], Klein montre que cet effet est important car il tend à amplifier les sons résultant des vibrations de stick-slip et d'air pumping. Ces sources vibrent en effet à des fréquences avoisinant 1 kHz et sont situées au centre de la géométrie, ce qui peut générer une amplification allant jusqu'à 23 dB à ces fréquences.

*Modèle semi-analytique à deux sphères* : si les dimensions de l'obstacle sont suffisamment grandes devant la dimension des sources, les lois d'acoustique géométrique ou d'approximation optique s'appliquent en utilisant les relations de Snell-Descartes. Aussi, on exprime la pression acoustique résultante  $p_t(r_1, \theta_1, \varphi)$  comme la somme des pressions acoustiques de deux sphères symétriques (figure 3.6 page 75) par rapport au plan de la texture en champ libre. La première représente le doigt tandis que la seconde est son symétrique imaginaire par rapport au plan de la surface texture. Aussi, la pression totale ou pression en présence de la texture mesurée en M s'écrit :

$$p_t(r_1, \theta_1, \varphi) = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m A_{mn}^t h_m^2(kr_1) P_{mn}(\cos \theta_1) e^{jn\varphi} + \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m B_{mn}^t h_m^2(kr_2(r_1, \theta_1)) P_{mn}(\cos \theta_2(r_1, \theta_1)) e^{jn\varphi}$$

Dans cette équation,  $r_2$  peut s'exprimer en fonction de  $r_1$  et de  $\theta_1$ , tout comme  $\theta_2$  est une fonction de  $r_1, r_2, \theta_1$ . Il n'est plus utile de distinguer  $\varphi_1, \varphi_2$ , l'angle polaire sera appelé  $\varphi$

$$r_2 = \sqrt{r_1^2 + b^2 - 4r_1 a \cos \theta_1}$$

$$\theta_2 = a \sin\left(\frac{r_1}{r_2} \sin \theta_1\right)$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 = \varphi$$

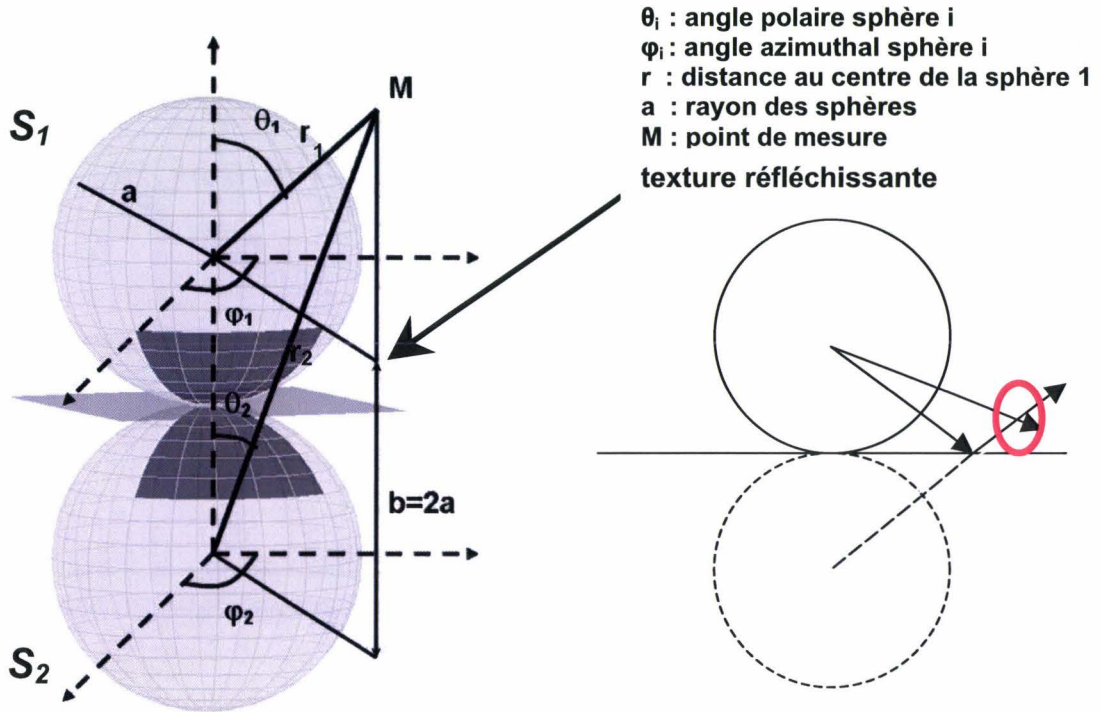


Fig. 3.6 – Géométrie du problème en présence de la texture et phénomènes d'interférence causés par son bafflage (cercle rouge).

*Conditions aux limites* : la texture peut être considérée comme plus ou moins réfléchissante en fonction de sa géométrie de surface et des dimensions des longueurs d'onde. De fait, nous introduisons un coefficient de réflexion  $0 \leq |R| \leq 1$ . L'obstruction de l'aire de contact nous amène à considérer la nullité de la vitesse particulière dans la direction radiale pour cette zone. Ceci nous conduit à l'égalité :

$$B'_{mn} = RA'_{mn} \quad \forall m, n \in [0, N] \text{ avec } |n| \leq m$$

*Calcul des coefficients harmoniques* : commençons d'abord par exprimer les dérivées partielles des grandeurs  $r'$  et  $\theta_2$  par rapport à  $r$  et  $\varphi_1$ . Il vient la matrice jacobienne :

$$J(r, \theta_1) = \begin{pmatrix} \frac{\partial r_2}{\partial r_1} & \frac{\partial \theta_2}{\partial r_1} \\ \frac{\partial r_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r_1 - 2a \cos \theta_1}{r_2} & \frac{2a \sin \theta_1}{r_2^2} \\ 2a \sin \theta_2 & \frac{2a \cos \theta_2 - 1}{r_2} \end{pmatrix}$$

qui nous permet de dériver l'expression de la pression radiale. Ensuite, de la même manière que pour l'étude de la sphère seule, on écrit l'égalité entre la vitesse imposée et la vitesse particulière de l'air sur la surface de la sphère :



$$V_p(\theta, \varphi) =$$

$$-\frac{1}{j\omega\rho} \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^{+m} A_{mn}^t e^{jn\varphi} \cdot \left\{ kh_m^2(ka)P_{m|n|}(\cos\theta_1) + R \left[ k \frac{a-b\cos\theta_1}{r_2(a, \theta_1)} h_m^2(ka)P_{m|n|}(\cos\theta_2(a, \theta_1)) - \right. \right. \\ \left. \left. b \frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2(a, \theta_1)}{r_2(a, \theta_1)^2} h_m^2(ka)P_{m|n|}'(\cos\theta_2(a, \theta_1)) \right] \right\} \\ = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m V_{mn}^t h_m^2 P_{mn}(\cos\theta_1)$$

Cette équation peut se mettre sous la forme :

$$\sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m A_{mn}^t [\alpha_m P_{mn}(\cos\theta_1) + \beta_{mn}(a, \theta_1)] = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m V_{mn}^t h_m^2 P_{mn}(\cos\theta_1)$$

qui peut encore être transformé comme suit :

$$\alpha_m A_{mn}^t + \sum_{k=0}^{+\infty} \sum_{l=-k}^k A_{kl}^t d_{mnkl} = V_{mn}^t$$

avec :

$$d_{mnkl} = \begin{cases} \frac{2m+1 \cdot (m-|n|)!}{2 \cdot (m+|n|)!} \int_0^\pi \beta_{kl}(a, \theta_1) P_{m|n|}(\cos\theta) \sin\theta d\theta & \text{si } l = n \\ 0 & \text{pour } l \neq n \end{cases}$$

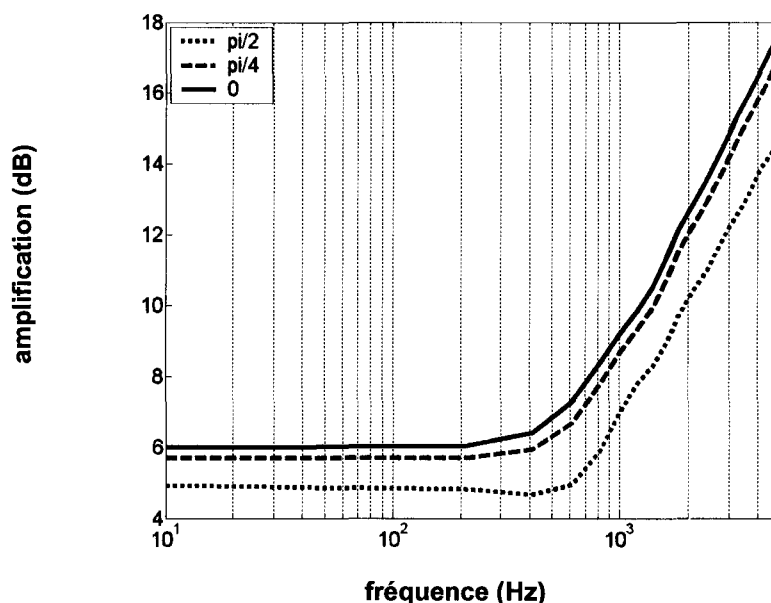
Pour réaliser le calcul nous tronquons la somme infinie à M et devons alors résoudre (M+1)<sup>2</sup> équations pour trouver la valeur d'autant d'inconnues. Un conditionnement de la matrice par colonnes est alors nécessaire avant d'effectuer son inversion pour retrouver les coefficients harmoniques  $A_{mn}$ . Lorsque les ordres augmentent les fonctions de Hankel croissent très rapidement, donc nous diviserons toutes les colonnes d'ordre m par la quantité  $h_m^2(ka)$ .

*Calcul de l'amplification* : L'effet dièdre résultant des interférences peut dès lors être calculé en prenant la pression calculée pour la sphère seule comme pression de référence.

$$P_{ref}(r_1, \theta_1, \varphi) = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m A_{mn}^{ref} h_m^2(kr_1) P_{mn}(\cos\theta_1) e^{jn\varphi}$$

À cause des limitations de notre calculateur, nous prenons M=64 ce qui permet déjà de reconstruire fidèlement l'expression de la pression jusqu'à 5 kHz puisqu'à M=40, nous ne constatons plus de modification substantielle sur les champs dans les fréquences d'intérêt. Nous prenons un coefficient de réflexion égal à l'unité compte-tenu de la faible absorbance des matériaux rigides et non poreux qui vont être utilisés. Pour des positions azimutales de

microphone variant entre 0 et  $\pi/2$ , des sources de bruit réparties sur la portion de sphère centrée à  $10^\circ$  du point de contact et étendue de  $15^\circ$  en  $\theta$  et  $\varphi$ , nous obtenons les courbes d'amplification dépendantes des fréquences présentées sur la figure 3.7. Nous avons restreint l'étendue de l'étude autant dans le domaine spatial (trois positions) que fréquentiel (entre 10 Hz et 5 kHz), car même en transformant tous nos programme en code source C avec le compilateur Matlab<sup>®</sup>, le calcul de l'amplification *en un point et pour une fréquence donnée* à M=64 dure environ 5h30mn (Athlon 3400+ 1024 Mo de RAM CAS 2.5).



**Fig. 3.7 – Amplification résultant de l'effet pavillon calculée pour trois positions azimutales du microphone à angle polaire constant ( $\varphi = [0, \pi/4, \pi/2], \theta_1 = \pi/2$ ).**

En présence de la texture, à basses fréquences, les sources sont bafflées par le plan infini. Il en résulte une pression acoustique égale au double de la pression de référence. À hautes fréquences, le piston est bafflé par la sphère et possède une directivité très marquée. La valeur de l'amplification dépend aussi de l'angle, mais de manière moins prononcée. Pour un rayon de pneumatique de 300 mm, Klein [Kle98][Kle00] trouve que l'effet dièdre est maximal pour des longueurs d'onde de 340 mm (1000 Hz) avec une dépendance angulaire marquée au-delà de ces fréquences. Pour un rayon de 7 mm, nous devrions trouver une amplification maximale pour des fréquences avoisinant les 50 kHz.

### 3.2.5 Placement de microphone et filtrage

Grâce à ce modèle semi-analytique, la pulpe a été modélisée comme un objet sonore avec un comportement vibratoire modal en relation avec sa géométrie mais aussi avec l'excitation qu'elle subit. Au regard du phénomène physique, nous avons pu nous faire une première idée du champ acoustique rayonné en réponse à une excitation harmonique sur la structure localisée près de la

zone de contact. Ce travail nous a aussi permis de nous rendre compte, par le calcul, de l'importance de la géométrie de notre système sur le champ rayonné par l'apparition d'une directivité marquée et d'un effet d'amplification à hautes fréquences. Dans le cas des études sur les pneumatiques, les techniques expérimentales d'holographie acoustique avec des antennes de microphones permettent de vérifier ces calculs grâce à une cartographie spatiale du champ et montrent un très bon accord avec les modèles [HKA00]. Dans notre cas, notre objet est trop petit pour obtenir cette information. Par un simple constat d'ordres de grandeur, (cf. section 3.2.3 page 70) on peut cependant s'assurer que les effets d'interférence ne seront pas significatifs en dessous de 1 kHz et que le système aura un rayonnement omnidirectionnel à basses fréquences. Par contre dans l'éventualité de sources pulsant à plus hautes fréquences, cette vérification serait importante. Nous sommes confiants sur la valeur des fréquences auxquelles interviendrait un effet d'amplification. Par contre l'orientation de notre source de bruit nous paraît beaucoup moins certaine puisque nous ne connaissons pas encore vraiment les phénomènes impliqués dans leur manifestation. Afin d'éviter les problèmes liés à une éventuelle erreur de définition de la position des sources, nous allons choisir une orientation azimutale égale à  $\pi/2$  pour le placement du microphone. Ainsi, nous aurons une distance équivalente entre les sources de bruit en entrée et/ou en sortie de la zone de contact pour un frottement appliqué dans une orientation azimutale de  $0^\circ$ .

Afin d'atténuer l'effet dièdre qui commence à se manifester pour des fréquences assez basses, on utilisera si nécessaire un simple filtre passe-bas linéaire de Butterworth d'ordre 1. Celui-ci a une fréquence de coupure  $f_c(-3 \text{ dB}) = 1500 \text{ Hz}$  et une pente de 20dB par décade. Toutefois, pour prévoir les conséquences d'une éventuelle erreur découlant d'une hypothèse fautive sur le positionnement des sources, nous l'appliquerons sur nos signaux seulement si nous trouvons un contenu vibratoire significatif à hautes fréquences.

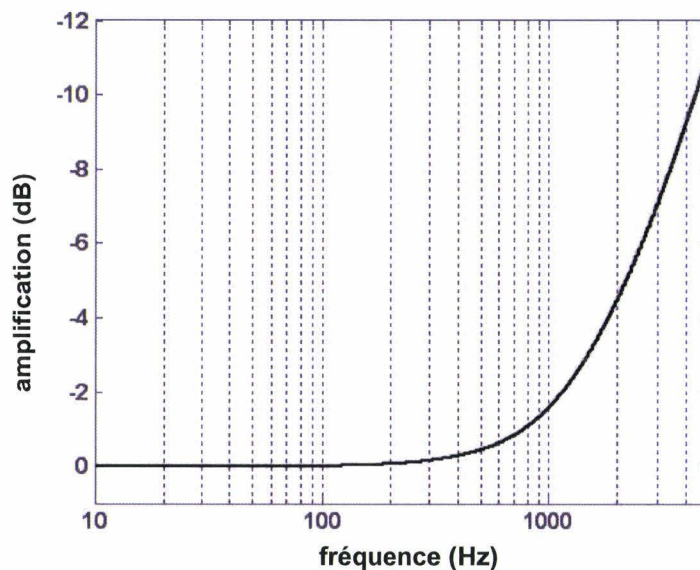


Fig. 3.8 – Proposition de correcteur pour le filtrage passe-bas

### 3.3 Protocole expérimental

Cette étude nous a permis de vérifier l'influence des premières réflexions du son et interférences associées sur la mesure. Les perturbations liées au protocole expérimental seront abordées lors de sa mise en place. Nous allons à présent expliquer notre méthode pour obtenir une mesure contenant l'image des contraintes exercées sur les deux corps au contact. Ceci nous permettra d'analyser l'interaction de frottement.

#### 3.3.1 Présentation générale du banc d'essai et de la méthode

Dans cette première expérience, nous voulons enregistrer les sons du frottement entre la pulpe du doigt et une texture crantée, déplacée contre la pulpe du doigt aux vitesses d'usage du toucher latéral. Comme le montre la figure 3.9, nous allons effectuer nos enregistrements en chambre sourde. Le doigt va être introduit dans une encoche, puis immobilisé par une vis de pression sur l'articulation interphalangienne, de telle sorte qu'il soit incliné de  $30^\circ$  par rapport au plan moyen de l'aire de contact. Ainsi, nous garantissons une adjacence entre les crêtes de la peau et les rainures des dents de la poulie. Grâce au réglage en hauteur d'un support élévateur Boy, nous allons imposer une force normale statique d'environ 1,5 N sur une roue crantée. Nous actionnons un moteur à ultrasons permettant d'étirer la peau vers l'avant ou l'arrière à vitesse contrôlée. Le microphone est placé latéralement comme nous l'avons suggéré en section 3.2.5 page 78.

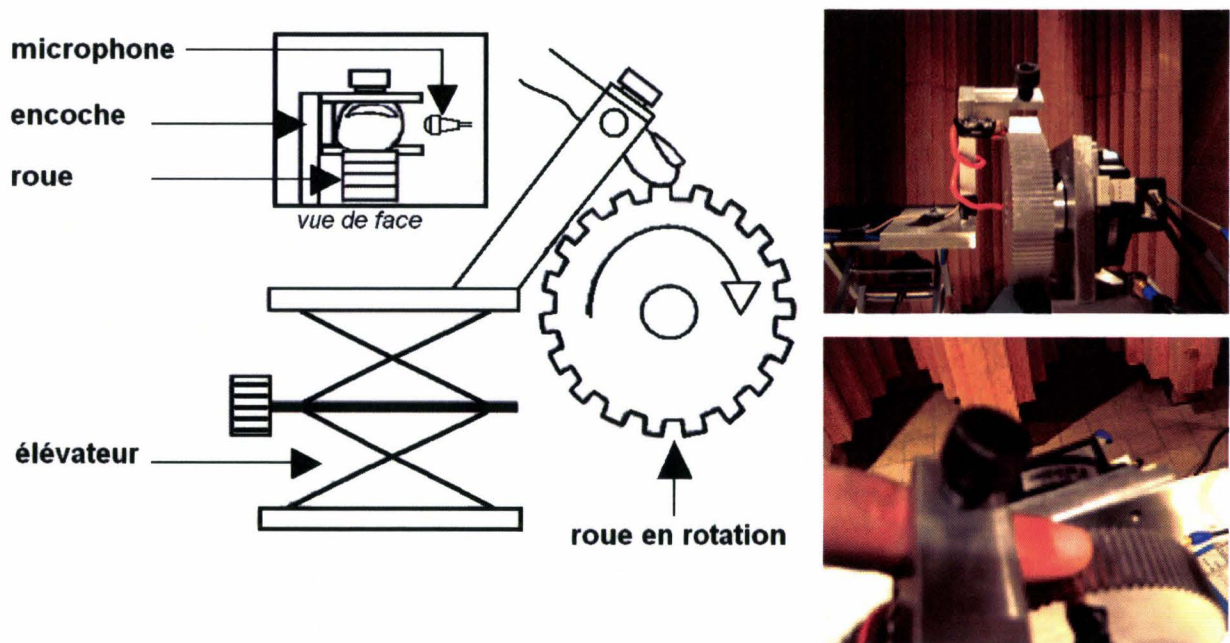
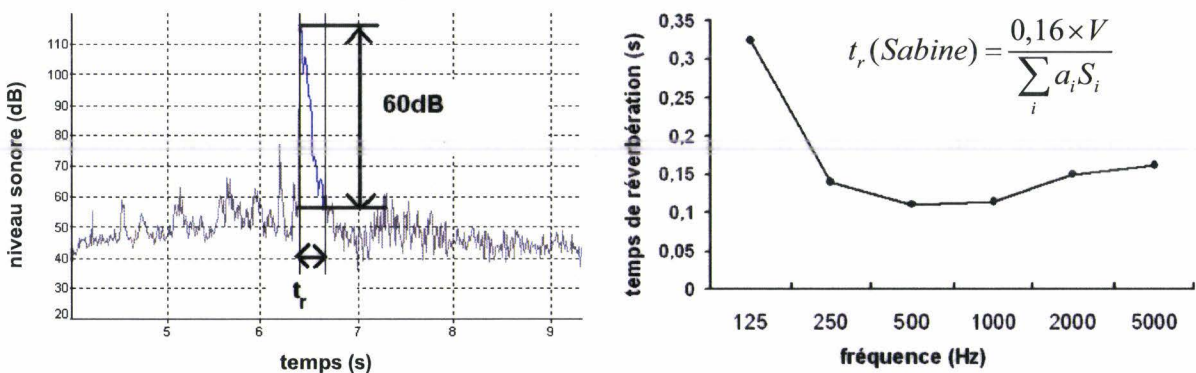


Fig. 3.9 – Dispositif expérimental pour la mesure microphonique

### 3.3.2 Choix de l'environnement et caractérisation de ses propriétés acoustiques

Dans la maîtrise de la qualité environnementale pour la mesure microphonique, la prise en compte de l'intensité des premières réflexions est le critère le plus déterminant. Nous avons déjà évalué leur contribution en modélisant les phénomènes d'interférence du au baffle de la texture. Toutefois, tant pour limiter l'écho, que pour nous isoler du bruit ambiant, l'expérience est effectuée en chambre semi-anéchoïque (chambre sourde de  $6,61 \times 3,38 \times 2,89 \text{ m}^3$  dont une paroi n'est pas absorbante). Son sol est en carrelage ( $0.010 < \text{facteur d'absorption } a_c < 0.040$ ). Ses murs et plafond sont équipés de dièdres absorbants en laine minérale ( $0.300 < \text{facteur d'absorption } a_m < 0.600$ ).



**Fig. 3.10 – Temps de réverbération de la chambre sourde mesuré ( $t_r=250\text{ms}$ ) grâce à une impulsion sonore et calculé par la formule de Sabine ( $100\text{ms} < t_r < 325\text{ms}$ )**

En pratique, on évalue le temps de réverbération en mesurant le temps nécessaire à une diminution du niveau sonore de 60 dB [Pel05]. Nos résultats (figure 3.10) indiquent une décroissance de type « Hall » (discontinuités) qui peut témoigner de la présence de quelques obstacles (table de mesure, par exemple). Nous nous attendons donc à des effets d'écho qui peuvent nuire à la localisation temporelle des événements mesurés. En accord avec la formule de Sabine [Jou99], la courbe de droite, calculée avec les facteurs d'absorption nous montre la dépendance en fréquence de cet effet. Toutefois, comme nous l'avons déjà précisé, son intervention reste négligeable par rapport aux premières réflexions.

### 3.3.3 Stimuli

Nous utilisons un stimulateur tactile proche de ceux proposés par Chen et Markus [CM94] et par l'équipe de Meftah [MBC00] : une roue en rotation actionnée par un moteur. Toutefois notre système possède certaines particularités.

Afin de pouvoir bien séparer les événements vibratoires résultant des périodicités respectives des deux textures (doigt et roue), nous utilisons une roue dentée dont les crans sont espacés de 2.5 mm, hauts de 1,25 mm et larges de 15 mm. Cette roue est entraînée de manière directe par un moteur à ultrasons SHINSEI USR60. Ceci présente plusieurs avantages. Tout d'abord,

contrairement aux moteurs électromagnétiques, il n'émet pas de bruit important dans les fréquences audibles. Il rayonne dans les ultrasons : on peut régler la fréquence d'excitation de ses transducteurs piézoélectriques (typiquement de 40 kHz) de telle sorte que l'on choisisse le rang du mode de flexion sur son stator qui résonne alors en volume [Gir02]. Ensuite, comme il présente un fort couple à basse vitesse, son utilisation va nous permettre d'appliquer des efforts tangentiels maximaux sur le doigt d'environ 12.5 N sans réducteur (éventuelle source de bruit additionnelle). Nous utilisons pour cela un contrôleur D6060E qui permet de contrôler la vitesse de rotation du moteur à 15 tpm (vitesse de défilement minimale d'un cran à la périphérie égale à  $6,28 \text{ cm.s}^{-1}$ ) tout en lui permettant, à cette vitesse, de délivrer un couple en continu de 0.5 N.m. Enfin, sa compatibilité électromagnétique ne risque pas de perturber les mesures en émettant des champs indésirables sur une éventuelle bobine de microphone dynamique ou accéléromètres placés à proximité.

### 3.3.4 Contrôle de la force normale d'appui du doigt et de la vitesse du moteur

Dans cette phase d'identification, nous cherchons davantage à découvrir des phénomènes vibratoires qu'à évaluer l'influence de la force normale  $F_n$ . Cependant, pour des raisons de reproductibilité de la mesure, nous allons la contrôler indirectement. L'usage d'un capteur de force, comme une cellule de pesée, placé sous l'ensemble poulie-moteur (par exemple, notre plate forme de force verticale isométrique) pouvait nous fournir sa mesure. Pourtant, nous avons privilégié la rigidité du système.

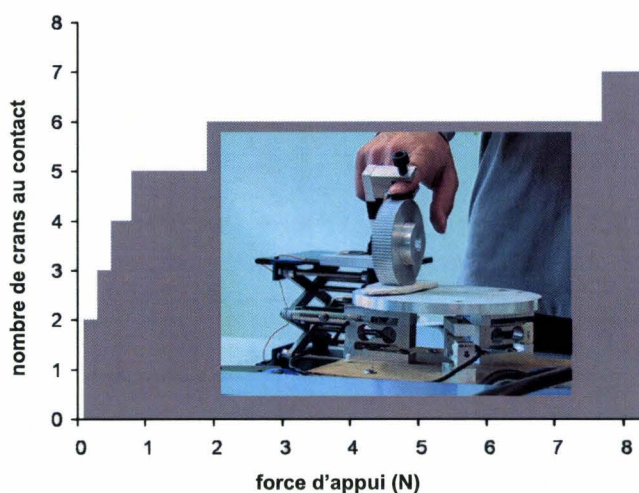


Fig. 3.11 – Méthode de contrôle de la force d'appui

Comme l'indique la figure 3.11, nous comptons le nombre de crans de la roue marqués par de l'encre noire lorsqu'un doigt enduit lui impose un effort normal contrôlé. Nous travaillerons toujours avec cinq crans au contact, soit une force normale comprise entre 0.9 et 1.9 N pour avoir des niveaux de bruit confortables tout en évitant tout risque de blessure. Cette gamme de forces correspond, dans nos essais, à un abaissement du support élévateur Boy obtenu grâce à un

mouvement de trois quarts de tour sur son levier à partir du moment où le contact initial sur la peau est ressenti.

Le codeur optique monté sur l'arbre du moteur pour réaliser son asservissement en vitesse possède une résolution de 500 points par tour. Il nous sert de capteur de vitesse de rotation grâce au compteur d'impulsions d'un boîtier Ontrack ADU100 relié au port USB de l'ordinateur.

### 3.3.5 Description du capteur et du matériel d'acquisition

Le choix du transducteur de variations de pression de l'air en signaux électriques nous est apparu à la fois délicat et déterminant. Il nous fallait trouver un microphone léger pour des mesures embarquées, omnidirectionnel, de très bonne sensibilité et à réponse en fréquence plate. Un conseil expert de Morten Støve, concepteur de microphones, fondateur et directeur de DPA au Danemark nous a orientés vers le modèle 4060. Avec une masse de 7.5 g connecteurs compris, ce microphone à condensateur possède un bruit de fond peu important de 23dB(A) (ref. 2.10<sup>-5</sup> Pa) et une bonne sensibilité de 20 mV.Pa<sup>-1</sup>. Son rapport signal/bruit est excellent (SNR = 71 dB(A) ref. 1 kHz à 1 Pa soit 94 dB SPL). Ce microphone est omnidirectionnel : il est moins sensible aux effets de proximité que les microphones à directivité prononcée, mais aussi aux mouvements des corps sur lequel il peut être en poursuite. Les microphones à petite capsule comme celui-ci ne deviennent directionnels que pour les très hautes fréquences (>>10 kHz).

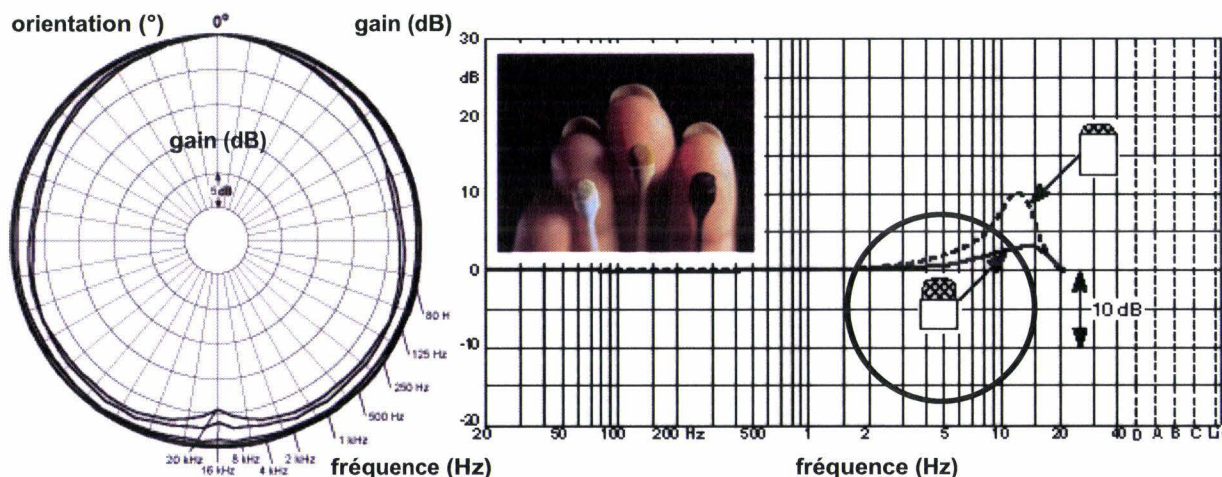


Fig. 3.12 – Caractéristiques directionnelles en fonction de la fréquence et courbe de réponse en fréquence [DPA06]

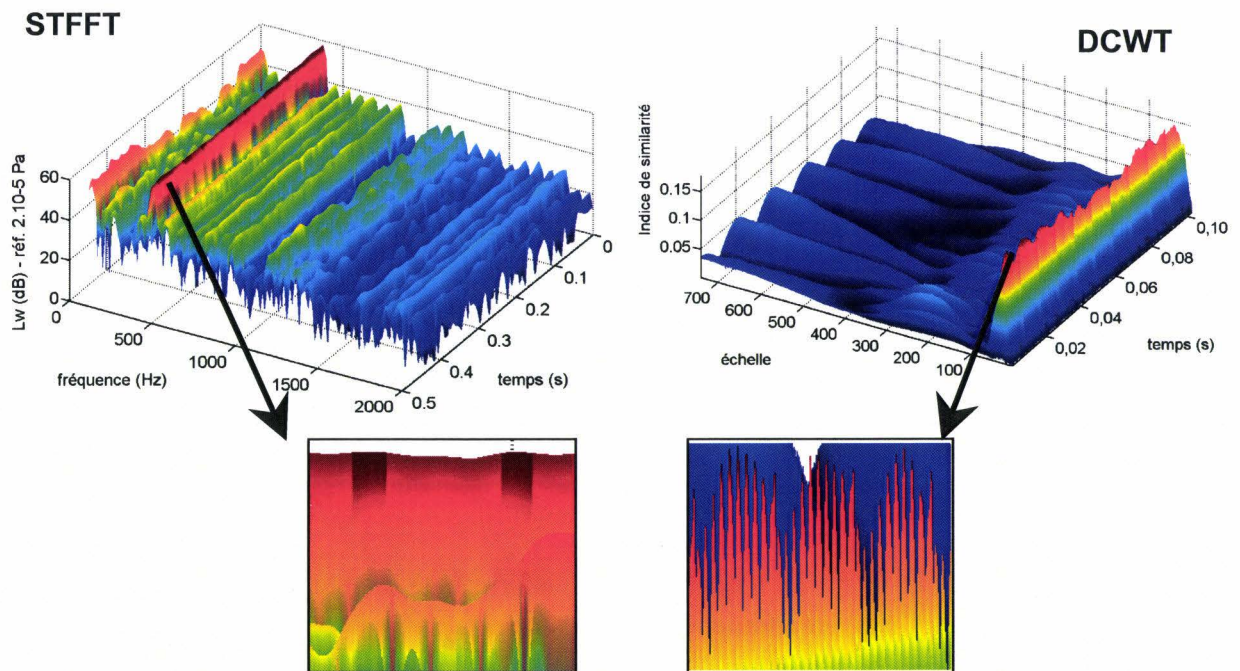
Ce microphone est branché en entrée d'un système Orchestra-01dB Metravib équipé de deux modules Direct/ICP<sup>®</sup>. Celui-ci permet d'effectuer des acquisitions multivoies sur 24 bits et des analyses en fréquence temps réel. Les signaux temporels sont échantillonnés durant 20 secondes à 25600 Hz (d'où notre analyse jusqu'à 12800 Hz de la section précédente). Le déclenchement de la mesure ne nécessite pas d'intervention humaine qui pourrait la perturber.

### 3.4 Résultats

Dans cette section, nous expliquons pourquoi nous avons analysé nos signaux avec l’outil ondelettes. Nous justifions ensuite l’emploi de l’ondelette de Meyer. Enfin, nous présentons des descriptions temps-intensité et temps-échelle-similarité des résultats obtenus pour une orientation proximale distale et distale proximale et des vitesses relatives variant de 10 à 25  $\text{cm.s}^{-1}$ .

#### 3.4.1 Préférence pour l’analyse des signaux par ondelettes

Pour une bonne compréhension des aspects théoriques de l’analyse temps-fréquence de Fourier et échelle-temps permise par les ondelettes, nous recommandons la lecture préalable de l’annexe D. Toutefois, nous allons tout de même expliquer rapidement les aspects qui nous ont motivé pour utiliser les ondelettes pour représenter l’information échelle-temps ou pseudo-fréquence-temps de nos signaux.



**Fig. 3.13 – Analyse du contenu temps-fréquences (STFFT) et échelle-temps (DCWT) pour une même portion de signal. Spectrogrammes et scalogrammes obtenus pour l’enregistrement à  $20\text{cm.s}^{-1}$  dans la direction proximale-distale.**

Si on veut représenter efficacement l’évolution temporelle du contenu fréquentiel d’un signal, il convient :

- d’utiliser des fonctions de base aux structures proches du contenu du signal pour détecter au mieux leur présence par une fenêtre auto adaptative de forme optimisée (choix de l’atome de la décomposition : sinusoides de Fourier ou famille d’ondelettes),



- d'utiliser (si possible) une base constituée de fonctions à support compact (espace fermé et borné) à la fois en temps et en fréquence pour pouvoir obtenir un bon compromis de localisation de l'événement détecté en temps, et en fréquence.

À gauche de la figure 3.13, nous présentons la représentation temps fréquence d'une portion de signal (l'un de nos enregistrements) de 100 ms obtenue grâce à la STFFT ou transformée de Fourier rapide à court-terme (fenêtre rectangulaire adaptée à l'étude des transitoires courts pour ne pas distordre le signal dans l'éventualité de temps de montée rapides, largeur de bande de transition la plus courte possible, 0 % de recouvrement pour éviter le lissage et calcul du spectre toutes les 1 ms). Cette technique est totalement insensible aux transitoires à haute fréquence mais par contre accentue le contraste des différences temporelles dans les zones qui ne nous intéressent pas (petites vagues bleues). À droite, nous utilisons la transformée en ondelettes continue discrétisée (DCWT) pour le calcul numérique avec l'ondelette de Meyer, elle aussi discrétisée ('dmey' dans Matlab, voir [AB97]). Nous justifions son usage dans le point suivant (3.2.4). On passe d'une décomposition de la puissance du signal en fonction de ses fréquences à une représentation d'indices de similarité en fonction de l'échelle examinée. L'indice de similarité s'exprime :

$$\text{Indice de similarité} = W\hat{f}(l, e) = \langle a, \psi_{l,e} \rangle = \sum_{n=0}^{N-1} a[n] \frac{1}{\sqrt{e}} \psi * \left( \frac{n-l}{e} \right)$$

La pseudo-période au centre de l'ondelette analysante peut être évaluée grâce à la fonction *scal2freq(niveaux, nom de l'ondelette, période d'échantillonnage en s)* de Matlab pour différentes échelles (voir tableau 3.2 et annexe D).

échelle e	1	20	40	60	80	100	200	400	600
pseudo-fréquence (Hz)	17219	860,93	430,47	286,98	215,23	172,19	86,09	43,05	28,70

Tab. 3.2 – Correspondance entre les échelles et fréquences centrales pour une ondelette de Meyer échantillonnée à 25,6 kHz.

Nous le voyons avec la figure 3.13 page 83, la transformée en ondelettes continue discrétisée nous permet de détecter très précisément des transitoires résultant d'impacts à 500 Hz. Les fonctions sinusoïdales de Fourier à support infini en temps en sont incapables, même avec une analyse sur des instants court et un fenêtrage adapté. À présent, nous allons expliquer pourquoi nous analysons nos signaux avec l'ondelette de Meyer.

### 3.4.2 Choix de l'ondelette de Meyer

Le choix de l'ondelette analysante détermine la qualité de l'information extraite. En analyse de signal, l'ondelette choisie peut aussi être retenue pour des raisons de ressemblance visuelle avec le signal car la similarité est un fondement de la CWT. Il existe cependant d'autres critères détaillés dans la section « taille du support et compromis » de l'annexe D (p. 190). Pour séparer

des évènements vibratoires nombreux dans un signal, on choisit une ondelette avec un support de taille courte et qui décroît très rapidement. Pour isoler un défaut singulier d'un signal (par exemple un potentiel tardif sur un électrocardiogramme), on préfère au contraire un support plus long avec un nombre de moments nuls plus élevé.

L'ondelette de Shannon ou *sinc* est un filtre passe-bas idéal parfaitement adapté à la localisation fréquentielle. Elle ne permet pas une localisation en temps sur son support, mais permet tout de même une localisation temporelle assez précise puisque son support est court et qu'elle y décroît très rapidement [Yak05]. Ces deux propriétés font qu'elle est bien adaptée aux études vibroacoustiques et à la détection de transitoires. Meyer propose une solution encore meilleure avec son ondelette. En adoucissant les bords de la transformée de Fourier de la fonction d'ondelette *sinc*, la décroissance devient encore plus rapide et il crée ainsi une ondelette parfaitement adaptée à la détection des chocs avec une fonction qui ressemble à une impulsion (figure 3.14).

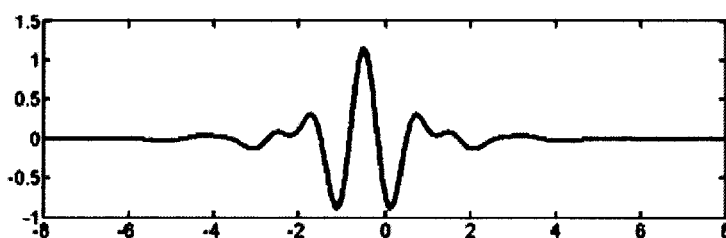


Fig. 3.14 – Ondelette de Meyer

Pour vérifier l'efficacité de notre filtre et le comparer à d'autres, nous allons employer le kurtosis [LZ03], indicateur statistique qui s'exprime :

$$Kurtosis(X) = \frac{E[X - \bar{X}]^4}{\sigma^4} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{N\sigma^4}$$

Cette mesure d'aplatissement relatif de la distribution par rapport à une distribution normale permet d'évaluer le contraste entre les coefficients de similarité faibles et forts des distributions. Comme le montre le tableau 3.3 page 86, ces grandeurs ont été calculées pour chacun des signaux et plusieurs familles d'ondelettes connues. Nous avons obtenu les meilleurs scores avec l'ondelette de Meyer. Par contre, pour les ondelettes de Daubechies et les Coiflets, plus l'ordre  $i$  des  $db_i$  et  $coif_i$  augmente, plus la valeur du kurtosis devient importante. Ceci est causé par le nombre de moments nuls et de la taille du support qui augmentent. Nous le vérifions avec une  $db_{40}$  en obtenant une somme égale à 172,7. Pourtant, si cette dernière ondelette permet de mieux compresser l'information, elle présente simultanément des évènements superposés, ce qui dans un contexte d'analyse ne nous permet plus de les discerner efficacement. Il nous faut pouvoir décomposer l'information

Parmi les ondelettes dont la taille de support est petite et à faible nombre de moments nuls, l'ondelette de Meyer obtient les meilleurs scores et c'est celle que nous choisirons.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	sommes
haar	4.9	2.1	4.5	2.0	3.7	2.6	3.5	3.1	3.1	2.5	2.8	2.3	2.6	2.6	42.3
dmey	11.1	2.6	12.0	3.0	7.8	3.5	8.8	5.4	6.8	2.9	3.8	3.3	3.9	2.9	77.5
db2	7.1	2.2	7.1	2.1	5.2	2.9	5.3	3.8	4.3	2.5	3.3	2.3	3.0	2.4	53.5
db3	8.9	2.4	8.8	2.3	6.3	3.0	6.8	4.3	5.2	2.6	3.4	2.4	3.3	2.4	64.7
db4	10.3	2.6	10.1	2.6	7.0	3.2	7.7	4.8	5.7	2.8	3.5	2.4	3.5	2.3	68.5
db5	11.0	2.7	11.4	2.7	7.5	3.3	8.4	5.2	6.2	2.9	3.8	2.4	3.8	2.4	73.7
sym4	8.6	2.1	8.7	2.4	6.1	3.2	6.5	4.3	5.2	2.6	3.3	2.3	3.2	2.4	60,9
coif3	9.3	2.2	9.6	2.5	6.7	3.2	7.2	4.6	5.6	2.6	3.5	2.3	3.4	2.4	65,1
coif4	9.7	2.3	10.0	2.6	7.0	3.3	7.6	4.8	5.9	2.7	3.5	2.3	3.5	2.4	67,2
coif5	10.0	2.4	10.4	2.7	7.2	3.3	7.8	4.9	6.1	2.8	3.6	2.3	3.6	2.4	69.5

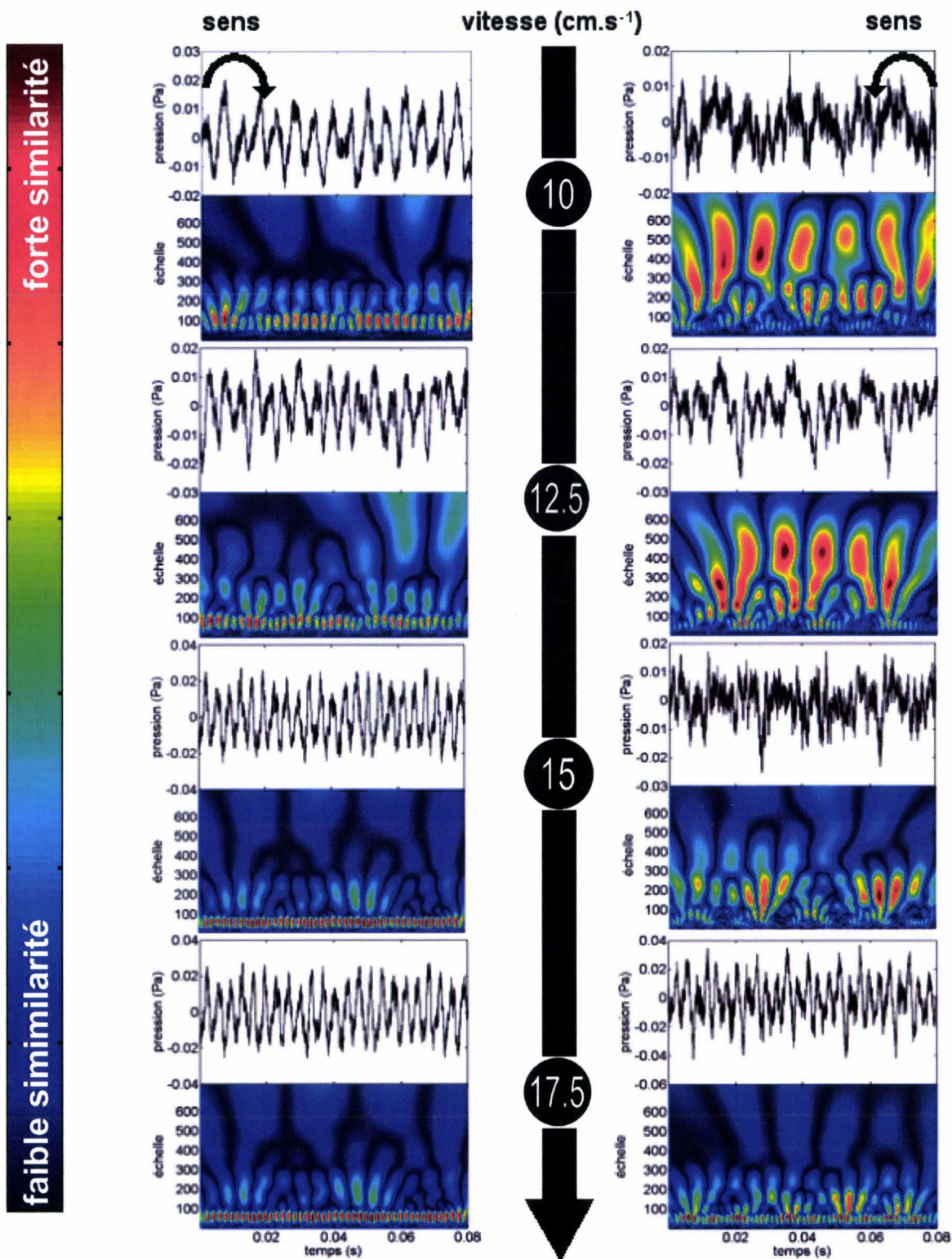
Tab. 3.3 – Valeur moyenne des kurtosis des distributions de coefficients pour les ondelettes de Haar, Meyer, Daubechies (2, 3, 4, 5), Symlets (4) et Coiflets (3, 4, 5).

### 3.4.3 Scalogrammes en fonction de la vitesse et de l'orientation relative

Nous devons vérifier si la dynamique des contraintes mécaniques et des déplacements de surfaces au contact peut être déterminée par d'autres phénomènes que les chargements périodiques ou cycliques de la texture du matériau touché à la cadence du mouvement dirigé. Plus précisément, nous nous interrogeons sur l'existence possible de vibration créée par l'adjacence des crêtes épidermiques. Pour répondre à cette question, nous avons, pour cette première campagne de mesure réalisée grâce au dispositif expérimental décrit dans la section 3.3, imposé un frottement tangentiel dans deux sens, l'un proximal-distal et l'autre, distal-proximal. Les mesures ont été effectuées à différentes vitesses. Nos résultats sont présentés dans les diagrammes qui suivent (figure 3.15 page 88) composés d'un signal temporel et de son scalogramme associé.

Les représentations temporelles de la figure 3.15 page 88 indiquent que les variations de pression crête-à-crête sont du même ordre de grandeur pour toutes les vitesses et orientations relatives. Pourtant, en fonction de la vitesse et sur des enregistrements de 20 secondes, nous avons constaté une légère évolution croissante d'indicateurs statistiques tels que le niveau crête maximal non pondérés ( $L_{pk}(lin)$ ) compris entre 58,2 et 67,8 dB(lin), et la variation de la valeur quadratique moyenne allant de 0.0080 Pa (RMS) à 0.0192 Pa (RMS). Ceci suggère a priori une faible dépendance des conditions d'application des stimuli sur l'intensité de l'énergie dissipée. Les signaux temporels ne nous servent plus à présent qu'à interpréter nos scalogrammes.

-*Entraînement de la roue dans le sens proximal-distal* : dans toutes les mesures, les variations de pression à l'échelle de la texture sont négligeables par rapport à d'autres phénomènes apparaissant à des échelles plus petites. Pour des mesures à [10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25] cm.s<sup>-1</sup>, nous nous attendions à obtenir des fondamentaux à des échelles égales à [430, 344, 287, 246, 215, 192, 173], ce qui correspondrait à des pseudo-fréquences de [40, 50, 60, 70, 80, 90, 100] Hz. Nos relevés montrent que la plupart de l'énergie est dissipée aux pseudo-fréquences de [160,



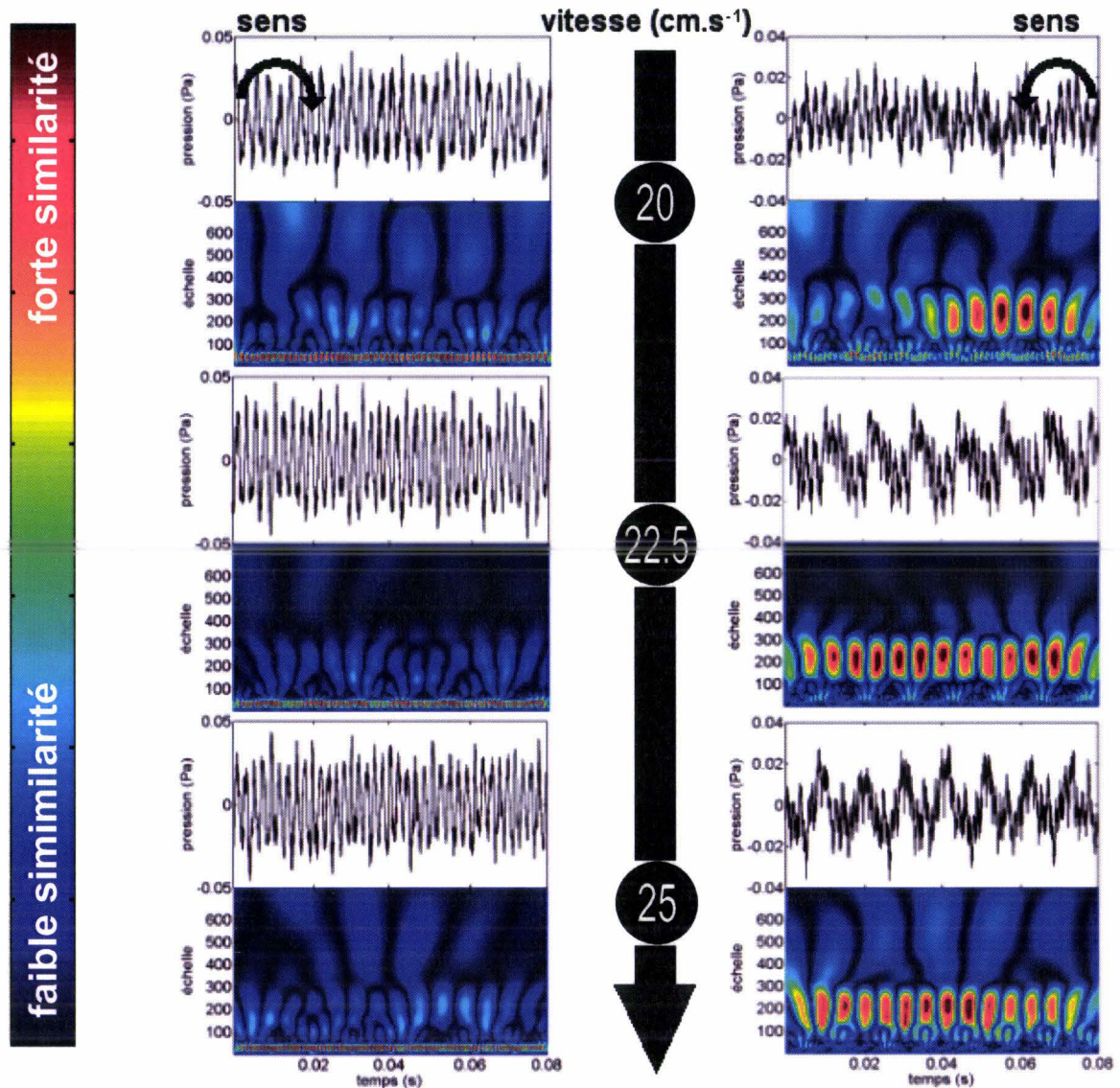
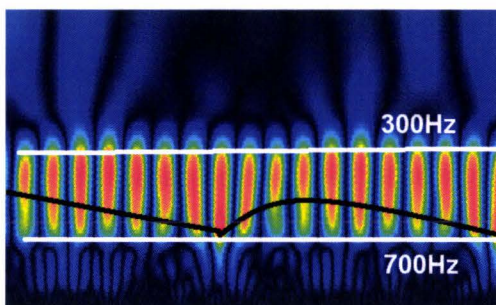


Fig. 3.15 – Transformée en ondelette continue fonction de la vitesse (entre 10 et 25  $\text{cm.s}^{-1}$ ), et du sens de rotation (sens distal à gauche et proximal à droite) de la roue crantée.

200, 240, 280, 320, 360, 400] Hz. Les lignes pointillées en rouge sur les figures indiquent par leur horizontalité que les ondes enregistrées subissent peu d'amortissement. Les motifs verticaux témoignent quant à eux de sollicitations des structures à plusieurs fréquences, ce qui laisse entrevoir la possibilité de chocs au contact. Les motifs diagonaux représentent des chirps ou « gazouillis ». Ils reflètent des phénomènes de compression ou de relaxation par des augmentations ou diminutions continues de fréquence au niveau des structures. Leur forme quadratique convexe ne suggère pas que leur présence soit due à des échos (décalage du son vers les graves). Plus la vitesse augmente, plus les motifs diagonaux disparaissent au profit de

structures horizontales et verticales. Cependant, comme l'indique la figure 3.16, il existe des modulations en fréquence et en d'amplitude des motifs à haute fréquence (compressions-détentes), qui sont, cette fois, ci en rapport avec la période spatiale de la texture.



**Fig. 3.16 – Détail de la CWT entre les échelles 27 et 57 pour le signal obtenu à  $25 \text{ cm.s}^{-1}$  dans la direction proximale-distale.**

Compte tenu de la périodicité des rainures de l'empreinte digitale (environ de 0.5 mm) et des échelles auxquelles apparaissent les vibrations à hautes fréquences (pseudo-fréquences en moyenne cinq fois supérieures à celles attendues situées dans le haut de la bande passante somesthésique, voir section 1.4.3 page 17), ces phénomènes à hautes fréquences sont certainement imputables à l'adjacence des crêtes épidermiques. Au final, nos mesures dans l'orientation proximale-distale suggèrent une pulpe de doigt étirée en permanence. Les crans viendraient glisser sur la peau principalement actionnée à l'échelle des rainures de l'épiderme.

*-Entraînement de la roue dans le sens distal-proximal :* cette série de mesures est beaucoup plus difficile à interpréter car il ne semble plus y avoir de relation linéaire entre des phénomènes vibratoires et la vitesse de défilement de la roue sur la peau. Nos relevés suggèrent plutôt une transition progressive entre deux modèles de phénomènes vibratoires. Comme on l'aperçoit légèrement à haute vitesse (entre  $20$  et  $25 \text{ cm.s}^{-1}$ ), les vibrations à haute fréquence sont toujours présentes sous forme de chirps concaves (petites vagues claires) autour d'oscillations régulières résultant de l'impact des crans. Simultanément, l'apport d'énergie à l'échelle des crans de la roue semble prédominer. Ici, il est possible, conformément aux résultats des recherches de Motorola [CM05], que sur le doigt immobilisé, assimilable à une poutre encastrée, il y ait apparition d'un nœud sur l'articulation interphalangienne distale, pour des fréquences supérieures à 80 Hz. Ainsi, la vibration enregistrée pourrait alors être en relation avec un déplacement d'ensemble de la phalange. À moins de  $20 \text{ cm.s}^{-1}$ , la structure du doigt résonne dans un mode d'ordre moins élevé et se meut uniformément : comme elle est contrainte par le support, c'est la pulpe qui dissipe l'énergie mécanique. On constate alors un regain dans la vibration présente en hautes fréquences et des phénomènes complexes aux fréquences les plus basses. À  $12.5 \text{ cm.s}^{-1}$ , le signal temporel suggère une alternance entre phases de compression-détente entourées d'événements à haute fréquence et de phases de glissement sans vibration ou encore de décollement où ces phénomènes sont absents.

#### 3.4.4 Inconsistance du frottement avec le codage à dimension temporelle

Nos mesures ne sont pas du tout en accord avec les résultats de mesure dynamique précédents [BH03][SCDL02] à cause d'une absence de contenu vibratoire significatif à l'échelle de la texture dans le sens proximal-distal ou encore des différences résultant du changement d'orientation. Les scalogrammes n'indiquent pas de relation linéaire entre les pseudo-fréquences des oscillations les plus énergétiques et la vitesse du doigt (sens distal proximal). Aussi nous ne pensons pas, comme Konyo, Maeno et leurs associés [KMYT05], qu'il puisse exister un invariant spectral par compensation kinesthésique. Par contre, nous avançons la théorie d'un comportement modal des structures excitées par différentes formes de forces tant du point de vue de leurs occurrences temporelles (vibrations continues ou oscillations transitoires), que par leur échelle spatiale. Ce manque d'invariance de la vibration au contact nous conduit donc à rejeter la possibilité d'une théorie fréquentielle ou temporelle déterministe de la perception de la rugosité.

Contrairement aux résultats des approches optiques directes [LW86][LH03], nos résultats ne prouvent pourtant rien en l'état. En effet, comme nous l'évoquons au sujet d'éventuelles erreurs de modélisation de l'effet dièdre (voir 3.2.4 page 74), nous ne connaissons pas la localisation de nos sources de bruit. Nous pouvons aussi avoir enregistré des résonances de structures autres que celle du doigt. Pour pallier ces limites, il nous faudra valider la présence du contenu vibratoire sur la peau et la participation des dermatoglyphes de l'empreinte digitale à l'émergence du bruit.

La complexité du contenu vibratoire des vibrations de frottement combinée à cette méconnaissance sur la localisation des sources de bruit est un problème bien connu des tribologues. Celle-ci nous empêche à présent de comprendre les mécanismes sous-jacents du frottement. Aussi, afin de poursuivre notre étude avec une idée plus claire sur les mécanismes d'interaction potentiellement impliqués au contact, nous présentons maintenant une discussion « ouverte » sur l'origine des sources de bruit. Nous savons à présent qu'il peut exister d'autres mécanismes candidats à l'émergence du bruit au contact et à la vibration sur la peau que l'excitation harmonique à la fréquence de la texture.

### 3.5 Discussion ouverte sur les mécanismes d'émergence du bruit

*« Cette question des frottements est une des plus complexes qu'ait à connaître le mécanicien : les phénomènes observés y sont fonction d'un nombre remarquablement élevé de facteurs ; eux-mêmes sont des notions fluctuantes dépendant de plusieurs variables et s'imbriquant les unes dans les autres. »*

Jean-Jacques Caubet [Cau64]

Discutons à présent comment, à partir des réponses des structures et d'une analogie simple entre un doigt en glissement et un pneumatique en roulement, nous pouvons répondre au problème inverse de l'identification des forces d'excitation qu'elles subissent durant ce frottement dont les mécanismes, et leur contribution effective à la perception de la rugosité sont encore si obscurs.

### 3.5.1 Frottement et perception de la rugosité

Nous avons présenté les sources de bruit comme des oscillateurs participant aux mécanismes de dissipation de l'énergie fournie aux surfaces lors du frottement. Ce dernier terme était déjà utilisé pour caractériser la procédure exploratoire du toucher latéral [LK87] au sens d'une *caresse*. Nous l'avons aussi employé sous cette forme. Pourtant, il décrit usuellement la manifestation macroscopique d'une émergence de forces de résistance au mouvement relatif entre deux corps. Il nous faut donc nous positionner et préciser s'il nous semble correct de décrire le toucher latéral comme un frottement. Même si Smith et son équipe [SCDL02] ont trouvé des corrélations significatives entre la perception de la rugosité et la variation temporelle de la force tangentielle sur l'ensemble de la pulpe (ou encore du frottement), nous considérons que le frottement n'est que la conséquence d'autres phénomènes, lesquels déterminent vraiment la perception de la rugosité. En d'autres termes, il peut y avoir un frottement important sur des textures qui ne sont pas perçues comme étant rugueuses. Pour s'en persuader, il suffit de poser le doigt sur la partie adhésive d'un morceau de scotch et de le déplacer tangentiellement.



**Fig. 3.17 – Preuve d'un contact non permanent lors du frottement du doigt sur un morceau de scotch accompagné de forces tangentielles et de vibration.**

Les mécanismes d'adhérence et de glissement voire de « vol » du doigt suggèrent des variations des forces tangentielles sur la peau tandis que le son émis émane des vibrations de contact, et ce, en l'absence totale de sensation de rugosité de surface. Aussi, une description en termes de frottement n'est pas assez explicite sur les phénomènes physiques particuliers qui le causent pour pouvoir répondre à notre problème initial de manière satisfaisante.

Dans l'étude de rayonnement de la section 3.2 débutant en page 68, nous avons accordé plus d'importance à la géométrie du système qu'aux mécanismes d'émergence des sources de bruit. Nous postulons l'existence d'une vitesse vibratoire non nulle dans la direction radiale sur une portion de sphère modale proche de la zone de contact. À présent, nous allons nous focaliser



davantage sur les mécanismes d'interaction et réfléchir sur la nature des forces et phénomènes vibratoires associés, responsables du bruit au contact.

### 3.5.2 Résonateurs sous influence de mécanismes d'interaction multiples

De manière générale, nous considérons que notre système est composé de deux structures déformables : celle de l'objet touché et celle des tissus humains. Lorsque des excitateurs leur fournissent un apport d'énergie, en fonction de leur géométrie, leur rhéologie et des conditions aux limites qui leur sont imposées, ces résonateurs la dissipent sous forme d'un rayonnement acoustique « à dimension modale ». Nous suggérons que ce caractère modal dépende du nombre de noeuds  $N^d$  et  $N^t$  choisi pour les structures et donc de la précision avec laquelle on examine le comportement. À l'échelle de la chaîne cinématique du doigt, le nombre de noeuds peut être en relation avec le nombre d'articulations impliquées [CM05]. À l'échelle de la pulpe du doigt le nombre de noeuds pourrait être en correspondance avec le motif de l'empreinte (Maeno et al. en proposent 3900 [JSME98]). Pour expliquer des comportements en nanotribologie, échelle d'intérêt compte-tenu des ordres de grandeur de la sensibilité tactile, il pourrait même être avantageux d'inclure davantage de noeuds : dans les recherches récentes sur les phonons, les masses concentrées représentent les atomes. Les déplacements de structure sont alors régis par des échanges de quantum d'énergie mécanique. Nous n'irons pas plus loin dans ces considérations de physique moléculaire. Pourtant il pourrait être intéressant de leur accorder de l'importance en haptique : une recherche succincte nous a révélé une extension possible de la théorie des phonons au cas des corps viscoélastiques, et leur transport dans des protéines.

Pour offrir une description généralisée, nous présentons nos résonateurs comme des systèmes de masses concentrées à  $6N^d$  et  $6N^t$  degrés de liberté (3 translations et 3 rotations). Ceux-ci subissent l'effet de forces d'inertie reliées à l'énergie cinétique (matrice de masse  $M$ ), et de forces élastiques (matrice de rigidité  $K$ ) en équilibre avec des forces externes. Nous décrivons ces structures comme sujettes à des forces d'amortissement visqueuses (matrice des coefficients  $B$ ) par souci de réalisme et d'applicabilité au cas des tissus vivants [Fun93].

$$\begin{aligned} M^d \ddot{X}^d + B^d \dot{X}^d + K^d X^d &= F^d + F_e^d \\ M^t \ddot{X}^t + B^t \dot{X}^t + K^t X^t &= F^t + F_e^t, \end{aligned}$$

Nos résultats suggèrent deux structures qui résonnent et s'excitent mutuellement. Si usuellement, l'un des deux objets est désigné comme exciteur pour des raisons d'apport d'énergie ou de rigidité supérieure [ASR05], nous considérons simplement ici que les structures sont soumises à des forces internes d'interaction  $F^d$  et  $F^t$  et à des forces externes  $F_e^d$  et  $F_e^t$  reflétant les contraintes de contact.

Tout mouvement de surfaces au contact peut être vu comme la combinaison de glissement, de rotation et de roulement [Joh87]. C'est la raison pour laquelle, il nous est apparu pertinent d'effectuer une analogie entre un doigt en glissement et un pneumatique en roulement. Pour ce dernier, la littérature [Kui01][BSB02][BA01][SE02] fait état de l'existence de mécanismes vibratoires continus (excitation harmonique de la bande de roulement par la texture), transitoires (chocs, adhérence-glissement, adhérence-décollement), de mécanismes aérodynamiques dépendant de la vitesse et de la porosité des textures (air pumping).

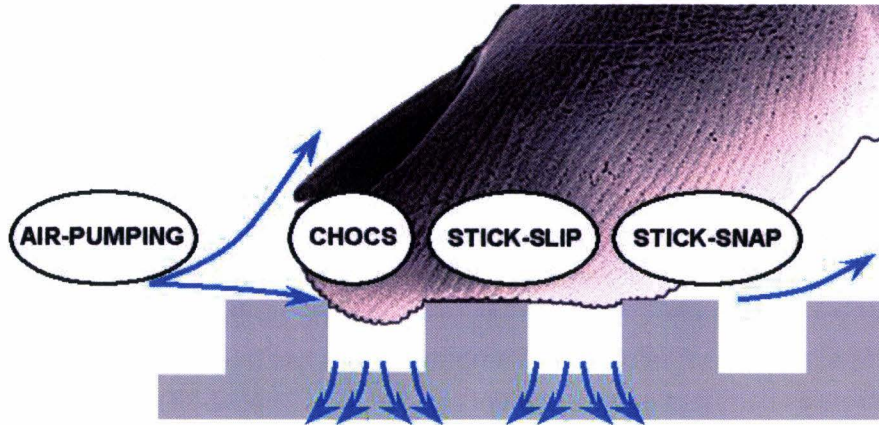


Fig. 3.18 – Mécanismes potentiellement impliqués dans l'émergence de sources de bruit au contact.

Faisons donc l'hypothèse de formes de forces extérieures spécifiques au contact doigt-texture (figure 3.18) et envisageons leur effet sur les résonateurs pour préciser nos résultats.

### 3.5.3 Forces impulsionnelles

Lors de l'interaction résultant de la caresse d'un doigt sur une texture, nous envisageons un premier cas de chargement très dynamique déterministe ou aléatoire : celui de l'application soudaine de forces externes concentrées sur des instants courts par rapport aux périodes propres du système étudié. Ces forces peuvent résulter de la rencontre entre aspérités ou de transitions marquées au contact (collision entre un doigt et un cran). Le chargement  $f(t)$  peut prendre plusieurs formes (rectangulaire, sinusoïdal,..) en fonction du phénomène qui va causer l'impulsion. Par exemple, pour un doigt qui rebondit sur une surface plane ou encore une rainure d'empreinte sur un cran sphérique, en utilisant l'approche de Hertz, on peut décrire le chargement comme suit :

$$f(t) = K^* \times A(t)^{3/2}$$

avec :

$$K^* = \frac{4}{3} \sqrt{R^* E^*} \quad , \quad R^* = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b} \quad \text{et} \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b}$$

avec  $R_i$  représentant respectivement le rayon d'une sphère (aspérité, rainure d'empreinte, pulpe du doigt) et  $E_i$  le module d'Young de la sphère et  $\nu_i$  son coefficient de Poisson. Afin de mieux tenir compte des géométries de surface (contact réel-apparent) les modèles de mécanique du contact de Johnson [Joh87] permettent l'évaluation des chargements moyens normaux entre surfaces ondulées et rugueuses au contact. Ceci peut aussi être effectué entre surfaces dont la dimension fractale de l'organisation des aspérités (exposant de Hurst) est connue [SMS02]. Comme l'ont montré Pawluk et Howe, l'approche de Fung permet aussi une modélisation locale précise du chargement [PH99].

L'impulsion  $I$  qui désigne l'intégrale de cette force en fonction de la durée et la force impulsionnelle s'expriment alors :

$$I = \int_0^T f(t) dt \text{ et } F(t) = I\delta(t)$$

Dans le cas d'une impulsion cinétique, on peut écrire  $I = \Delta P$  où  $P$  représente la quantité de mouvement. L'application de telles forces sur un résonateur lui impose localement une variation brusque d'accélération. Il se met alors à dissiper une partie de l'énergie mécanique de manière transitoire en résonant avec un maximum d'amplitude dans ses fréquences propres. Les structures verticales remarquées dans nos enregistrements (figure 3.15, pp.87-88) et le caractère discret de la répartition de l'énergie sont compatibles avec ce type d'excitation. Toutefois, dans cette expérience, il est encore difficile de discriminer si nos résultats témoignent d'une succession périodique d'impacts ou au contraire d'excitations de type harmonique.

### 3.5.4 Forces d'excitation périodique

Si on fait l'approximation de textures sinusoïdales, on peut discuter la présence de chargements cycliques sur les résonateurs. Nous proposons un exemple simple d'écriture de ces forces d'excitation externes sous forme d'une somme de signaux harmoniques. Elles sont en relation directe avec les périodicités spatiales de la texture (forme harmonique) et potentiellement de la pulpe du doigt (terme entre crochets []) :

$$F(t) = f_{1\max} \sin\left(\frac{2\pi St}{P_1}\right) \left[ + f_{2\max} \sin\left(\frac{2\pi St}{P_2} + \varphi\right) \right]$$

où  $S$  représente la vitesse relative,  $P_1$  et  $P_2$ , respectivement la période spatiale de la texture,  $\varphi$  le déphasage entre les motifs en régime permanent avec  $f_{i\max} = \max(f_i(t))$

Dans ce cas de figure, les réponses des résonateurs en régime permanent devraient avoir des périodes similaires aux composantes du chargement. La forme des réponses devrait voir apparaître des résonances à une ou plusieurs des harmoniques de l'excitation. Nos enregistrements possèdent des structures horizontales assez marquées en haute fréquence. Ceci suggère une excitation harmonique de l'empreinte digitale sur l'un des résonateurs, peut-être sur les crans de la roue pour les grandes vitesses dans l'orientation distale-proximale.

3.5.5 Forces dépendantes de la vitesse et stick-slip

Levesque et Hayward [LH03] s'interrogeaient sur d'éventuels comportements de stick-slip de l'empreinte digitale. Comme nous étudions un frottement, il nous paraît naturel de faire l'hypothèse de forces tangentielles dynamiques dont la dépendance en vitesse peut générer des mouvements intermittents de blocage de la peau et de glissements, appelés stick-slip (cf. [LH03]). On montre, en effet, qu'un oscillateur harmonique soumis à des forces de frottement sec peut, en fonction de paramètres cinétiques se déstabiliser et « bifurquer » entre plusieurs états : un état de glissement continu, un état d'adhérence-glissement et un état d'oscillations permanentes sans phase d'adhérence [Elm97].

En première approximation, comme le montre la figure 3.19, on peut considérer la pulpe du doigt (ou une aspérité d'empreinte digitale) comme un patin de masse  $m$ . Celui-ci est lié par un ressort de raideur  $K$  à une structure entraînée à une vitesse  $v$ , la phalange distale, lors du mouvement volontaire du toucher latéral .

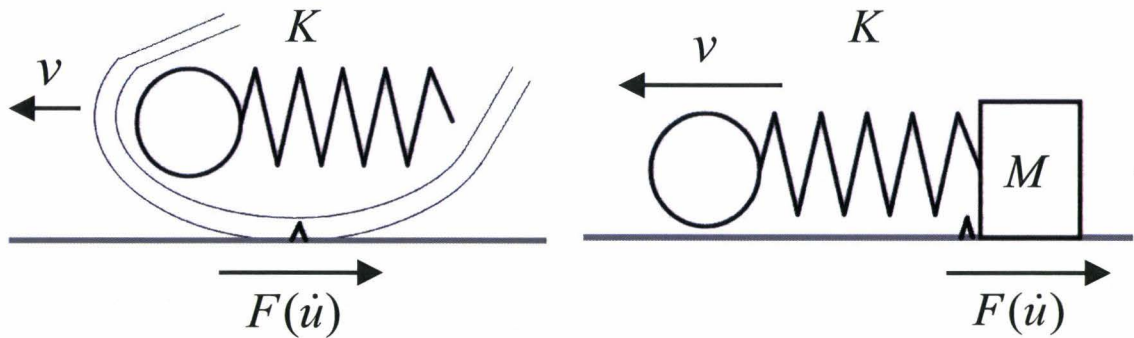


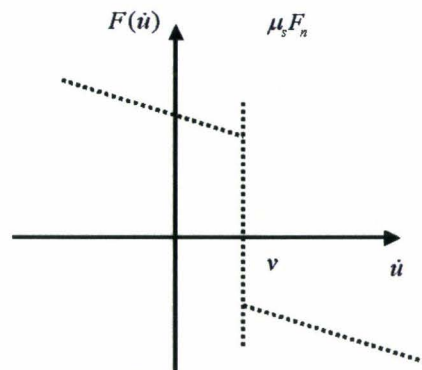
Fig. 3.19 – Stick-slip du doigt modélisé comme un patin.

Le bilan des forces appliquées sur la masse nous conduit à la relation suivante :

$$M\ddot{u} = K(vt - u) - F(u)$$

où  $F(u)$  est une force de frottement dépendante de la vitesse (forme cinétique ou statique) que l'on peut, à titre d'exemple, exprimer comme suit :

$$F(\dot{u}) = \begin{cases} \mu_s F_n & \text{si } \dot{u} = v \\ \mu_k F_n \operatorname{sgn}(v - \dot{u}) + \alpha \dot{u} & \text{sinon} \end{cases}$$



Tant que la limite de frottement statique n'est pas atteinte, une force de frottement importante, accessoirement dépendante de la vitesse, s'oppose au déplacement. Lorsque  $\dot{u} = v$ , le système se met à glisser en arrivant à vaincre les forces de cohésion statiques. Si  $\alpha$  était nul, on a coexistence d'un état d'oscillations permanentes en glissement pour toutes les valeurs de  $v$ . Lorsque  $\alpha$  est non nul, la première équation devient alors celle d'un oscillateur amorti et ceci permet d'aboutir à un système qui, à partir d'une vitesse limite, se met à glisser sans osciller. Si  $\alpha = \sqrt{KM}$ , cette vitesse d'entraînement s'exprime approximativement :

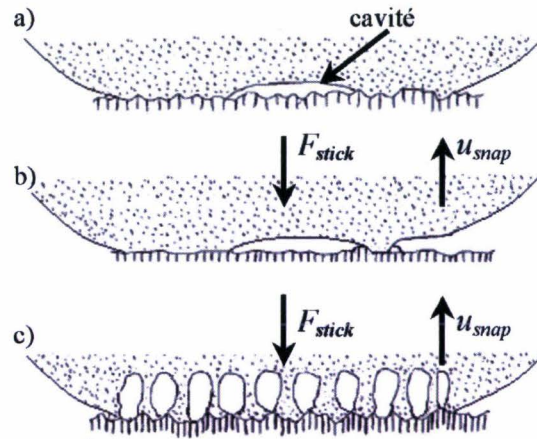
$$v_c = \frac{F_n(\mu_s - \mu_c)}{\sqrt{2\pi\alpha\sqrt{KM}}} + O(\sqrt{\alpha})$$

où  $O$  désigne le symbole de Landau. De manière générale, si la définition de la force n'est pas monotone, le système se stabilise à partir du moment où  $dF(\dot{u})/du > 0$ . Nous ne nous attarderons pas davantage sur cette présentation du phénomène de stick-slip qui pourrait nous amener à des développements considérables. En effet, on peut évoluer de l'expression d'une force tangentielle statique à une forme dynamique (voir [OAD98] pour un état de l'art sur les modèles de frottement statiques et dynamiques) en fonction des phénomènes physiques que l'on cherche à englober dans l'expression de la force. À titre d'exemple, on peut considérer  $F(\dot{u})$  comme résultante de déflexions dépendantes de la vitesse de brins, dans notre cas les rainures d'empreinte et de texture, favorisée par la lubrification quand la vitesse augmente, c'est le modèle LuGre. On peut aussi séparer les phases de déformation élastiques et plastiques [DHAA02] et ajouter par exemple, des composantes de bruit [ASR05] pour représenter des phénomènes de frottements mal compris à petite échelle.

D'un point de vue physique, on peut s'attendre à des phénomènes de résonance aux fréquences propres. Ceci serait lié à des forces d'impulsion lors du retour d'un glissement à la stiction  $F(\dot{u}) = \mu_s F_n$  s'accompagnant de l'apparition soudaine d'un chargement. Pourtant, on doit aussi considérer les oscillations de stick-slip qui elles, ne sont pas des mouvements sinusoïdaux purs. Nous devrions donc visualiser des structures diagonales ou chirps sur nos diagrammes. Il semble au final que ce soit ce phénomène qui décrit au mieux la série de mesure à basse vitesse dans la direction distale-proximale.

### 3.5.6 Forces d'adhérence et oscillations de décollement (stick-snap)

Dans le contact doigt-texture, la mécanique sous-jacente à la sensation de texture collante ou de doigt collant peut aussi être envisagée pour expliquer le frottement (voir notre exemple avec le rouleau de scotch en 3.5.1). Lorsque le doigt glisse sur une texture, l'air à l'interface de contact peut être chassé (cf. section 3.5.7 en page 98) ce qui conduit, si les deux surfaces s'emboîtent, à un rapprochement des deux surfaces et à l'éventuelle création de forces de résistance intermoléculaires. Lorsque le doigt se retire, les mécanismes de décollement s'effectuent par nucléation de fractures (figure 3.20 page 97) au contact [PT01].



**Fig. 3.20 – Forces d’adhésion sur la pulpe du doigt et configuration des cavités à l’interface. a) Création d’une cavité par une poussière ou l’absence de concomitance entre surfaces. b) Décollement périphérique. c) Configuration menant à une répétition de fractures lors du décollement.**

Derjaguin, Muller et Toporov proposent un modèle d’adhérence (DMT) plutôt réservé aux corps durs. Pour une idée de l’expression mathématique de la force d’interaction, il est préférable de partir du modèle d’adhésion macroscopique de Johnson, Kendall et Roberts (JKR). Soit  $\gamma_{1,2}$  l’énergie d’interaction des corps en contact et  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$ , leur énergie de surface ou tension superficielle. Le travail de l’adhérence  $w$  s’exprime :

$$w = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{1,2}$$

Le modèle JKR indique une force d’interaction de décollement  $F_{JKR}$  sur chacune des surfaces égale à [SAM05] :

$$F_{JKR} = \frac{3 \times (\pi w R^*)}{2} \quad F_{VDW} = \frac{\sqrt{A_1 A_2} R^*}{6D^2}$$

À une échelle plus microscopique, lorsque l’on a des forces d’adhérence de l’ordre du dixième de mN, il faut tenir compte plus précisément de l’influence de forces de Van der Waals sur les forces dynamiques d’interaction [FT06]. Ainsi, on peut calculer  $F_{VDW}$  avec  $A_1$  et  $A_2$  constantes de Hamaker des matériaux.

Les chargements en traction ou en cisaillement imposés sur la peau sont finalement très dépendants des processus initiaux de formation des cavités [SSS05] : il suffit qu’il y ait une poussière pour qu’il n’y ait pas d’adhérence ou encore que le doigt transpire pour que les cavités puissent davantage expulser l’air. Compte-tenu de l’aire de contact restreinte entre le doigt et la roue, du temps de contact entre structures petit devant les temps de relaxation pour la peau du doigt soumise à la traction tangentielle [WH06a], le phénomène de stick-snap ne devrait pas contribuer de manière significative au bruit de contact. C’est le modèle que nous retiendrions

pour expliquer le bruit de frottement et les tractions-cisaillements du toucher latéral d'une bande adhésive (section 3.5.1 page 91).

### 3.5.7 Forces d'origine aérodynamique

L'emprisonnement de volumes d'air entre le doigt et la texture peut apporter des forces d'excitation et vibrations additionnelles au contact et/ou une lubrification. Effet aérodynamique principalement connu dans les études sur le bruit de roulement des pneumatiques sur les chaussées, il est lié à une aspiration d'air, une compression dans la zone de contact et à une expiration. On peut, dans notre cas, le modéliser simplement en considérant une membrane virtuelle refermant une cavité ou un cran, de telle sorte que l'on ait :

$$F = kx \text{ avec } k = \frac{\gamma p}{V} S^2$$

où  $\gamma$  désigne le rapport de la chaleur massique à pression constante d'un gaz à la chaleur massique à volume constant (pour l'air, il est égal à 1,401),  $V$  le volume de la cavité,  $S$  la surface de la membrane et  $\rho$  la masse volumique de l'air  $1,22 \text{ kg.m}^3$  à  $16^\circ$  [Jou91]. Cet effet dépend de l'emprisonnement de volumes d'air. il est donc nécessaire que les deux textures aient des dimensions propices à cet effet : tandis que des surfaces lisses n'accueilleront que peu d'air, des surfaces à fort gradient de texture ne permettront pas son emprisonnement [EST84].

Plus récemment, des recherches [Gag99] tentent d'expliquer certaines non-linéarités dans ces mécanismes aérodynamiques par des compression ou changements de forme de texture (squeeze effect) qui créeraient des fluctuations de densité  $\delta\rho$ .

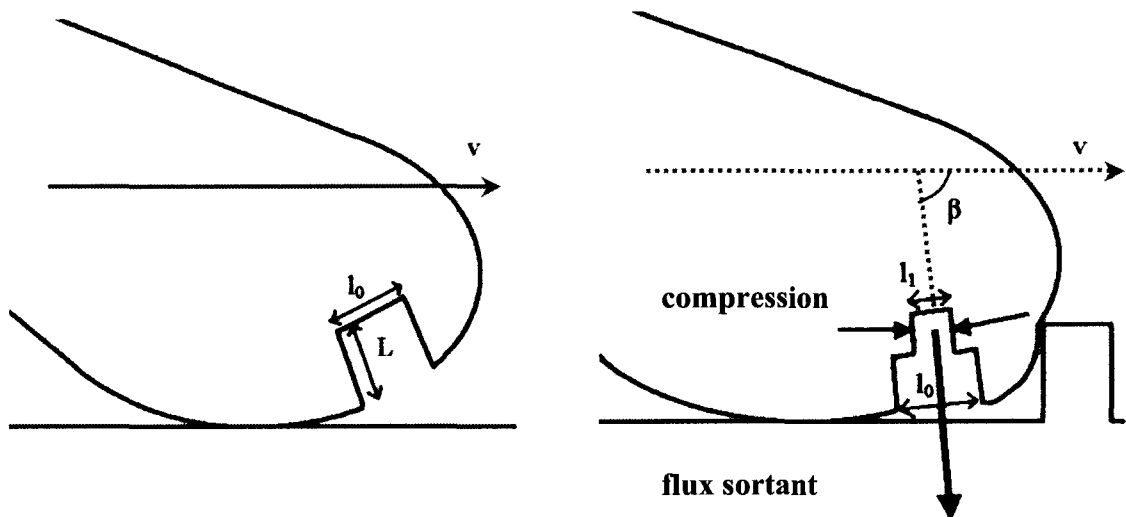


Fig. 3.21 – Modélisation de l'air pumping par une approche compression ou « squeeze ».

Supposons une rainure d'empreinte digitale ou cavité rectangulaire de profondeur  $L$  et de largeur initiale  $l_0$  (nous appellerons d sa troisième dimension). Celle-ci se déplace à une vitesse  $v$

avec une orientation relative par rapport à la direction de déplacement d'un angle  $\beta$ . Lorsque la peau percute le cran de la texture, la cavité dont la projection dans la direction du mouvement est égale à  $L \cos \beta$  est comprimée en un temps  $L \cos \beta / v$  ou encore à la vitesse  $v_c = v / \cos \beta$ . La diminution du volume provoque une augmentation de la densité et de la pression dans toute la cavité qui se propage à la vitesse du son  $c$  vers la sortie en un temps  $\tau = L/c$ . Dans le même temps, la cavité a subi une diminution de volume  $\delta V = (l_0 - l_1) L d v_c \tau$ . Puisque l'air n'a pas encore été évacué au temps  $\tau$ , la fluctuation de densité s'écrit :

$$\delta \rho = \left[ \frac{l_0 c \cos \beta}{(l_0 - l_1) v} - 1 \right]^{-1}$$



Si on calcule cette variation possible de densité pour un cran orienté presque dans la direction normale ( $\beta=89^\circ$ ), un doigt défilant à  $20 \text{ cm.s}^{-1}$  qui subit dans ses crans des diminutions de largeur de 50 %, on trouve  $\delta \rho = 0.018 < 0.02$ , valeur limite où on admet généralement l'influence d'un effet de changement rapide de volume [Gag99]. Par conséquent, la présence de variations de pression de ce type paraît peu probable. Par contre, comme nous l'avons dit, on peut toujours considérer la présence de forces élastiques de compression résultant de l'air piégé dans les cavités formées. Nous resterons donc sur notre première description du phénomène qui, à titre d'exemple, s'apparente à une compression d'air rapide entre les mains.

Les ouvertures latérales des creux et l'élévation des crans de notre roue expliquent l'absence de ces phénomènes dans ces enregistrements puisque l'air ne peut être piégé.

A ces forces « externes » en relation directe avec les contraintes d'interaction imposées par les états physico-chimiques de surfaces au contact s'ajoutent les forces de réaction modales élastiques, visqueuses et inertielles que chacune des structures s'impose réciproquement. Celles-ci sont directement reliées à l'état des forces d'interaction internes à proximité des surfaces.

### 3.5 Bilan : nécessité d'expériences complémentaires

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur la dynamique du contact doigt-texture. Nous avons étudié les variations temporelles des pressions dans l'air, images des contraintes mécaniques sur la pulpe pour trouver une explication au mouvement dirigé de la procédure exploratoire.

Les prérequis d'usage du microphone comme technique de mesure et d'interprétation avisée des scalogrammes ont nécessité une étude parallèle sur les mécanismes d'interaction multiéchelles (sources de bruit) et sur les mécanismes de rayonnement modaux d'une pulpe de doigt modélisée comme une sphère. Ces informations et les données de mesure nous éclairent sur les phénomènes dynamiques caractéristiques du toucher latéral. Il semblerait qu'à l'échelle de la pulpe du doigt, le toucher latéral de texture puisse être vu comme un mouvement relatif entre deux résonateurs modaux subissant l'excitation de forces à l'interface beaucoup plus complexes que celles suggérées dans les études précédentes [BH03][SCDL02]. Nous l'avons d'abord



observé grâce à la présence d'une vibration haute fréquence (hypothétique échelle de l'empreinte digitale) qui se manifeste de manière variable. Ensuite, nous avons trouvé une forte dépendance du contenu vibratoire en fonction de l'orientation du mouvement. De plus, les phénomènes vibratoires ne semblent pas se manifester de manière linéaire avec la vitesse des stimuli. Les mécanismes du frottement sont complexes et l'évolution temporelle des sons de contact ne supporte pas un codage temporel de la rugosité de texture (cf. section 3.4.4 page 90).

Pour renforcer cette analyse, il nous faut à présent montrer la présence de tels phénomènes sur la peau et prouver l'implication des crêtes épidermiques dans l'émergence des vibrations enregistrées à haute fréquence. En effet, au-delà d'un argument basé sur une complexité du frottement, la participation de l'empreinte pourrait justifier l'aspect dynamique de la procédure exploratoire. Le geste de badigeonnage du toucher de texture était aléatoire dans ses trajectoires, ses vitesses et ses forces au contact (cf. chapitre 2, pp. 39-62). Par conséquent, si pour les textures fines, la distribution des forces d'interaction et la présence de vibration est majoritairement déterminée par la présence de situations de commensurabilité entre le relief de l'empreinte et celui du matériau touché, alors la distribution des forces d'interaction sera de nature aléatoire.

Une recherche stochastique d'information sur la dynamique à petite échelle pourrait cependant faire partie des motivations d'exploration et expliquer les trajectoires inconsistantes en apparence. Le mouvement serait ainsi expliqué par un code intensif reposant sur une estimation des moyennes ou maxima des moments des distributions spatiotemporelles des contraintes sur la pulpe du doigt, fonctions aléatoires caractérisées par une densité de probabilité d'emboîtement entre structures superficielles des textures. Le mouvement, alors vraiment contrôlé pour acquérir l'information de détail, aurait un rôle de contrôle de la stationnarité du processus.

## Chapitre 4

### Commensurabilité entre surfaces en vibration et perception de la rugosité

---

<b>4.1</b>	<b>Influence de l'angle doigt-surface sur la vibration de la pulpe.....</b>	<b>102</b>
4.1.1	Objectifs de l'expérience.....	102
4.1.2	Validation de la technique microphonique par Vibrométrie LASER Doppler.....	103
4.1.3	Modifications du protocole expérimental.....	103
4.1.4	Phénomènes cycliques en faveur d'un rôle de l'empreinte.....	105
4.1.5	Séparabilité de la distribution d'énergie mécanique sur la pulpe.....	105
4.1.6	Mesure complémentaire de validation sur l'ongle.....	109
4.1.7	Vibration dépendante de la posture.....	110
<b>4.2</b>	<b>Comprendre l'influence de la commensurabilité sur la rugosité perçue.....</b>	<b>111</b>
4.2.1	Méthodes privilégiées pour l'évaluation de l'acuité spatiale.....	111
4.2.2	Stratégie d'explication du rôle du mouvement dans la perception.....	112
<b>4.3</b>	<b>Rugosité perçue en fonction de l'emboîtement entre reliefs.....</b>	<b>113</b>
4.3.1	Sujets et méthodes.....	113
4.3.2	Résultat : rugosité perçue fonction de la commensurabilité.....	115
4.3.3	Analyse comparative du résultat par rapport à ceux de la littérature.....	116
<b>4.4</b>	<b>Situation discriminante : lame cisillée par les crêtes épidermiques.....</b>	<b>117</b>
4.4.1	Méthode : étude des relations entre réponse en fréquence et emboîtement.....	117
4.4.2	Résultat : contribution de l'empreinte à l'émergence du cisaillement.....	120
<b>4.5</b>	<b>Vibration induite sur la texture à cause de la présence d'un cran.....</b>	<b>121</b>
4.5.1	Protocole expérimental.....	121
4.5.2	Résultat : incohérence fréquentielle entre vibration au contact et rugosité fine...	122
<b>4.6</b>	<b>Cas des textures finement rainurées.....</b>	<b>124</b>
4.6.1	Remarques sur les conditions expérimentales.....	124
4.6.2	Résultat : des phénomènes d'intensité globale comparable.....	124
<b>4.7</b>	<b>Sensations résultant de la suppression des indices spatiaux.....</b>	<b>128</b>
4.7.1	Enregistrement unidimensionnel des déplacements de surfaces et restitution....	128
4.7.2	Résultats : importance du gradient spatial des forces au contact.....	129
<b>4.8</b>	<b>Résumé des observations expérimentales et conclusion du chapitre.....</b>	<b>129</b>

---

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle démarche expérimentale pour d'une part, montrer l'implication de l'empreinte dans les mécanismes de chargement dynamique, et d'autre part, mettre en évidence la présence d'un contenu vibratoire résultant sur la pulpe du doigt. Ceci nous permettra de légitimer l'hypothèse de l'influence de la commensurabilité entre surfaces sur la perception de la rugosité pour défendre la thèse suivante :

*Le mouvement relatif de badigeonnage entre un doigt et une texture fine est motivé par une recherche de commensurabilité entre deux surfaces au contact : lorsque les rugosités du matériau et de la peau sont de dimensions voisines, cela favorise la création de situations d'emboîtement entre aspérités et au final de forces tangentielles localisées. Ce processus géométrique est peu dépendant de la vitesse d'exploration, de la force d'appui normale et de la vibration résultant des collisions au contact. Ainsi, il semblerait que pour la texture fine, le gradient spatial du cisaillement sur la peau soit un déterminant beaucoup plus significatif que la variation temporelle des forces normales ou tangentielles sur l'ensemble du doigt. L'empreinte favoriserait alors l'apparition de cette non-uniformité en discrétisant le champ de contraintes de cisaillement et elle pourrait en plus apporter une information d'orientation grâce à son anisotropie et le localisant sur la pulpe.*

#### **4.1 Influence de l'angle doigt-surface sur la vibration de la pulpe**

Pour comprendre les enjeux et méthodes de cette expérience « charnière », rappelons nos motivations pour étudier l'influence de l'angle doigt-surface sur la vibration sur la pulpe.

##### **4.1.1 Objectifs de l'expérience**

En conservant des conditions expérimentales proches de celles proposées au chapitre 3, nous allons :

- mettre en oeuvre une mesure directe sur la peau de la pulpe du doigt pour vérifier la présence d'un contenu vibratoire similaire à celui trouvé grâce au microphone.
- vérifier si les motifs de l'empreinte digitale contribuent effectivement aux vibrations enregistrées à haute fréquence en testant des situations où les régions d'adjacence des crêtes épidermiques participent de manière différente au frottement.

Afin d'obtenir ces validations, nous proposons de modifier légèrement le protocole expérimental vu en section 3.3.1 située en page 79. Ceci nous permettra de mesurer les vibrations propagées sur la pulpe à l'aide d'un vibromètre LASER Doppler et d'étudier, en faisant varier l'angle relatif entre le doigt et le matériau touché, l'influence de l'adjacence des motifs de textures sur les vitesses de déformation sur la pulpe [MPBC06].

#### 4.1.2 Validation de la technique microphonique par Vibrométrie LASER Doppler

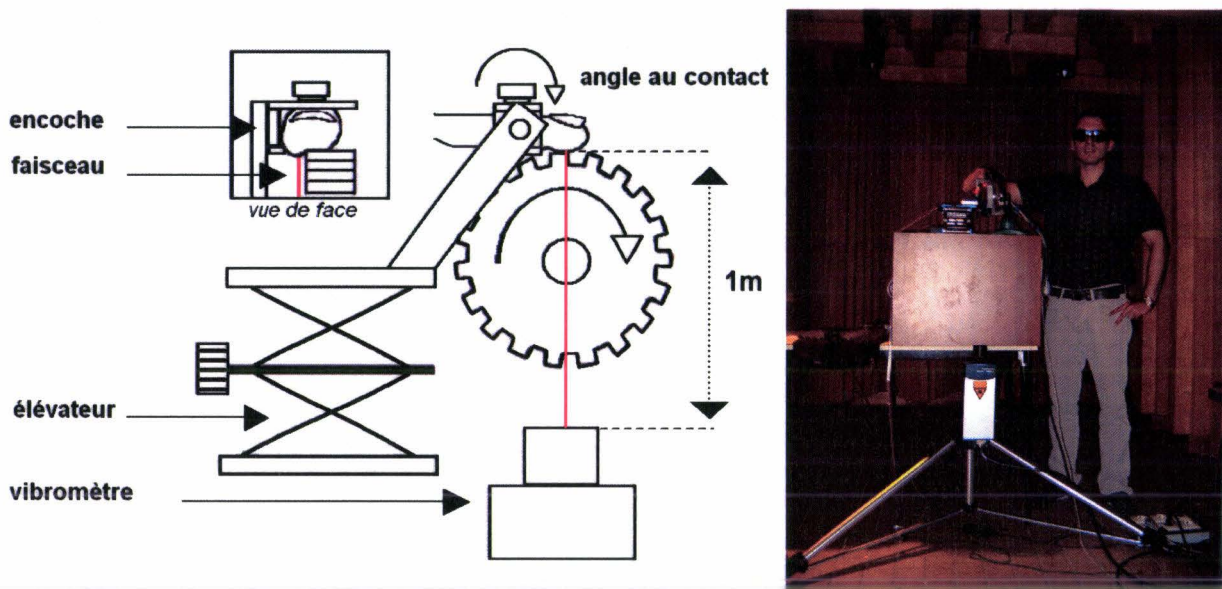
Le vibromètre LASER Doppler fonctionne sur la base de l'interférence optique (cf. cas acoustique similaire en 3.2.1 page 69). Il nécessite deux faisceaux de lumière cohérente, l'un de référence, et l'autre de mesure, dirigés vers l'objet à mesurer [RRG05][POL06]. Ceux-ci se superposent avec une différence de chemin  $\Delta_{\text{chemin optique}}$ , ce qui peut créer des interférences constructives ou destructives selon la loi d'interférence suivante :

$$I = I_r + I_m + 2\sqrt{I_r I_m} \cos \left[ \frac{2\pi(\Delta_{\text{chemin optique}})}{\lambda_{\text{LASER HeNe}}} \right]$$

Cette formule permet à l'appareil de déterminer l'amplitude d'un déplacement (2nm pour notre système) mais pas sa direction. Pour cela, on exploite l'effet Doppler en utilisant un modulateur en fréquence opto-acoustique, la cellule de Bragg sur le faisceau de référence. Si l'objet s'éloigne, la fréquence de la modulation mesurée par le détecteur sur le motif de franges augmente et s'il se rapproche, la fréquence de modulation diminue. Ceci permet une mesure très précise (précision de  $0.1 \mu\text{m.s}^{-1}$  pour des vitesses pouvant aller jusqu'à  $10 \text{m.s}^{-1}$ ) de la vitesse de l'objet. Dans le chapitre précédent, le microphone nous renseignait sur les variations distantes de pression résultant d'une vitesse particulière non nulle sur une région du doigt. Avec cette technique directe sans contact, nous évaluons directement cette vitesse. Nous devrions donc obtenir une mesure reflétant les variations de pression mises en évidence au chapitre 3. Cependant, cette technique de mesure performante nous contraint malgré tout à modifier notre banc d'essais.

#### 4.1.3 Modifications du protocole expérimental

Comme dans l'expérience du chapitre 3, le doigt est positionné dans l'encoche. Ainsi, le centre de la ligne médiane de sa pulpe est colocalisée sur la tranche de la roue crantée. Le doigt est toujours immobilisé par une vis de pression appuyant au milieu de la phalange distale. Dans la nouvelle configuration, le support mécanique dispose d'une partie mobile permettant à la phalange d'être positionnée dans des positions angulaires différentes relativement au plan du banc d'essai (surface de la roue au contact). Cet essai est rendu possible par la technique de mesure directe qui ne dépend pas de paramètres géométriques (changement de l'ouverture du dièdre entre le doigt et la surface). La partie apparente de la peau est enduite d'encre noire à tampon afin de réduire la diffraction dans les tissus et d'améliorer ainsi le rapport signal-bruit. La tête du vibromètre est placée à une distance verticale de la pulpe du doigt égale à un mètre. Nous commençons tout d'abord, en utilisant une feuille de papier blanc épais, à focaliser le faisceau dans un plan voisin car la proximité de la poulie interfère lors du processus d'éloignement du plan focal objet de la mise au point automatique. Ensuite, nous déplaçons le capteur sur la pulpe et effectuons au besoin un ajustement manuel visant à maximiser le rapport signal sur bruit. Au final, le diamètre de la surface de focalisation mesure  $25 \mu\text{m}$ .



**Fig. 4.1 – Dispositif expérimental pour la mesure au vibromètre LASER Doppler des vibrations propagées sur la pulpe**

Dans notre étude, l'hypothèse à vérifier est celle d'une vibration image des variations de pression (chapitre 3) qui est présente à au moins deux échelles spatiotemporelles bien distinctes, celle de la texture et celle de l'empreinte digitale. Dans cette configuration de mesure et, contrairement à celle qui sera abordée au chapitre 4, nous préférons la mesure en vitesse. Celle-ci n'est limitée que par le bruit en l'absence de vibration, contrairement à la mesure en déplacement dépendante de la précision des convertisseurs (14 bits). En effet, il est reconnu que des déplacements de grande amplitude liés à la faible rigidité de la peau masquent les petits phénomènes. L'information obtenue peut être reliée au déplacement : lorsqu'il s'agit de caractériser l'amplitude maximale de la vitesse  $v$  d'une ou plusieurs vibrations harmoniques, celle-ci peut être simplement exprimée en fonction du déplacement maximal  $d$  à une fréquence particulière  $f$ .

$$v = 2\pi fd$$

Nous faisons varier deux paramètres : l'orientation du mouvement relatif et l'angle au contact. Comme au chapitre 3, nous n'utilisons pas de capteur de force pour préserver la rigidité du système mais établissons, en utilisant un protocole expérimental identique à celui de la section 3.3.4 page 81, des relations entre la force et l'aire de contact sur la peau. Pour une force de 1 N, nous avons des nombres de crans au contact respectivement égaux à 4, 3, 3 et 2, pour des angles au contact égaux à 0, 30, 45 et 60 degrés par rapport à la direction de la surface de la poulie.

Afin de comparer nos signaux avec certains de ceux obtenus par voie microphonique au chapitre 3 sans échauffer le doigt (on peut noter que la mesure est très difficile à cause d'une nécessité de maintien en position précise du doigt et que la peau s'échauffe rapidement à cause de la tranche de la roue en rotation), nous choisissons une cadence d'entrée du cran dans la zone

de contact de 50 Hz, soit une vitesse de rotation de la roue assez lente de  $12.5 \text{ cm.s}^{-1}$ . Rappelons-nous qu'à cette vitesse, nous nous attendons éventuellement à du stick-slip dans la direction distale-proximale, en accord avec nos discussions sur les mécanismes du frottement potentiellement impliqués.

Quatre sujets ont pris part à notre expérience. L'absence de différence d'interprétation des signaux entre individus nous conduit à présenter les mesures issues d'une seule personne. Le chapitre 5 précisera la mesure dans laquelle nous généralisons à une population.

#### 4.1.4 Deux phénomènes cycliques en faveur d'un rôle de l'empreinte

Au paragraphe 3.4.3 de la page 86, les doubles périodicités indiquées tant par les signaux temporels que les scalogrammes nous ont encouragés à vouloir davantage de preuves d'une participation forte des crêtes épidermiques de la pulpe du doigt à l'émergence de la vibration de contact. Avant de présenter l'ensemble des résultats de l'expérience courante, nous avons voulu comparer une mesure temporelle au vibromètre à celle obtenue par voie microphonique. Nous choisissons une inclinaison du doigt de  $30^\circ$  et une vitesse de défilement de la roue de  $12.5 \text{ cm.s}^{-1}$  dans le sens distal-proximal. Ce dernier choix repose sur un contraste entre les périodicités beaucoup moins important dans le sens proximal-distal. La figure 4.2 indique un premier phénomène cyclique « bruité » à haute fréquence, en relation avec la période spatiale des crêtes épidermiques. Des augmentations d'amplitude se produisent selon une deuxième cadence temporelle, plus lente, en relation avec la période des dents de la roue crantée.

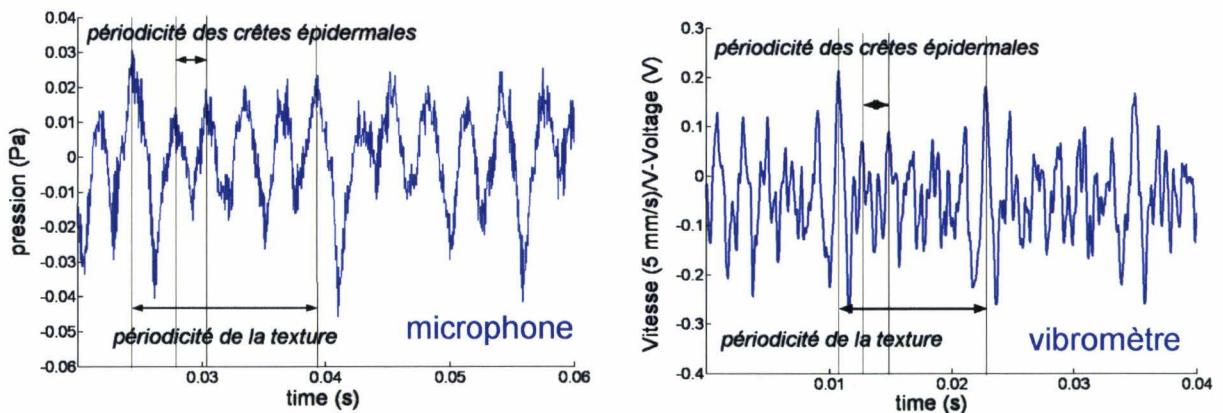


Fig. 4.2 – Comparaison de mesures acoustiques et vibrométriques supportant l'hypothèse d'un rôle frictionnel des crêtes épidermiques

#### 4.1.5 Séparabilité de la distribution d'énergie mécanique sur la pulpe

Pour traiter les signaux, nous calculons, comme dans le chapitre précédent (cf. 3.4.2 p. 84), la transformée continue en ondelettes avec l'ondelette mère de Meyer. Cette opération est effectuée pour chaque angle et orientation. Comme nous utilisons à présent non un système Orchestra 01dB mais un oscilloscope comme enregistreur de signaux, la fréquence d'échantillonnage évolue de

25,6 kHz à 100 kHz. Nous devons à présent « zoomer 2048 fois » pour atteindre l'information à basse fréquence. Le tableau 4.1 présente les nouvelles relations de correspondance entre les échelles et les pseudo-fréquences de l'ondelette Meyer.

<b>échelle e (cf. 3.4.1, p. 84)</b>	1	50	100	175	250	500	1000	1500	2000
<b>pseudo-fréquence (Hz)</b>	67213	1344,3	672,13	384,07	268,85	134,42	67,213	44,808	33,606

**Tab. 4.1 – Correspondance entre les échelles et fréquences centrales pour une ondelette de Meyer échantillonnée à 100 kHz.**

Examinons à présent les résultats présentés sur la figure 4.3 page 107. Les scalogrammes, dont l'échelle de couleur a été normalisée par rapport à l'intensité des signaux ( $v_{RMS}$ ), révèlent que les ondes mécaniques propagées au point de mesure sont des vibrations de type transitoire. Les structures résonnent toujours à l'identique avec une organisation de l'énergie selon des structures horizontales non continues, avec des composantes verticales marquées qui témoignent de chargements impulsionsnels (tous les niveaux sont excités quand un impact se produit). L'énergie contenue dans les sous-bandes 900-1900 indique que la peau vibre à 50 Hz, les crans de la poulie entrant dans la zone de contact à cette fréquence. Le comportement des tissus en déformation est plutôt élastique car nous retrouvons peu de chirps. Un deuxième phénomène du même type se produit dans le cas DP60, dans les niveaux compris entre les échelles 500 et 1000 ( $67 \text{ Hz} < p-f < 134 \text{ Hz}$ ). Dans tous les relevés, on trouve des petits glissements vers les hautes échelles ou basses fréquences comprises entre les niveaux 170 et 320 ( $210 \text{ Hz} < p-f < 395 \text{ Hz}$ ). Ceux-ci pourraient témoigner d'un mode résonant non stationnaire. En accord avec nos hypothèses précédentes sur le rôle frictionnel de l'empreinte [MPC05], ce résultat soutient l'hypothèse d'un apport d'énergie sur la peau conditionné par la périodicité des crêtes épidermiques. À ces échelles, on voit des formes sinusoïdales de distributions énergétiques qui pourraient refléter non seulement l'état de compression variable de la structure mais aussi des phénomènes de stick-slip. La structure devient plus rigide pendant des phases d'étirement tandis que des interactions à l'échelle de l'empreinte continuent de se produire. Cette étude nous donne un résultat nouveau : la vibration sur la peau diffère en fonction de l'angle au contact voire de la posture du doigt en toucher latéral.

Nous observons également d'autres phénomènes à des fréquences moins élevées. Pour un angle nul au contact (PD0-DP0), les distributions des vitesses sur la pulpe du doigt sont très différentes en fonction du sens de rotation de la poulie. Quand les crans se déplacent dans le sens proximal-distal, une quantité négligeable d'énergie est dissipée à basse fréquence. Ceci pourrait être causé par la forme incurvée du doigt qui ne permet pas à la poulie d'indenter une quantité importante de peau ou une extension non contrôlée de la phalange distale. Pour les angles au contact moyens, nous obtenons des réponses en fréquences similaires. Pour l'angle au contact le plus élevé ( $60^\circ$ ), les vitesses sont beaucoup plus importantes. À cet angle, les sujets se plaignaient que la phalange pouvait être emportée même pour des forces d'appui très faibles. Compte tenu de ce retour d'information permis par la mesure in vivo, nous avons pu faire l'hypothèse que, pour des angles élevés, une telle texture crantée et frottée à vitesse intermédiaire était en mesure d'

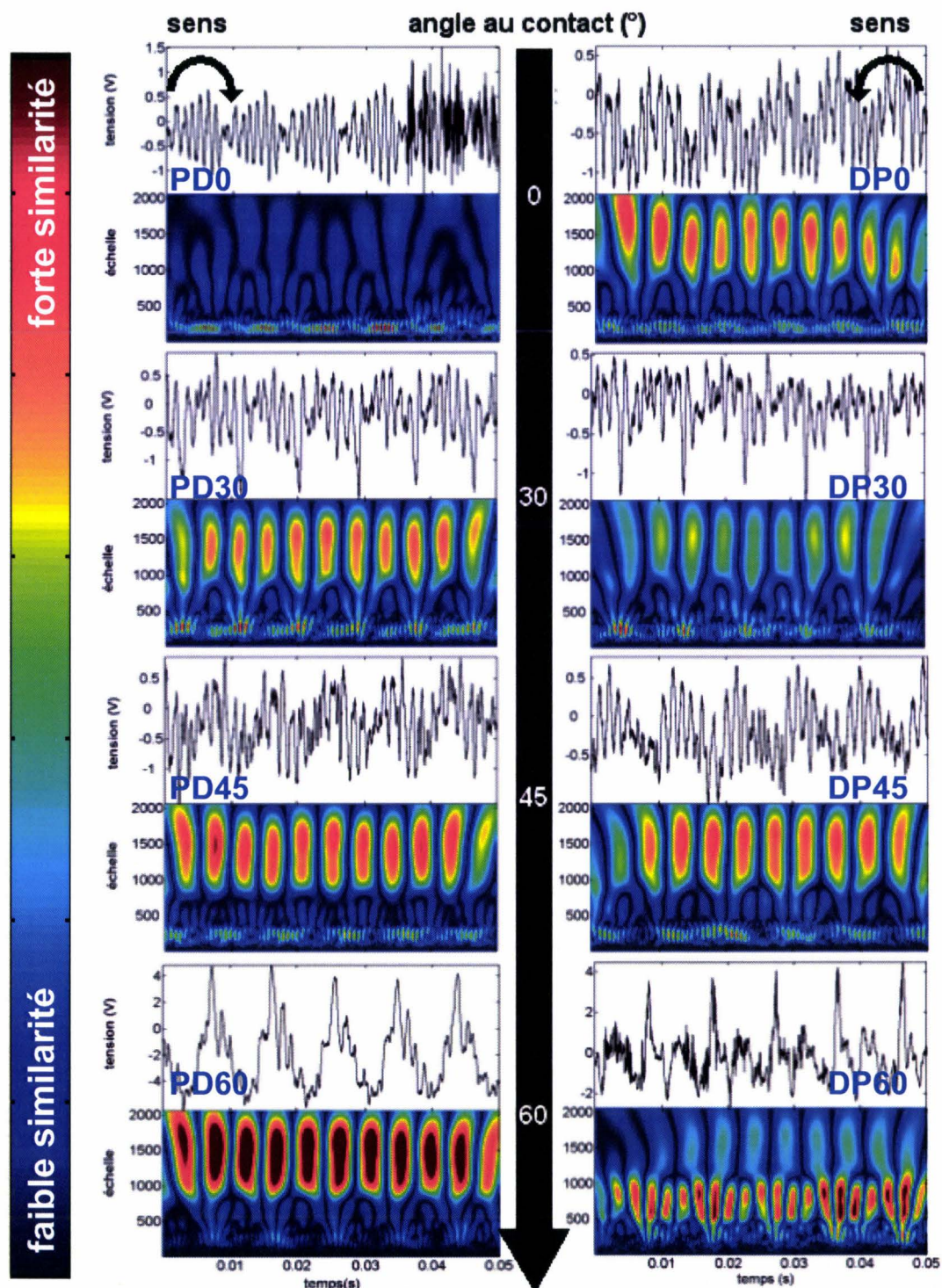


Fig. 4.3 – Transformée en ondelette continue fonction de l'angle d'inclinaison du doigt sur la surface (entre 0 et 60°) et du sens de rotation (distale à gauche et proximale à droite) de la roue crantée.



actionner la phalange distale pour certaines orientations du mouvement (domaine kinesthésique en plus du domaine cutané, voir partie 1.3.1 page 11). Les phénomènes vibratoires sur les membres pourraient être très différents en fonction de la direction et du sens d'application des stimuli qui peut favoriser la flexion ou l'extension des phalanges.








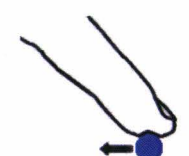

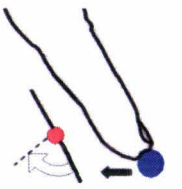
sens angle au contact	sens	
		
0°	PD0 	DP0 
30°	PD30 	DP30 
45°	PD45 	DP45 
60°	PD60 	DP60 

Fig. 4.4 – Explications sur les différences de comportement à basse fréquence.

La figure 4.4 présentée ci-dessus résume ces phénomènes de manière imagée. En condition PD0, le cran (balle bleue) est en position favorable pour s'échapper car il est de moins en moins contraint par la forme de la pulpe. En condition DP0, elle s'oppose à son déplacement : le cran doit passer l'obstacle de la pulpe. Les conditions PD30, PD45, DP30 et DP45 sont équivalentes en termes de résistance car la courbure de la pulpe peut être considérée comme identique pour un cran. Entre les conditions PD60 et DP60, l'articulation interphalangienne distale (cercle rouge) n'est pas sollicitée symétriquement via la phalange. Ceci nous amène à faire l'hypothèse d'une oscillation potentiellement dépendante de la raideur axiale de l'articulation interphalangienne distale en conditions PD60 et DP60 contrairement aux autres cas où la vibration de la peau devrait prédominer.

En utilisant deux tests simples nous allons vérifier cette interprétation qui aurait une importance capitale dans notre raisonnement : si la vibration sur la peau peut être fortement conditionnée par d'autres paramètres que la rugosité de texture seule, comme la cinématique du

mouvement qui contribue au rebondissement du doigt, alors, il y a de fortes chances pour qu'elle ne soit pas en mesure de fournir une information temporelle consistante au code de rugosité.

#### 4.1.6 Mesure complémentaire de validation sur l'angle.

Comme le montre la figure 4.5, nous avons attaché à l'ongle un accéléromètre triaxial (ENDEVCO 65-100). Celui-ci possède une haute sensibilité ( $100 \text{ mV.g}^{-1}$ ) et est suffisamment léger (5 g) pour n'être attaché qu'avec de la cire adhésive. Nous avons repris le protocole de l'expérience précédente pour connaître la raison des vitesses plus importantes dans les angles élevés en analysant les forces inertielles exercées en réponse de la phalange sur notre capteur.

Les résultats de mesure (tableau 4.2) indiquent que plus l'angle au contact augmente, plus l'intensité de la vibration est renforcée sur l'ongle, qui ne touche pas la texture, avec une augmentation très significative entre 45 et 60°.

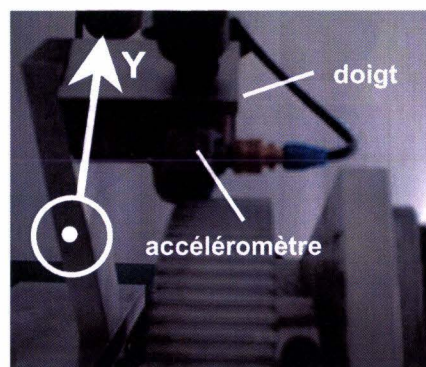


Fig. 4.5 – Mesure de la vibration transférée à la phalange distale grâce à un accéléromètre.

	proximale - distale		distale - proximale	
	axe X	axe Y	axe X	axe Y
0°	0.07	0.11	0.12	0.02
30°	1.22	2.48	0.51	0.75
45°	2.41	3.19	1.07	1.53
60°	<b>16.57</b>	<b>17.76</b>	<b>8.43</b>	<b>9.41</b>

Tab. 4.2 – Accélération crête à crête en  $\text{m.s}^{-2}$  fonction de l'angle et du sens

Pour mieux expliquer les distributions énergétiques des conditions DP60, nous avons appliqué un choc tangentiel dans les deux directions avec une pointe comme le suggère la figure 4.1 page 104. La réponse est mesurée dans les deux cas dans la direction normale à celle de l'ongle. Comme les signaux sont à nouveau échantillonnés à 25,6 kHz, il est nécessaire de se référer au tableau 3.2 (page 84) de correspondance entre échelles et pseudo-fréquences.

Comme le montre la figure 4.6 en page suivante, quand la direction du choc cause une flexion de la phalange distale, celle-ci oscille à une pseudo-fréquence plus élevée que dans le cas où on lui impose une extension. Ceci ce produit à une fréquence supérieure à 50 Hz. Le décalage vers les échelles supérieures par rapport aux résultats expérimentaux de la figure 4.3 présentée en page 107. peut s'expliquer par la masse additionnelle de l'accéléromètre imposée à la phalange distale, qui ne devient plus négligeable devant celle de la structure et fait diminuer la pseudo-fréquence de la réponse. Le doigt, que l'on peut ici considérer comme une poutre a un comportement dynamique « modal » : un noeud apparaît au niveau de l'interphalangienne distale pour un angle

au contact égal à  $60^\circ$  et dans le cas de stimuli distaux-proximaux. Ceci peut justifier les différences énergétiques constatées entre les figures PD60 et DP60.

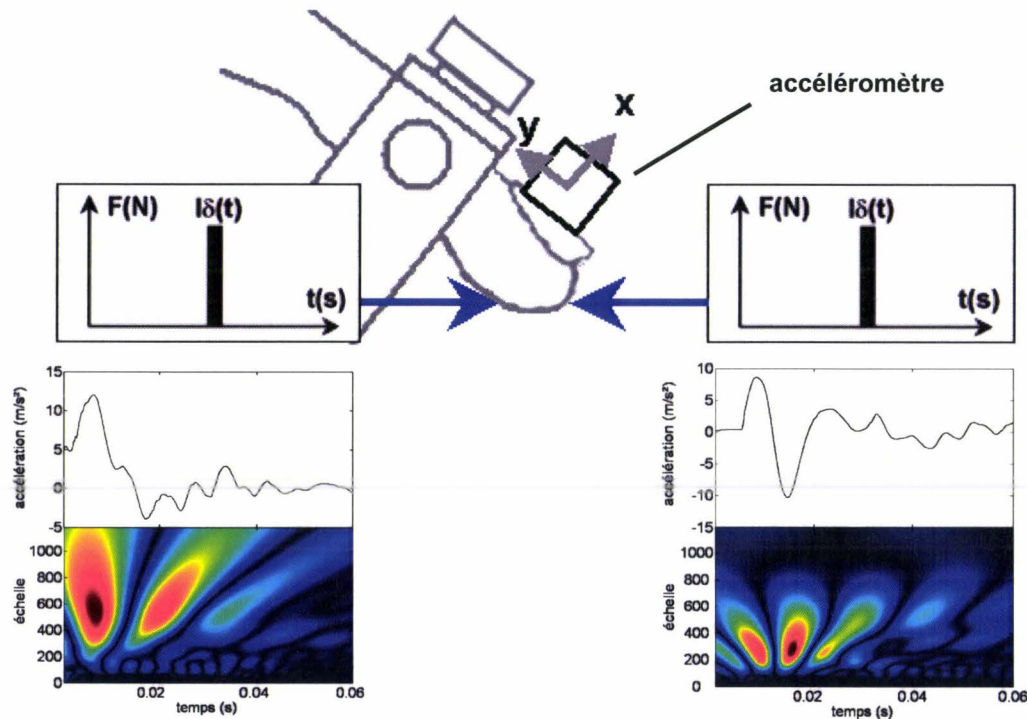


Fig. 4.6 – Analyse par ondelettes des réponses impulsionnelles captées dans la direction normale par l'accéléromètre.

#### 4.1.7 Vibration dépendante de la posture

Cette expérience laisse présager d'un fonctionnement dynamique de la structure du doigt en situation de toucher à la fois original et complexe. Ces difficultés s'ajoutent bien sur à celle de la compréhension de la tribologie (cf. chapitre 3). Nous l'avons vu dans cette expérience, les tissus de la pulpe du doigt sont en mesure d'amortir les ondes mécaniques pour les petits angles. Un moment plus important imposé sur l'articulation interphalangienne distale induit une propagation significative d'ondes mécaniques à un niveau kinesthésique. Ces résultats sont d'ailleurs en accord avec ceux de Chia-Yu et Manny [CM05], qui supportent une vibration propagée à l'ensemble de la structure, même pour des forces très faibles (0.05 à 0.5 N) et un caractère modal du doigt. Ce trait caractéristique apporte encore des arguments pour rejeter les mécanismes de codage de la rugosité basés sur la vibration (cf. 1.6.4.). La propagation des contraintes de contact dans les membres est très dépendante du facteur posture (éventuellement compensable par réafférence kinesthésique, cf. 1.2.1 page 6) déterminant l'impédance mécanique du système musculo-squelettique.

Revenons à nos objectifs initiaux. Cette expérience valide l'hypothèse de la participation de l'empreinte aux mécanismes du frottement et la présence d'un contenu vibratoire issu de

phénomènes multiéchelles sur la pulpe. Si différents « étages » de fonctionnement dynamique ont bien été identifiés, ce protocole n'a pas été suffisamment performant pour proposer une explication sur le rôle du mouvement dirigé à partir de l'adjacence entre les motifs de textures (pulpe et roue).

Nous avons jusqu'à présent utilisé une texture grossière (roue crantée) pour mieux séparer les échelles de répartition de l'énergie et ainsi caractériser la dynamique du toucher latéral dans son ensemble. Pour intégrer les conclusions du chapitre 2 à la démonstration et étudier l'importance de l'emboîtement entre reliefs, il nous faut employer des textures fines. Dans ce travail, elles désigneront des surfaces dont les aspérités sont du même ordre de grandeur en dimension (commensurables) que celles du relief de l'empreinte digitale.

## **4.2 Comprendre l'influence de la commensurabilité sur la rugosité perçue**

Nous savons à présent que l'*excitation réciproque* entre reliefs de texture du doigt et de la surface touchée impose *sur la peau* des *phénomènes vibratoires transitoires* à au moins *deux échelles* spatiotemporelles : celle des crêtes épidermiques et celle des aspérités de la texture. Cependant, si le choix de faire varier l'orientation du doigt nous a permis de valider une propagation sur la pulpe et de comprendre l'influence de la position du membre supérieur sur la dynamique du contact, cela n'a pas permis d'identifier clairement la participation de l'empreinte digitale à ces mécanismes. C'est pourquoi nous allons à présent travailler avec des reliefs entre surfaces comparables.

### **4.2.1 Méthodes privilégiées pour l'évaluation de l'acuité spatiale**

Dans l'expérience précédente (section 4.1, page 102) nous avons travaillé avec le banc d'essai du chapitre 3 pour valider la présence d'un contenu vibratoire multiéchelle sur la peau dû à une participation des crêtes de l'empreinte dans l'interaction de contact. La complexité des mécanismes vibratoires au contact nous amène à douter de leur apport à la perception. Ainsi, nous nous demandons si le mouvement ne peut pas être plutôt expliqué par une recherche de maximisation des contraintes dynamiques sur l'empreinte, fonction de l'emboîtement des textures au contact sous réserve de dimensions similaires.

Pour montrer l'importance de cette compatibilité spatiale de taille entre textures ou commensurabilité, nous nous sommes naturellement intéressés aux protocoles les plus performants d'étude de l'acuité spatiale : les tâches GO et SG.

Les tâches de discrimination de l'orientation de crans (gap orientation ou GO) ou de leur caractère lisse ou rainuré (smooth-grooved ou SG) sont des techniques expérimentales reconnues pour évaluer l'acuité tactile. Ces méthodes ont fortement contribué à supporter des mécanismes spatiaux de la perception déjà suggérés par les expériences psychophysiques sur la perception de la rugosité avec des plaques de largeur de cran et de largeur de rainure variable [Led72][LT74]. À

l'opposé, elles ont permis de montrer que la performance tactile est affectée en l'absence de mouvement dynamique pour les textures très fines.

En utilisant une approche GO, Philips et Johnson [PJ81] ont montré qu'aucune information ne contribue au processus de décision en ce qui concerne l'orientation de plaques avec des longueurs d'onde spatiale inférieures à 1 mm. Dans une tâche dynamique de type SG, les participants ont su détecter une encoche de largeur égale à 0.2 mm. Ils ont aussi montré que l'orientation relative entre les bords de plaques rainurées profondes et celles de l'empreinte ont un effet majeur sur les réponse des fibres de type SAI [PJ81a]. Leur sensibilité était accrue avec l'adjacence des rainures d'empreinte [PJ81a]. Dans une tâche de type GO, Essock et son équipe ont trouvé [EKP92][EKP97] une meilleure acuité pour des stries présentées dans l'orientation proximale-distale par rapport aux doigts. Ils ont expliqué ce comportement par une sélectivité des neurones. Dans une tâche SG, Stevens et Patterson [SP95] ont aussi trouvé des dépendances à l'orientation en fonction de la tâche. Avec une mesure prise à 15 mm dans la direction proximale le long du doigt (GO) et une force de contact de 100 gf (0.98 N), Craig [Cra99] n'a pas trouvé de preuve d'une dépendance directionnelle des performances de discrimination. Il a aussi noté l'absence d'angle seuil et de relation avec la densité de fibres primaires (SAI). En utilisant une approche neurophysiologique avec une plaque crantée dont les crans mesurent 1.5 mm de largeur et une profondeur de 0.75 mm, Wheat et Goodwin [WG00] ont trouvé un fort effet d'orientation. La structure en poutre de la crête épidermique imposerait une raideur plus importante dans la direction parallèle aux empreintes. Grâce à une tâche de type SG avec des gants et des dômes JVP (pour Johnson, Van Boven et Philips, fabriqué par Stoelting [JVBH94]), Gibson et Craig [GC02] ont finalement suggéré l'importance de facteurs spatiaux et intensifs. En utilisant des crans dont la largeur varie de 0.75 à 12mm, ils ont récemment trouvé [GC05] une sensibilité accrue de 33 % en cas de parallélisme entre les rainures d'empreinte et les crans de la texture. Cette différence de sensibilité n'était pas présente lorsque le contact s'opérait dans la région du centre de la pulpe. Vega-Bermundez et Johnson [VJ04] ont quant à eux suggéré qu'un comportement moins rigide dans la direction proximale-distale améliore les performances tactiles. Cette explication est tout à fait pertinente compte-tenu des propriétés rhéologiques superficielles de la pulpe du doigt décrites par Wang et Hayward [WH06a].

#### 4.2.2 Stratégie d'explication du rôle du mouvement dans la perception

Dans le contexte des études sur l'acuité spatiale et les anisotropies du toucher de texture, de nombreuses hypothèses ont été formulées sur l'importance des crêtes épidermiques. Pourtant, elles ont toujours été émises pour expliquer des résultats et rarement validées.

LaMotte et Srinivasan [LS91] se sont intéressés aux textures microscopiques. Mais à notre connaissance, il n'y a jamais eu d'étude psychophysique centrée sur la contribution des crêtes épidermiques à la perception de la rugosité de textures dont les aspérités sont de même ordre de grandeur en taille que celles des crêtes épidermiques. Nous n'avons pas non plus trouvé

d'explication géométrique à l'émergence des contraintes sur les membres et d'arguments pour un rôle du mouvement dirigé d'évaluation de l'emboîtement.

Nous allons maintenant nous intéresser aux effets de la pénétration des crans de textures commensurables à l'intérieur des cavités de l'empreinte sur les perceptions de rugosité et analyser la forme de l'énergie mécanique dissipée au contact. Pour cela, nous utiliserons des textures avec peu de relief pour contraindre la forme de la pulpe au contact à rester sur une même ligne de référence. Leurs surfaces différeront seulement par leur densité de lignes (changements spatiaux de largeur de rainure et de largeur de creux) pour isoler l'effet de l'imbrication à l'échelle de l'empreinte digitale dans le frottement. Le but est de discuter de la nature des indices fournis par les forces de cisaillement et la vibration subséquente au contact mais aussi, bien évidemment, d'expliquer la procédure exploratoire du toucher latéral.

### **4.3 Rugosité perçue en fonction de l'emboîtement entre reliefs**

Cette section propose une expérience de psychophysique dont la mise en place est proche de celle qui est requise lors d'une tâche GO. Seulement ici, la tâche consiste à exprimer l'intensité de la rugosité perçue. Les stimuli sont choisis afin d'étudier l'influence de la commensurabilité ou caractère comparable des motifs de textures, sur la perception de la rugosité de texture fine.

#### **4.3.1 Sujets et méthodes**

Douze étudiants naïfs âgés de 18 à 25 ans participent à l'expérience. Dans toutes les conditions, tous les sujets volontaires (9 hommes, 3 femmes) portent un casque fermé (MDR V500 Sony). Dans celui-ci, nous diffusons un bruit blanc généré par le logiciel dBgene32 de la société 01dB-Metrvib. Ceci nous permet de masquer les indices de rugosité audibles qui sont produits par le frottement entre le doigt et la texture. Nous demandons également aux sujets de se laver et de se sécher les mains.

Les textures crantées sont des plaques imprimées de cuivre sur une seule face, que l'on utilise habituellement pour concevoir des circuits électroniques. Elles sont de forme carrée avec une longueur d'arête de 100 mm. Elles sont gravées avec des motifs striés comme le montre la figure 4.7 en page 114. L'épaisseur du cuivre ou la hauteur des crans est égale à 70  $\mu\text{m}$  (donnée fabricant). Les largeurs d'interespacement entre les rainures ou largeur de creux (notées GW dans la littérature pour « Groove Width ») des plaques 1, 2, 3 et 4 sont respectivement égales à 0,25, 0,25, 0,5 et 1 mm. Quant aux largeurs de rainure (notées RW dans la littérature pour « Ridge Width »), celles-ci sont respectivement égales à 0,1, 0,25, 0,5 et 1 mm. Ainsi, les dimensions des aspérités de la texture sont du même ordre de grandeur que celles de l'empreinte digitale (figure 4.7). Toutefois leur géométrie variable permettra d'étudier l'influence de l'emboîtement sur la perception de la rugosité.

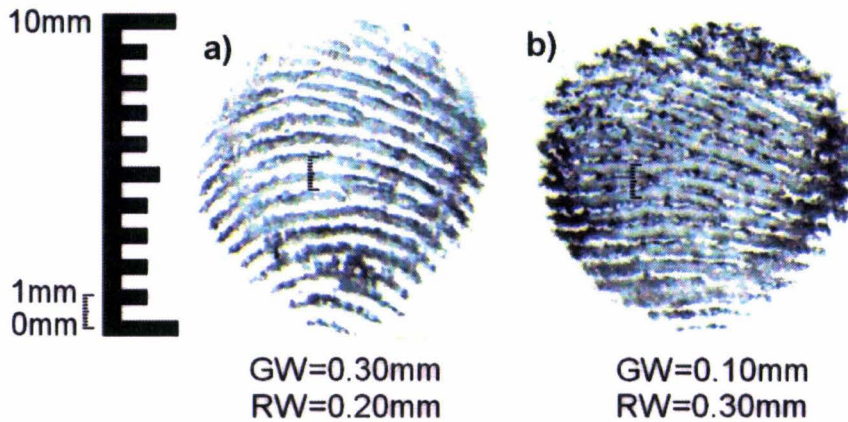


Fig. 4.7 – Mesures de la taille des aspérités du relief de l'empreinte digitale par impression à l'encre - a) contact établi avec une compression de la pulpe dans la direction normale b) contact établi avec un cisaillement dans la direction tangentielle à la surface de la feuille.

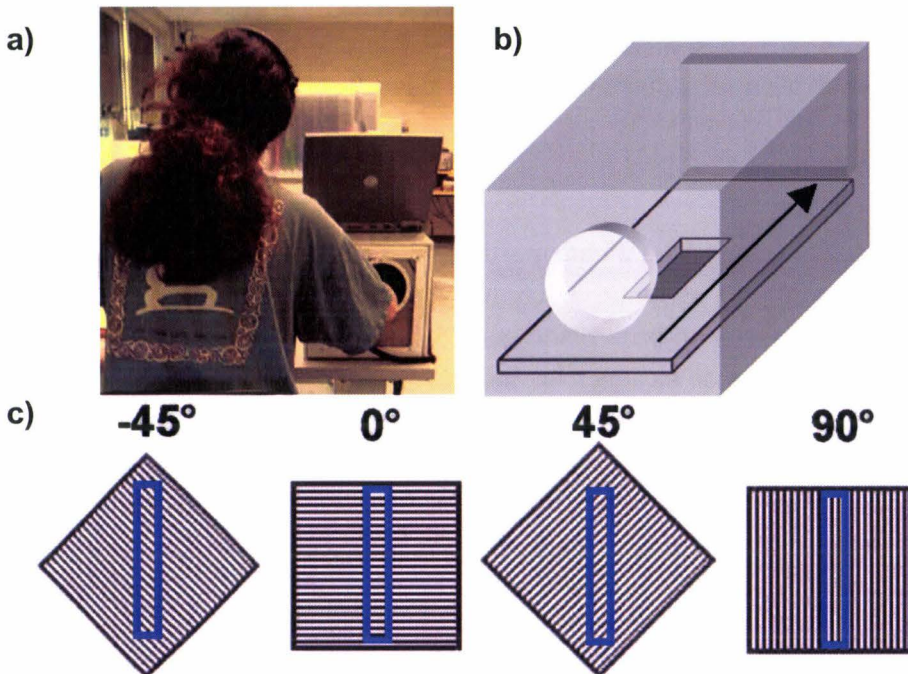


Fig. 4.8 – Mise en place expérimentale. A) Posture du sujet portant un casque audio. B) Schéma de la position des textures dans la boîte et de leur masquage. C) Stimuli apparents en fonction de l'orientation des plaques.

Dans l'expérience, ces textures rainurées sont masquées par une plaque en aluminium avec une fenêtre d'ouverture rectangulaire mesurant 100 par 15 mm afin de contraindre le doigt à un mouvement rectiligne. La tâche du sujet est d'insérer la main horizontalement dans la boîte et d'amener son coude juste devant l'ouverture (cf. figure 4.8a). Ensuite, on lui explique qu'il doit former une ligne droite par un mouvement de recul du doigt pour découvrir la surface présentée

dans l'ouverture rectangulaire (figure 4.8b page 114). On lui demande d'employer une « force légère et une vitesse moyenne ». Cependant, ni la force, ni la vitesse ne sont précisément contrôlées car la constance de ces paramètres ne fait pas partie de l'usage du toucher de texture (voir section 2.4.2 en page 53), en accord avec les études récentes de Lederman et ses collègues [LHKH04]. Tout participant doit essayer de maintenir un angle au contact d'environ 45 degrés entre la texture et sa phalange distale. Nous voulons que les lignes de l'empreinte digitales soient parallèles à celles de la texture quand l'orientation relative entre les deux textures sera de 0 degré. Les quatre échantillons sont présentés dans quatre configurations différentes, avec leurs motifs reposant parallèlement, perpendiculairement ou encore diagonalement par rapport à l'axe du doigt (cf. figure 4.8c de la page 114).

Afin d'améliorer la procédure d'estimation d'intensité, les textures sont d'abord présentées au sujet de manière aléatoire dans toutes les configurations. Les volontaires ne doivent pas attribuer immédiatement une note sur une échelle prédéfinie. Durant cette phase, ils choisissent eux même l'échelle de notation qui leur convient le mieux sur l'ensemble, pour ne pas biaiser le processus d'objectivation des perceptions. On leur demande d'attribuer deux nombres entiers qui correspondent pour eux aux intensités minimales et maximales de la rugosité perçue. Ensuite, pour chaque configuration, les participants doivent frotter leur doigt trois fois contre la surface puis attribuer une note comprise dans les limites de leur échelle. Les textures sont toujours choisies de manière aléatoire parmi celles qui n'ont pas été testées. Il est important de noter qu'aucune définition du mot « rugosité » n'est fournie aux participants même s'ils la demandent.

#### 4.3.2 Résultats : rugosité perçue fonction de la commensurabilité.

La figure 4.9 présente les distributions des estimations moyennes en fonction de l'angle relatif avec lequel a été explorée chaque plaque rainurée.

Pour obtenir une meilleure distribution des scores, les données ont été incrémentées d'une unité et transformées logarithmiquement (base 10). Des analyses de variance entre groupes d'observations (ANOVAs) confirment un effet statistique significatif de l'orientation relative entre les crêtes de textures et celles de l'empreinte digitale pour les échantillons  $\{1, 2, 3, 4\}$ ,  $F(3, 44) = \{35.63, 18.07, 6.25, 25.02\}$ ,  $p = \{0.00, 0.00, 0.01, 0.00\}$ . D'autres ANOVAs, entreprises avec une répartition déséquilibrée, sont calculées avec une somme des carrés de type III pour que les estimations ne soient pas fonction de la fréquence des observations. Elles révèlent des effets possibles de l'orientation relative entre textures sur les notes attribuées entre les cas parallèles et diagonaux pour les échantillons  $\{1,2,3\}$ ,  $F(1, 34) = \{8.68, 36.05, 11.19\}$ ,  $p = \{0.01, 0.00, 0.02\}$ , et entre les observations perpendiculaires et diagonales des échantillons  $\{1, 2, 3, 4\}$ ,  $F(1, 34) = \{68.60, 12.33, 3.45, 64.02\}$ ,  $p = \{0.00, 0.00, 0.07, 0.00\}$ . Aucune différence n'a été remarquée entre les orientations  $-45$  et  $45^\circ$  et ceci pour toutes les textures. Quand les crêtes des textures sont perpendiculaires à celles de l'empreinte, on note très peu de contraste entre les intensités perçues (cf. figure 4.9 page suivante).



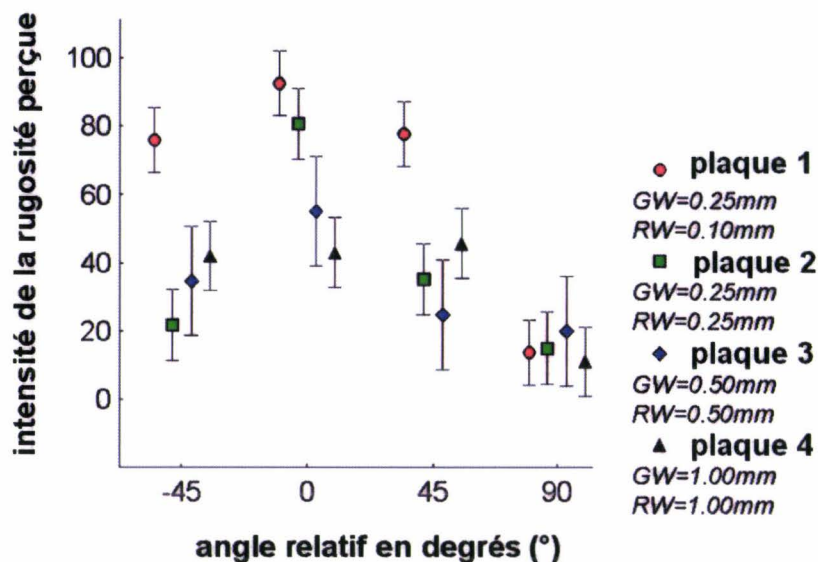


Fig. 4.9 – Intensité de la rugosité perçue fonction de l'angle relatif en degrés et des stimuli présentés.

Ici, plus la texture est fine, plus elle est estimée comme rugueuse dans la direction distale-proximale. Il est aussi intéressant de remarquer les différences frappantes obtenues entre les directions diagonales et perpendiculaires pour la texture la plus fine.

#### 4.3.3 Analyse comparative du résultat par rapport à la littérature

Les résultats témoignent bien d'une meilleure sensibilité tactile dans la direction proximale distale [PJ81a][GC02]. Cependant, nous n'expliquerons pas cette anisotropie par des neurones sélectifs à l'orientation [EKP92][EKP97]. Gibson et Craig prouvent que cet effet n'intervient qu'au niveau de l'extrémité du doigt mais pas de la pulpe [GC05]. Tout comme eux, mais en prolongeant aussi l'approche de Wheat et Goodwin [WG00], nous favorisons plutôt l'hypothèse d'un effet mécanique et considérons que l'effet trouvé traduit l'importance du degré auquel l'empreinte digitale pénètre dans les creux de la texture fine. Ce résultat est à mettre en relation avec les découvertes récentes de Véga-Bermudez et Johnson [VJ04]. Ces chercheurs ont montré que la sensibilité tactile se dégrade avec l'âge car la peau ne peut plus se conformer aux détails spatiaux de la texture, quand elle perd son élasticité. On le voit, la sensation de rugosité maximale est obtenue pour le premier échantillon (GW=0.25 mm, RW=0.10 mm), et ce pour un angle de 0°. Aussi, étant donné un relief d'empreinte de hauteur égale à 100 µm et de périodicité d'environ 0.35 mm [MKY98] (GW=0.10 mm / RW=0.30 mm en situation cisailée, cf. fig. 4.7 p. 114), il semble évident que l'emboîtement se fait dans de meilleures conditions pour la première texture et qu'il donne lieu à un étirement plus important que pour la seconde. Plus les tailles des interdistances s'éloignent de celles du relief de l'empreinte, plus la qualité de l'accrochage d'une crête épidermique diminue. Ainsi, nous suggérons plutôt une perception de la rugosité déterminée par l'emboîtement reposant sur un prérequis de commensurabilité entre textures au contact.

Nos résultats diffèrent fortement d'anciens résultats reportés dans la littérature. Dans les études de Lederman [LT72][Led74][Led83], mais aussi de Connor [Con92] détaillées au premier chapitre dans le paragraphe 1.6.4 page 34, on montre que plus GW augmente, plus la perception de la rugosité augmente avec une petite influence de RW qui tend à diminuer l'effet. Une explication possible, qui pourrait rendre compte des différences observées, est la hauteur des crêtes que nous avons employées. Dans notre expérience, on s'attend en effet à ce que la quantité de peau déformée par rapport à une position de référence au repos, soit la même avec toutes les plaques. En effet l'épaisseur de cuivre de nos crans est très fine (70  $\mu\text{m}$ ). Le caractère lisse des textures employées pourrait contribuer à niveler ou effacer le gradient des macrocoubures de la peau. On le voit, les rugosités perçues étaient similaires quand l'angle relatif entre les surfaces était de 90°. Ceci montre bien une indépendance aux caractéristiques spatiales de la texture employée. Même si les participants ont avoué avoir ressenti des lignes pour la quatrième texture en orientation relative perpendiculaire, ils n'ont pas perçu la texture comme étant rugueuse. Dans cette expérience, pour évaluer la rugosité, les sujets pourraient avoir choisi un autre critère que le relief. Dans les expériences qui suivent, nous allons mettre en oeuvre des mesures vibroacoustiques permettant de conforter nos résultats et explications.

#### **4.4 Situation discriminante : lame cisailée par les crêtes épidermiques**

Dans cette expérience, nous mettons en évidence un cas potentiel d'interaction tribologique entre simples brins, une lame et une crête de l'empreinte digitale. Ceci vise à montrer l'importance du rôle frictionnel de la rainure d'empreinte, issue des forces de cisaillement qu'elle impose, mais aussi subit.

##### **4.4.1 Méthode : étude des relations entre réponse en fréquence et emboîtement**

Pour stimuler la pulpe du doigt, nous touchons une fine lame de cutter. Sa faible largeur et sa forme permettent son emboîtement entre deux crêtes de la rainure d'empreinte. Nous employons un accéléromètre (cf. figure 4.3) pour évaluer le comportement dynamique de la lame ou l'intensité de la force d'inertie qu'elle génère, lorsqu'elle est accélérée par les rainures de l'épiderme. Cette information est plus intéressante que le déplacement car elle est directement reliée à la présence de force au contact (par exemple les forces impulsionnelles issues des chocs entre les corps ou encore de stiction pendant le stick-slip). Les trois voies du capteur sont branchées à un analyseur multivoie Orchestra et les signaux sont analysés grâce au logiciel dBFA32.

À partir de la réponse indicielle de la structure à un choc appliqué par une pointe rigide (les flèches blanches des figures 4.10 et 4.12a de la page suivante indiquent la direction d'application du choc), la réponse du système fonction des fréquences (FRF ou fonction de réponse en fréquence) a d'abord été estimée. En pratique, cette réponse approche la réponse impulsionnelle du système car la durée de l'impact est très courte devant les longueurs d'onde d'intérêt. Cette réponse dépend de la sommation des réponses modales de la structure, elles-mêmes déterminées

par les propriétés matérielles (masse, raideur et amortissement), mais aussi par les conditions aux limites imposées sur l'objet testé. Ce protocole expérimental permet ainsi de localiser les plages de fréquences où le système vibre de manière privilégiée. Comme le montre la figure 4.11, le premier mode de flexion de la lame (plaque) se produit près de 430 Hz.



Fig. 4.10 – Schéma du montage de l'accéléromètre sur la lame immobilisée

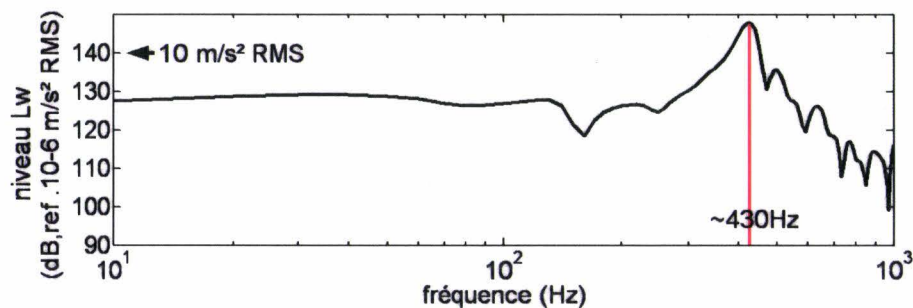


Fig. 4.11 – Réponse du système à un chargement impulsionnel appliqué par une pointe dans la direction de la flèche de la figure 4.10.

Ensuite, nous voulons obtenir une mesure image des forces d'inertie (forces locales de cisaillement) générées par la lame (brin). Ces forces résultent du frottement du doigt en mouvement arrière (forme grise sur la figure 4.12a en page 119) et pressé avec une force d'appui normale très légère. Comme l'indique la figure 4.12, il y a trois configurations. Dans les deux premiers cas, l'extrémité du doigt longe ou traverse orthogonalement la direction de mesure. Ainsi, l'image de gauche (figure 4.12a) montre la position du doigt quand les crêtes épidermiques sont orientées parallèlement. Sur l'image du milieu, l'orientation relative est perpendiculaire. Nous avons voulu étudier une troisième configuration où l'on utilise le côté du doigt pour frotter la lame et ainsi isoler l'influence du relief de l'empreinte (contrôle pour une même orientation relative entre la lame et la direction du mouvement). Cinq sujets ont participé à l'expérience. Cinq séquences de trois "caresses" ont été obtenues. Ainsi nous disposons de quinze échantillons pour chaque condition.

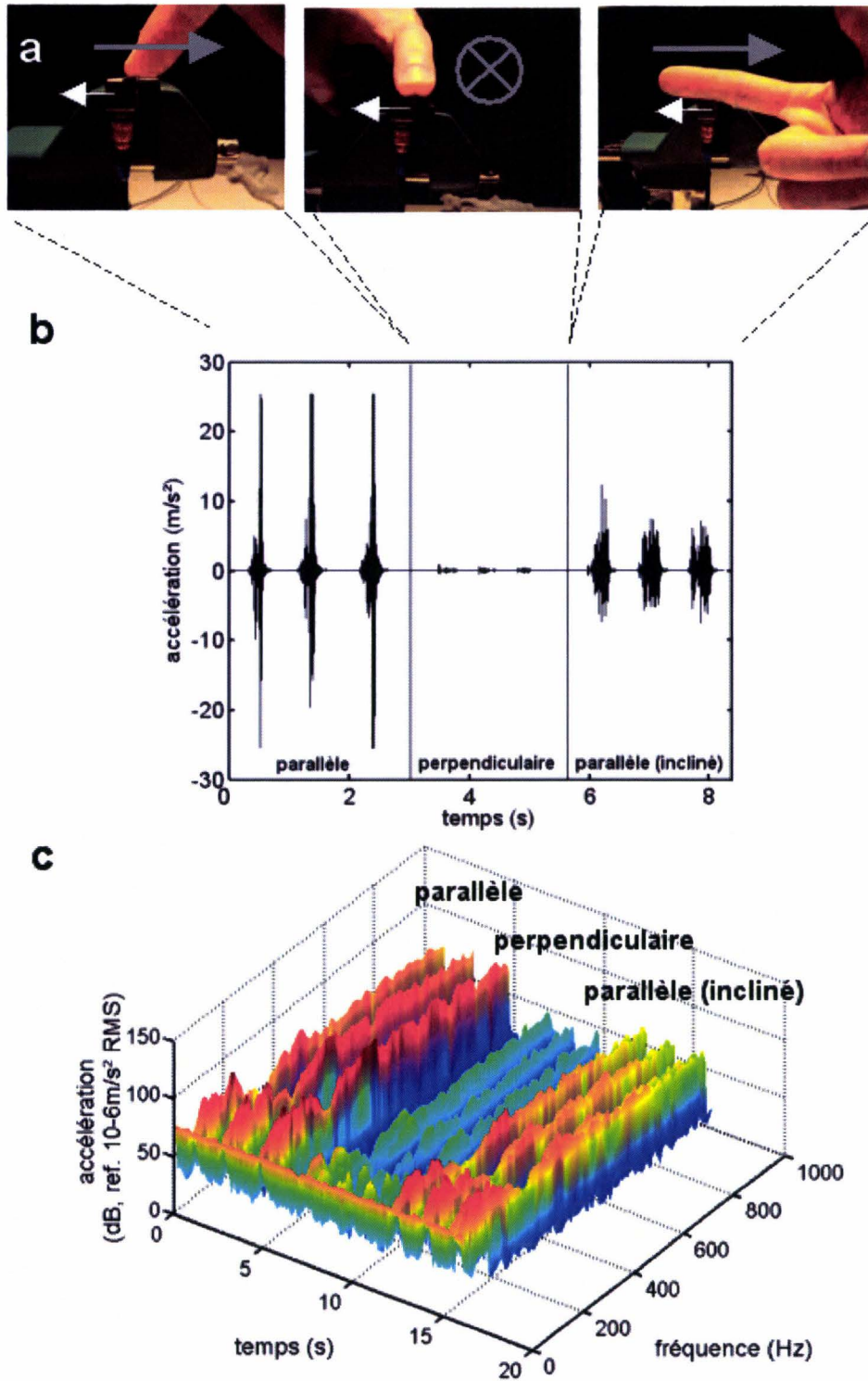


Fig. 4.12 – a) Mouvement dirigé du doigt. b) Exemple de distribution temporelle des accélérations pour une séquence. c) Spectres RMS calculés avec une transformée de Fourier sur instants courts.

#### 4.4.2 Résultat : contribution de l’empreinte à l’émergence du cisaillement.

La figure 4.12b de la page précédente permet de s’apercevoir immédiatement que la vibration transitoire dissipe davantage d’énergie quand les crêtes de l’empreinte digitale peuvent se conformer aux détails de la texture. Cette conclusion peut naturellement être étendue à nos cinq séquences. De manière plus formelle, une fenêtre d’une seconde a été utilisée pour isoler chaque forme de signal, et deux paramètres sont calculés : d’une part la valeur quadratique moyenne (RMS) qui rend compte de l’intensité effective de l’accélération et d’autre part, sa valeur absolue maximale. Les ANOVAs entre groupes d’observations révèlent des différences significatives de ces grandeurs entre les conditions parallèles et perpendiculaires,  $F(1, 28) = \{1182.40, 668.70\}$ ,  $p = \{0.00, 0.00\}$  mais aussi entre la condition parallèle et la condition où le doigt est frotté sur le côté de la phalange proximale  $F(1, 28) = \{231,28, 190.60\}$ ,  $p = \{0.00, 0.00\}$ . Ces différences d’énergie sont illustrées sur la figure 4.13. La plus haute a été trouvée dans la condition parallèle. Dans la condition parallèle inclinée, il y a aussi un frottement important accompagné d’impacts comme le montre la figure 4.12b. Ces chocs sont certainement dus au *sulcus cutis*, motifs glyphiques ou fines rides observées sur la surface de la peau [INN05]. Ces structures sont formées chez l’individu à cause des déformations répétées de la peau. Leur rigidité et leur période spatiale augmentent avec l’âge. Leur relief serait moins prononcé que celui des empreintes digitales, ce qui pourrait expliquer l’intensité moindre des chocs.

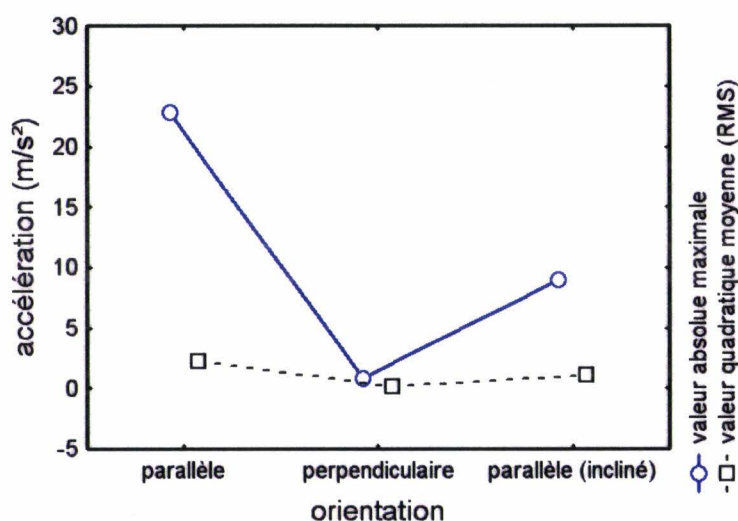


Fig. 4.13 – Moyennes des valeurs absolues maximales et des valeurs quadratiques moyennes de l’accélération (RMS) en fonction de l’orientation relative entre le doigt et la lame.

Pour analyser le contenu fréquentiel des signaux de manière globale (forme de spectre), nous mettons à nouveau à l’épreuve l’approche déterministe de la transformée de Fourier sur des instants courts avec une fenêtre de Hanning. Les spectres sont rafraîchis toutes les 125 ms. De

manière surprenante, la forme du spectre ne change pas de manière significative dans le temps. Aucune fréquence prédominante n'émerge. La puissance fournie à la lame par l'excitation du doigt cause un décalage vertical du spectre. Ceci montre que le système oscille à toutes les fréquences de manière à peu près identique. Si on considère une période spatiale ou longueur d'onde des crêtes épidermiques, d'environ 0.35 mm, et une vitesse de doigt comprise entre 100 et 150 mm.s<sup>-1</sup>, la fréquence d'excitation de l'empreinte est comprise entre 300 et 429 Hz. Par conséquent, les crêtes de la peau sont certainement responsables du relief constaté sur la deuxième partie du spectre et expliquent les composantes "haute-fréquence" de la condition "parallèle". L'origine de la pondération excédentaire à basse fréquence n'est pas encore claire. Pourtant il existe de fortes présomptions sur les résonances à basse fréquence des membres supérieurs. En plus d'un mode résonant mesuré à 80 Hz sur la phalange [CM05], de la transmittance accrue dans cette gamme de fréquences [DWW05b], rappelons que Franke et ses collègues [FGOW51] ont montré que la propagation d'ondes en surface d'une peau velue chargée dynamiquement peut être observée jusqu'à 150 Hz.

#### **4.5 Vibration induite sur la texture à cause de la présence d'un cran**

À présent, intéressons-nous à une expérience intermédiaire visant à vérifier la propagation effective d'ondes mécaniques sur une surface de texture très fine. En nous basant sur l'expérience précédente, nous faisons l'hypothèse que la vibration va dépendre des conditions d'emboîtement entre les deux surfaces où sont respectivement présentes les rainures d'empreinte, et une fine ligne d'épaisseur 100µm. Ceci va nous permettre de montrer expérimentalement que le relief de l'empreinte excite la texture touchée, laquelle dissipe l'énergie qui lui est apportée en vibrant et excite à son tour l'ensemble du doigt par des forces d'inertie.

##### **4.5.1 Protocole expérimental**

L'expérience psychophysique du paragraphe 4.3 (page 113) a révélé que la texture la plus fine causait la perception de rugosité la plus intense. Par conséquent, nous allons analyser la capacité de cette surface à créer des vibrations sous la peau en fonction de l'orientation. Cependant, nous jugeons préférable d'étudier d'abord le cas d'un seul cran, avant d'entreprendre une analyse plus poussée sur des surfaces complexes. C'est la raison pour laquelle, seul un cran (ligne de la plaque 1 de l'expérience en 4.3 p. 113) est gravé sur une plaque de circuit imprimé. Cette forme rectangulaire possède une hauteur de 70 µm, une largeur RW égale à 100 µm.

Avant d'effectuer une quelconque mesure avec le doigt, la fonction de réponse en fréquence de nos plaques est mesurée. Comme le montre la figure 4.14 (p. 122), la structure résonne à environ 400 Hz suite à l'application d'un choc en sa surface. Contrairement à la fonction de réponse en fréquence précédente (fig. 4.11, p. 121), nous obtenons de l'énergie vibratoire 1010 et 1080 Hz.

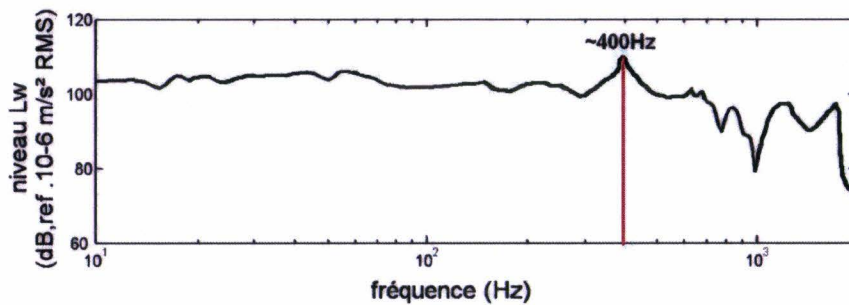


Fig. 4.14 – Réponse du système à un chargement impulsionnel appliqué par une pointe dans la direction de la flèche blanche de la figure 4.15.

Dans l'expérience, le doigt va explorer un cran similaire à ceux qui constituent notre texture la plus fine de deux manières :

- en parcourant la surface lisse et en traversant le cran perpendiculaire à sa trajectoire. Les motifs entre textures des deux surfaces sont alors alignés.
- en étant en permanence au contact de cette ligne une fois posé et en la longeant. Les motifs entre texture des deux surfaces s'opposent au mouvement.

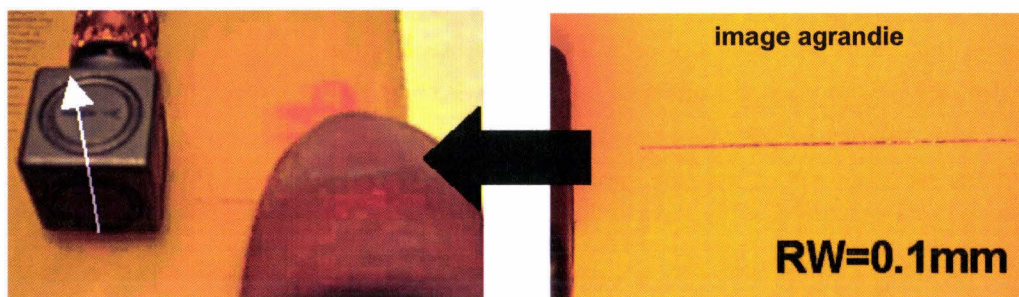


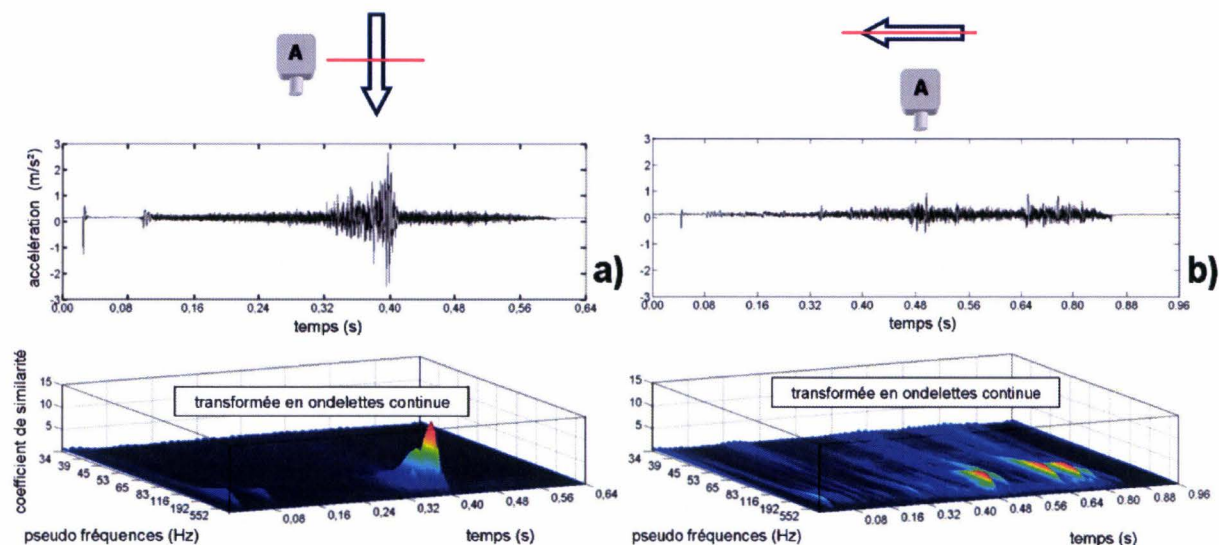
Fig. 4.15 – Mesure vibratoire dans la direction normale durant l'exploration d'une ligne de faible largeur.

Dans les deux cas, l'accéléromètre est collé à 15 mm du point correspondant à la position à mi-parcours. Nous allons principalement étudier la réponse à un événement transitoire qui est le passage du doigt sur une fine ligne de la texture et nous proposons pour cette expérience d'utiliser la transformée en ondelettes continue. Pour des raisons identiques à celles évoquées dans la section 3.4.2 (pp. 84-86), nous préférons l'ondelette de Meyer pour analyser ces signaux. Nous choisissons cette fois une représentation en trois dimensions afin de mieux discriminer les composantes émergentes d'une FRF finalement assez plate.

#### 4.5.2 Résultat : incohérence fréquentielle entre vibration au contact et rugosité fine

La figure 4.16 (page 123) montre les signaux temporels et leur transformée en ondelettes continue associée quand les crêtes de l'empreinte digitale se situent parallèlement a) et perpendiculairement à celles de la texture b).

Les signaux temporels diffèrent en amplitude en fonction de l'orientation relative entre les motifs de texture. La CWT confirme les résultats obtenus précédemment : des impacts se produisent sur la structure pendant le frottement. Ceux-ci apportent de l'énergie au matériau texturé qui la dissipe en accord avec sa fonction de réponse en fréquence. Ce résultat est intéressant car nous aurions pu privilégier l'hypothèse d'une excitation harmonique de la texture plutôt que de forces de cisaillement de nature impulsionnelle. La figure 4.16a montre que le frottement sur la partie lisse du circuit imprimé ne génère pas de vibration significative. Quand le doigt est confronté à vaincre un cran pour continuer à glisser sur la surface, l'interaction entre les aspérités accélère la texture de manière impulsionnelle. Ce phénomène se produit certainement également sur la pulpe du doigt. Ces chargements peuvent expliquer la vibration transitoire à la fréquence de résonance du matériau. Ce type d'événement est rapidement amorti et reste très localisé dans le temps. La figure 4.16b indique quant à elle que des événements isolés se produisent dans la même gamme de fréquences. Cependant la quantité d'énergie dissipée reste très faible. Ici, les scénarios les plus probables pour expliquer cette réponse en fréquence à l'identique sont soit 1/ le manque de précision dans la gravure des crans qui génère des aspérités sur la piste de cuivre ou encore 2/ un stick-slip en l'absence de crans qui contraindrait le doigt à rebondir sur la surface.



**Fig. 4.16 – Distribution temporelle de la valeur instantanée de l'accélération mesurée et transformées continues en ondelettes (CWT) associées.**

Dans cette expérience, la vibration de la texture semblait principalement déterminée par sa fonction de réponse en fréquence. Ceci est évoqué plutôt par des formes d'excitation impulsionnelles que des formes périodiques. Ces chargements, pendant des instants très courts, pourraient résulter de phases d'étirement très localisées se produisant quand la peau doit vaincre une barrière de stiction locale. L'accéléromètre occupait une position distante par rapport à celle du doigt. Cependant, des forces inertielles significatives, en relation avec la pénétration du cran dans l'empreinte, agissaient encore sur lui. Ces forces, certainement plus intense sur l'aire de



contact, pourraient être captées par les mécanorécepteurs et contribuer de manière intensive à la perception de la rugosité. Nous allons maintenant approfondir cette question dans les deux expériences qui suivent pour montrer que les mécanismes spatiaux sont essentiels à la perception.

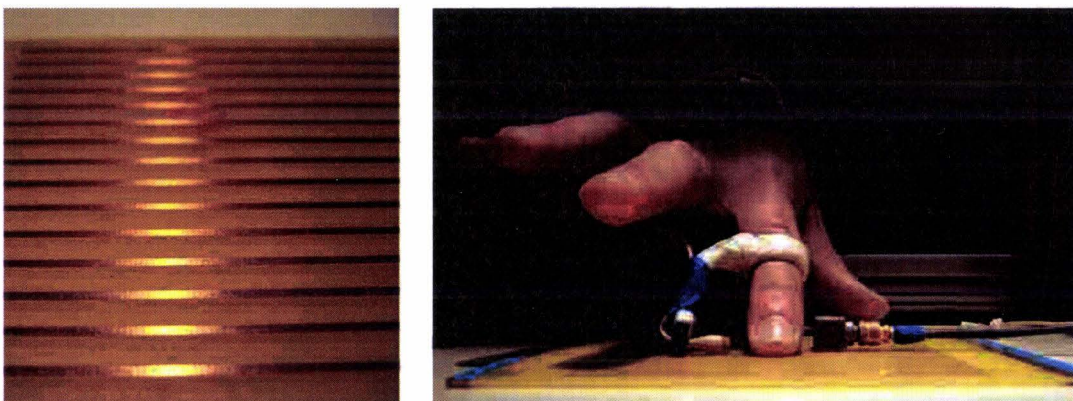
#### **4.6 Cas des textures finement rainurées**

L'effet de l'alignement entre les motifs de l'empreinte et ceux de la texture sur la vibration transmise au matériau est à présent mieux compris. Par conséquent, nous allons effectuer l'analyse avec les stimuli employés dans l'expérience psychophysique qui a motivé cette suite d'essais.

##### **4.6.1 Remarques sur les conditions expérimentales**

L'accéléromètre est toujours attaché à proximité du trajet du doigt (voir la figure 4.15 page 122 et les schémas de la figure 4.16 page 123), mais cette fois sur les plaques 1, 2, 3 et 4. Ici, nous avons aussi fait usage du microphone (figure 4.17). Cependant, puisque nous tirons les mêmes conclusions avec l'accéléromètre, nous ne nous étendrons pas davantage sur cette technique.

On ne s'attend pas à ce que les réponses impulsionnelles entre les plaques diffèrent à cause du motif gravé sur leur surface. Elles ont la même taille, la même masse et les mêmes conditions aux limites. Afin de vérifier la répétabilité de la mesure, nous avons enregistré l'accélération normale à la surface correspondant à trois trajets du bout du doigt dans les conditions 0 et 90° de la première expérience. Les signaux sont analysés en utilisant la Transformée de Fourier à court terme.



**Fig. 4.17 – Détail de plaque rainurée et de la position du doigt par rapport au capteur qui y est attaché.**

##### **4.6.2 Résultat : des phénomènes d'intensité comparable.**

En accord avec les conclusions des deux expériences précédentes (pp. 117-124), l'intensité de la vibration en surface est toujours un peu supérieure quand les crans des deux textures sont

parallèles entre eux et qu'il y a donc interpénétration entre les surfaces. Cependant, le contraste énergétique entre les signaux (comparaison des valeurs RMS de l'accélération sur la figure 4.18) n'est pas très important. Ces grandeurs comparables, ainsi que la nécessité d'une description lisible de la distribution de l'énergie en termes de composantes déterministes, amènent à préférer les spectrogrammes calculés avec des valeurs RMS aux spectres de densité de puissance exprimés en  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-4} \cdot \text{Hz}^{-1}$  qui sont usuellement plus performants pour la caractérisation de signaux aléatoires. La précision fréquentielle est de 3.12 Hz pour une accélération maximale transmise de  $0.007 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  RMS (77dB) parmi les essais (plaque 1 à  $0^\circ$ ). La figure 4.19 page 126 indique une bonne reproductibilité des spectres pour une condition donnée, et ceci en l'absence de contrôle de la vitesse et de la force de l'extrémité du doigt. À l'exception de la plaque 1, pour les premières raisons évoquées à la fin de la dernière expérience (p. 123), nous n'avons pas trouvé de contenu fréquentiel marqué quand le doigt longeait les rainures de la texture.

Pour une vitesse de doigt moyenne de  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , une crête épidermique vue comme un brin devrait subir une collision avec un brin de texture dans la condition  $0^\circ$  à une fréquence de (286, 200, 100 et 50 Hz), étant données les périodes spatiales, sommes des largeurs de crans et creux des plaques 1, 2, 3 et 4. Dans l'ensemble, les spectrogrammes de la figure 4.19 page 126 ne permettent pas de conclure sur des relations systématiques entre une texture donnée dans une orientation particulière et des valeurs de fréquences fondamentales ou de longueur d'onde de texture prédites par des théories fréquentielles ou intensives avec pondération fréquentielle [BH03][HBR98]. Ceci vient supporter une théorie non déterministe, déjà envisagée avec un argument de dynamique posturale de la section 4.1 (pp. 102-110) applicable à une texture grossière : celui de l'influence de l'angle au contact. Signalons toutefois, que la gamme de texture utilisée dans cette expérience est légèrement supérieure en taille d'aspérités par rapport à celle employée par Bensmaïa et Hollins [BH03] où  $0.040 < \text{GW} + \text{RW} < 0.416 \text{ mm}$ .

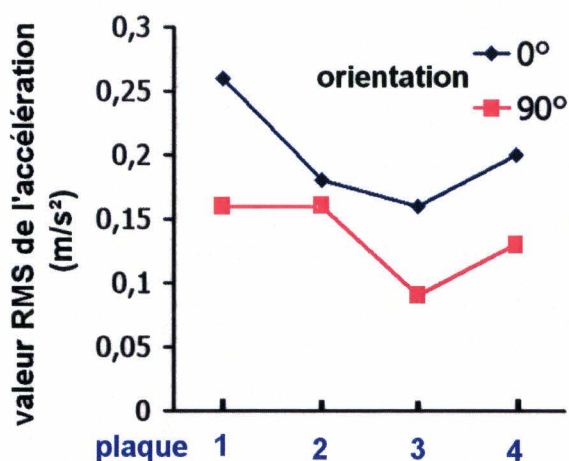


Fig. 4.18 – Valeur quadratique moyenne de l'accélération (RMS) des signaux temporels obtenus pour chaque plaque caressée latéralement parallèlement ( $0^\circ$ ) aux rainures d'empreinte et perpendiculairement ( $90^\circ$ ).

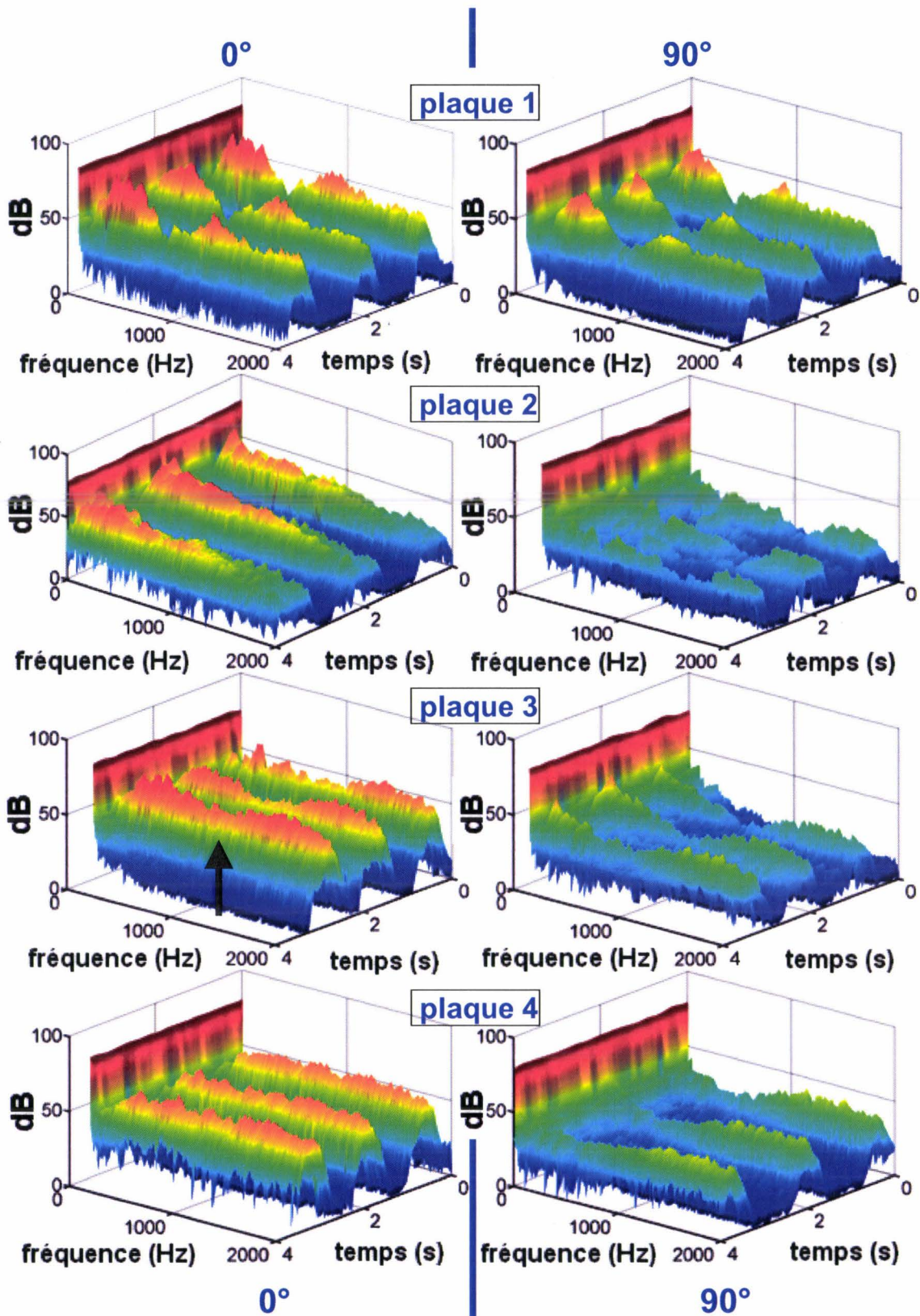


Fig. 4.19 – Transformées de Fourier sur instants courts (TFCT)

Les distributions énergétiques reflètent principalement les fonctions de réponse en fréquence des surfaces. Ceci suggère soit un comportement fortement anharmonique de petites forces d'excitation, soit des comportements impulsifs compatibles avec le stick-slip. La relaxation ne se fait pas avec un mouvement sinusoïdal pur (raie marquée dans les spectres).

Pour identifier plus précisément les occurrences temporelles des événements vibratoires, nous employons la transformée en ondelettes continue sur la troisième texture frottée par le doigt avec une orientation relative de  $0^\circ$  (flèche noire). La figure 4.20, avec ses structures horizontales (composantes périodiques) mixées à des structures verticales (l'énergie augmente à toutes les fréquences pendant un court instant) montre finalement que les événements peuvent être localisés dans le temps à cause du retard entre eux et leur confinement dans certaines échelles.

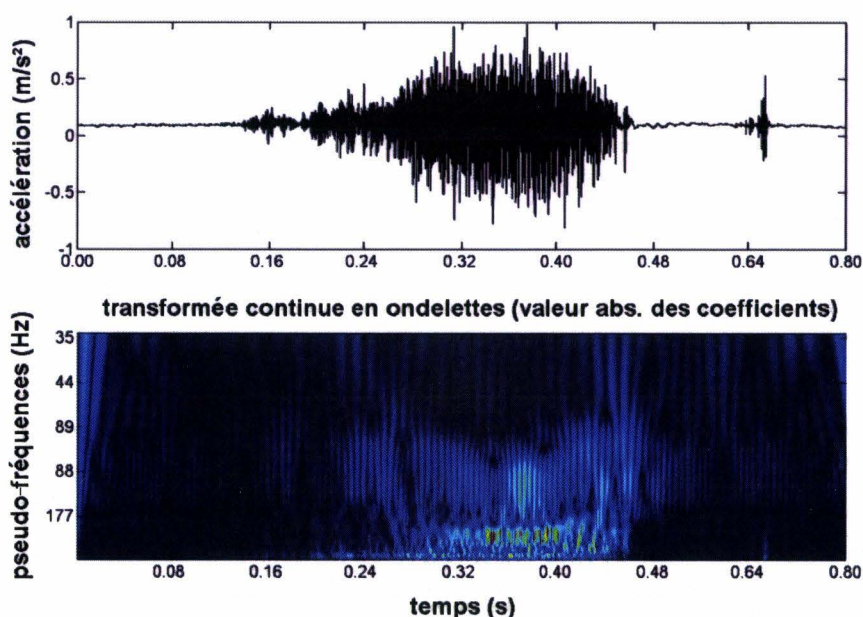


Fig. 4.20 – Distribution temporelle de l'accélération mesurée dans la direction normale pour la plaque 3 dans la condition  $0^\circ$  (flèche blanche sur la figure 4.15 page 122) et transformée continue en ondelette associée.

Une vibration à haute fréquence se produit quand le doigt se met à glisser sur la texture. Cette composante est certainement apportée par les phénomènes de résonance de la plaque de circuit imprimé qui oscille vigoureusement dans la gamme de fréquences (figure 4.14 page 122) juste au-dessus de 1000 Hz. Ensuite quand les brins des textures commencent à s'emboîter en fonction du degré de commensurabilité, le matériau vibre à sa fréquence de résonance à cause de l'excitation des rainures d'empreinte. La plupart de l'énergie est dissipée dans ce mode résonant. Quand le doigt s'approche de l'accéléromètre, la structure impose aussi des forces de faible intensité en relation avec la longueur d'onde de texture (100 Hz).

Ces forces inertielles pourraient déformer le doigt. Quel rôle jouent-elles dans les mécanismes de codage de la rugosité ? Dans cette analyse, la vibration ou l'accélération des plaques a été influencée par leurs caractéristiques rhéologiques, les longueurs d'onde de texture et la

conformité entre les détails spatiaux au contact. Cette dernière expérience fournit une autre preuve de l'importance de l'orientation dynamique sur la dynamique du contact. Cependant, il faut bien admettre que ni l'intensité seule, ni la fréquence vibratoire au contact ne permettent d'expliquer clairement les résultats de l'expérience de la section 4.3 (pp. 113-117).

#### 4.7 Sensations résultant de la suppression des indices spatiaux

L'absence manifeste de corrélations entre les paramètres intensifs et fréquentiels nous a surpris. Cependant, nous avons maintenant l'assurance d'un rôle tribologique important de la rainure d'empreinte et celle-ci nous a finalement conduit à développer un nouveau questionnaire. Lorsque la peau est capable de s'emboîter dans les détails spatiaux de la texture, est-ce que la perception de la rugosité est déterminée par :

*-les forces de cisaillement étirant l'empreinte*

ou encore :

*-la fréquence et/ou l'intensité des forces d'inertie agissant entre les structures accélérées et les déformant ?*

Dans une dernière expérience avec ces textures, nous proposons d'enregistrer et de rejouer leur déplacement lorsqu'elles sont touchées. Pour cela nous allons utiliser le vibromètre LASER Doppler (VLD) et restituer les signaux enregistrés avec un pot vibrant électromagnétique à 1 degré de liberté. Cet actionneur va permettre de faire l'expérience d'indices intensifs et temporels en relation avec le retour d'effort dynamique de la texture sans information spatiale.

##### 4.7.1 Enregistrement unidimensionnel des déplacements de surfaces et restitution

Dans cette expérience, un déplacement identique à celui d'une plaque rainurée qui a été déformée par le frottement de la peau humaine est imposé sur une plaque en aluminium. Le déplacement est mesuré en utilisant notre vibromètre dont le décodeur de déplacement a une précision de 14 bits. Même si les vibrations génèrent souvent de fortes amplitudes de déplacement aux basses vitesses, qui masquent les plus petites à cause de la gamme dynamique limitée des convertisseurs, la raideur de notre surface est suffisante pour éviter une mesure en vitesse (seulement limitée par le bruit de fond). Le faisceau est orienté vers la position de l'accéléromètre choisie dans l'expérience précédente comme le suggère la figure 4.21a page 129.

L'index est frotté trois fois sur chacune des plaques rainurées dans les deux conditions, 0 et 90° comme dans l'expérience de la section 4.6 (cf. p. 124). Les signaux sont ensuite rejoués avec Matlab en utilisant la fonction *wavplay()*, qui permet de restituer un son avec une précision de 16 bits à partir de données vectorielles. Un pot vibrant LMS V408 (force sinusoïdale, crête de 98.0N et vitesse sinusoïdale crête de 1.78 m.s<sup>-1</sup>) alimenté par un amplificateur PA100E-CE (distorsion harmonique < 0.5%) fournit le retour tactile. La raideur axiale de l'effecteur est de 12.3 N. mm<sup>-1</sup>. L'amplitude de la vibration pendant la restitution est contrôlée par le vibromètre comme le montre la figure 4.21b de la page qui suit. Une plaque rectangulaire épaisse (10 mm) faite d'aluminium est attachée au pot vibrant. En bougeant le doigt sur le dessus ou sur le côté, cinq

participants ont évalué les stimuli. On leur a ensuite demandé de décrire leur sensation ou perception.

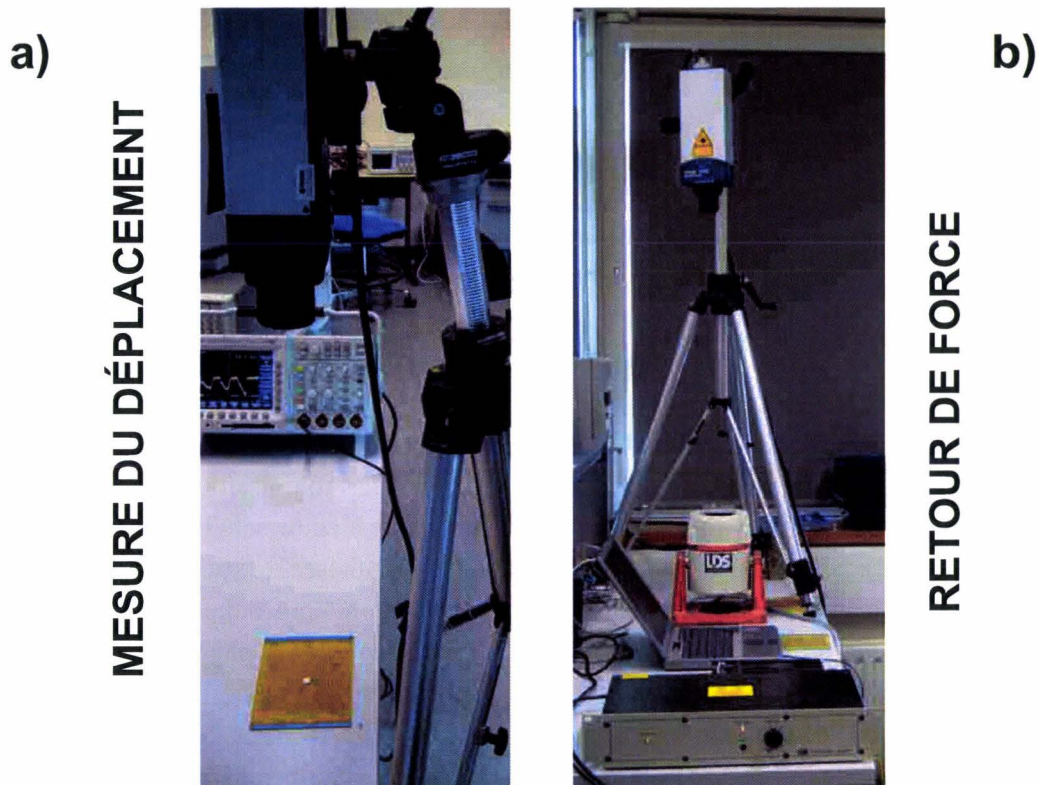


Fig. 4.21 – Enregistrement du déplacement de la surface au vibromètre et restitution sur un pot vibrant.

#### 4.7.2 Résultat : importance du gradient spatial des forces

Quand la vibration est rendue contre la pulpe du doigt avec la même amplitude qu’au point de mesure, aucun des sujets n’est capable de la percevoir. Une explication possible est la faible amplitude des déplacements (environ 2 à 3  $\mu\text{m}$ ) : l’énergie mécanique se dissipe durant la propagation dans le matériau. Quand le déplacement est amplifié par un facteur égal à 5, les participants commencent à ressentir une palpitation sans aucune consistance avec une perception de texture crantée ou de rugosité. Ce manque de tangibilité des stimuli se produit même quand les forces cisailent l’ensemble de la pulpe, pour un doigt en contact avec le côté de l’assiette. Ceci suggère que d’autres indices, que ceux qui sont exclusivement liés à une information intensive ou fréquentielle pourraient être essentiels à la perception de texture, même fine.

### 4.8 Résumé des observations expérimentales et conclusion du chapitre

L’objectif de ce chapitre était de trouver un meilleur argument que la complexité des vibrations résultant du frottement pour rejeter des formes déterministes de code de la rugosité. Nous

proposons que le mouvement anime un processus de perception de la rugosité aléatoire, mais stationnaire, régi par un déterminant spatial, la commensurabilité. Une recherche d'emboîtement de la texture de la peau dans la texture par un geste de badigeonnage du doigt pour percevoir une intensité maximale dans la sensation nous paraît être la meilleure explication compte tenu des résultats de nos expériences. Pour arriver à ce résultat, il nous fallait montrer :

*-La présence d'un contenu vibratoire transitoire sur la peau déterminé par la rhéologie des corps en interaction, fortement dépendant de l'empreinte et à caractère aléatoire du fait de la tribologie du contact.*

*-L'importance de la commensurabilité entre les détails fins du doigt et de la texture.*

*-La présence de forces localisées sur la rainure épidermique*

*-L'importance des indices spatiaux*

Notre première expérience (section 4.1 page 102) nous a permis de valider l'importance du relief de la crête d'empreinte dans la perception de la texture fine, et ce en accord avec les résultats de Srinivasan, Lamotte, Whitehouse [SLW86]. Ceci confirme leur rôle frictionnel et tactile chez l'homme et le primate [Mar90]. Il est important de s'intéresser à cette échelle d'un point de vue biomécanique [WH06a]. Nos résultats supportent aussi les hypothèses de stick-slip de rainures de l'empreinte formulées par Levesque et Hayward [LH03] par une approche plus spatiale. Cette prise de conscience de l'importance des rainures sur la peau (section 4.2 page 111) nous a permis de nous focaliser sur l'importance de la commensurabilité dont la recherche motiverait, chez l'homme, le mouvement d'exploration du toucher latéral. Les résultats de notre expérience psychophysique (section 4.3 page 113) ont confirmé que la plus haute sensibilité à la rugosité de plaques rainurées se situait dans la direction proximale-distale du doigt. Ceci a clairement indiqué une relation entre l'orientation relative des crans de la peau et de la texture, et la perception de la rugosité. L'angle détermine le jugement, sauf avec la texture de plus large période spatiale. De manière générale, plus les rainures épidermiques étaient alignées avec celles de la texture et plus elles pénétraient la texture, plus les surfaces étaient estimées comme rugueuses. Aucune différence perceptive n'est trouvée en conditions diagonales. Ceci peut s'expliquer par des conditions d'emboîtement similaires compte tenu de la forme périphérique de l'empreinte. Cependant le fait que les sujets considèrent la texture la plus fine comme étant la plus rugueuse n'était pas encore expliqué. Une tendance ascendante dans l'évaluation de la rugosité est toujours reportée dans la littérature et nous avons trouvé l'opposé. Compte tenu des résultats de Lederman [LT72][Led74], nous favorisons plutôt l'hypothèse suivante : la faible hauteur des crans empêcherait la peau de pénétrer dans les creux en surface, et inhiberait un effet GW. Seul un effet RW, lié à la largeur des crans prédominerait. Parallèlement, il est important de noter que cette tendance supporte toujours une théorie temporelle ou fréquentielle de la perception de la rugosité comme on peut s'en apercevoir dans l'étude de Connor et Johnson [CJ92] (voir la section 1.6.3, page 32). Aussi, nous avons décidé, comme Bensmaïa et Hollins [BH03], de procéder à des expériences vibroacoustiques car nous pensions au final aboutir à des corrélations très significatives entre la puissance de la vibration, pondérée au besoin par un filtre passe-bande

(sensibilité du canal pacinien) et la perception de la rugosité. Contrairement à ces auteurs, nous avons considéré deux textures au contact. Nous avons tout particulièrement analysé l'influence de la commensurabilité et de la conformation entre les détails spatiaux des deux textures sur la vibration de surface non négligeable au contact. Les crêtes de la peau créent de la vibration sur la texture vue comme un premier résonateur, déclenchant un retour de forces inertielles sur la pulpe du doigt vue comme un deuxième résonateur. Ces hypothèses ont été validées par l'expérience proposée en section 4.4 en page 117, où l'analyse temporelle et l'analyse temps-fréquence ont révélé des différences d'intensité d'énergie dépendantes de l'orientation relative entre une lame en vibration à cause du cisaillement et les structures topographiques de la peau. Les différences d'énergie fournie à cause de la conformité on fait changer la hauteur du spectre mais pas sa forme. Dans la configuration mise en oeuvre dans la section 4.5 (page 121), où la rainure de texture fine est employée, nous avons obtenu les mêmes conclusions : la transformée en ondelettes continue n'a pas révélé de changement d'échelle de la vibration transitoire générée sur la surface. Par ailleurs, l'expérience de la section 4.6 (page 124) nous a en plus convaincu de l'absence de relations entre intensité de la vibration et perception : avec les plaques, ni les changements en fréquence, ni en intensité de la vibration transmise globalement au doigt ne sont suffisamment prononcés pour permettre l'explication des jugements des sujets. Nous avons enfin enregistré (4.7) et rejoué la vibration de surface pour isoler son retour haptique. De manière cohérente avec les observations précédentes et prédictions, les sujets n'ont ni ressenti la moindre présence de rugosité ou frottement de texture fine en cas de chargement dans la direction normale de l'ensemble de la pulpe, ni en cas de cisaillement. Ici, il semblerait que l'absence d'information spatiale ou de stratégie spatiale dans la stimulation fasse défaut à une perception de ligne ou d'aspérité. La sensation de palpitation éprouvée par les sujets, quand les signaux étaient amplifiés pour cisailer l'ensemble de la pulpe, paraît à la fois inconsistante et insuffisante.

Le rôle du mouvement volontaire sur la texture fine et les déterminants psychophysiques de la perception sont sujets à débats depuis plus de 30 ans. Même si Lederman et ses collègues ont fourni des preuves solides montrant que la rugosité ne pouvait être encodée ni en fréquence [Led83] ou en intensité de la vibration [LLDW82], la dynamique du contact et les tailles spatiales réduites ont convaincu la plupart des chercheurs d'une perception dépendante des aspects temporels. Bensmaïa and Hollins ont d'ailleurs démontré que la puissance de la vibration augmente pour des textures très fines de période spatiale comprise entre 40 et 416  $\mu\text{m}$  [BH03]. De plus, elle est fortement corrélée à la perception de la rugosité lorsqu'elle est pondérée par la sensibilité du système pacinien. Ils ont aussi confirmé récemment avec des expériences psychophysiques que ce canal était capable de transmettre l'information d'une forme d'onde [BHY05]. Les résultats de notre travail ne supportent pas une théorie de la perception de la rugosité basée seulement sur de tels mécanismes. Sur l'ensemble de notre travail, la perception de la rugosité dépendait de la commensurabilité et de l'emboîtement entre les détails de surfaces de la peau (section 4.3, pp. 113-117). L'interaction tribologique au contact générerait alors des forces de cisaillement localisées ou imposées sur les crêtes de l'empreinte digitale (section 4.4, pp. 117-121). Qui plus est, la dynamique du contact a suggéré une forte incompatibilité avec un



code vibratoire unidimensionnel fiable (section 4.5, pp. 121-124) : une absence de contraste en intensité ou fréquence a été trouvée entre les spectres (expériences des sections 4.5 et 4.6, pp. 121-128) et ce, en dépit des différences significatives de perception. La puissance de la vibration transmise aux membres dépend de bien d'autres facteurs que l'état de surface. Gamzu et Ahissar [GA01] ont montré que les performances de discrimination étaient altérées sans les indices temporels quand le mouvement était absent. Cependant il est aussi possible que la qualité de l'information spatiale périphérique permise par le cisaillement ait été aussi indisponible à cause de l'absence d'accrochage entre aspérités. Leurs sujets étaient non seulement privés de mouvement, mais aussi de cisaillement stratégique sur la peau. Smith et ses collègues [SCDL02] ont suggéré que la variation de la force tangentielle importe réellement. Les stimuli envoyés sur notre pot vibrant (expérience 4.7, pp. 128-129) causent une variation temporelle de la force tangentielle appliquée sur la peau. Pourtant, ils ne donnent pas accès à la sensation de picotement localisé du frottement qui s'accompagne usuellement d'une élévation en température. Comme nous l'avons illustré à la fin du chapitre 3 (figure 3.17, p. 91), si un rouleau de scotch est caressé par le doigt sur sa partie adhésive, les phénomènes d'adhérence-glisserment entre les surfaces (en accord avec le motif discontinu constaté sur le ruban) sont une preuve évidente des variations temporelles des forces tangentielles au contact, et le son confirme la vibration des matériaux déclenchée par les fractures d'adhérence. Cependant il n'y a pas de rugosité perçue à cause de l'absence de forces de cisaillement spatialement localisée contre la rainure d'empreinte.

La conclusion principale qui peut être tirée de ce travail est l'importance de l'emboîtement spatial entre surfaces commensurables au contact lors de l'exploration. Les contraintes de cisaillement très localisées dues à l'interaction entre aspérités commensurables avec le relief de l'empreinte digitale permettent de percevoir intensément la microtexture. Ce facteur a conduit, dans les expériences, à des jugements de rugosité basés d'un point de vue physique sur un frottement sous la pulpe et d'un point de vue subjectif sur une difficulté d'exploration et peut être aussi un caractère déplaisant. Cette découverte montre que l'action du toucher latéral n'est pas seulement dirigée par le bénéfice d'un élargissement spatial du champs récepteur ou encore d'une meilleure sensibilité somesthésique. Quant aux forces de réaction de nature inertielle que s'imposent les structures au contact, elles dépendent de nombreux paramètres comme la rhéologie des corps en interaction, et ne sont pas vraiment caractéristiques de la rugosité de la texture haptique. Toutefois, elles sont pourtant bien présentes au contact et il serait intéressant d'étudier en quoi elles améliorent ou dégradent l'exploration de la propriété de rugosité.

D'un point de vue neurophysiologique, les cellules de Merkel et les corpuscules de Meissner semblent être les plus adaptés à la transduction des forces de cisaillement superficielles localisées [PSR02]. D'un point de vue mécanique, leur position dans le doigt par rapport aux crêtes épidermiques et dermiques font de ces mécanorécepteurs les meilleurs candidats pour réagir aux contraintes imposées en surface d'autant plus que les dematoglyphes de la peau peuvent concentrer les contraintes dynamiques [MKY98]. Les expériences ont suggéré que les crêtes épidermiques participent au processus d'accrochage de la peau. Ces structures pourraient jouer un

rôle de fenêtre pour apporter du contraste à l'information spatiale. Si l'on exclut cette différence dans les procédés de filtrage/amplification, nous concluons, tout comme Yoshioka et ses associés [YGDS01] que des mécanismes identiques régissent la perception de la rugosité de textures fines et grossières. Il est important ici de rappeler que nos recherches sont tout à fait en accord avec leurs résultats neurophysiologiques. Ces chercheurs avaient trouvé que dans la transition de la texture grossière à la texture fine, la variation spatiale de la réponse des fibres à adaptation lente devient majoritairement dépendante de la fluctuation stochastique au détriment de la variation spatiale dans la partie déterministe de la réponse.

Cependant, la question de la contribution du système SAI aux résultats de l'expérience psychophysique de ce chapitre (section 4.3.1, pp. 113-117) doit être considérée avec précaution. En réalité, nos résultats peuvent être interprétés de deux manières : soit la crête épidermique a vraiment aidé à augmenter le gradient spatial du champ de contraintes de cisaillement lors de fort emboîtement, soit le canal à adaptation rapide RA, non saturé a interféré [BCJ06a][BCJ06b] avec le précédent (sensation de palpitation sur le pot vibrant). Les décharges dans le canal RA auraient pu augmenter en intensité avec la décroissance de la longueur d'onde des plaques rainurées et il est aussi possible que les réponses du système SAI aient été moins importantes à cause de la faible hauteur de nos crans (70  $\mu\text{m}$ ). Cette deuxième explication nous paraît toutefois peu probable à cause des forces d'excitation non périodiques sur les structures et de leur vibration transitoire.

Au final de ce chapitre, la variabilité du mouvement dirigée, répercutée sur la tribologie au contact, nous amène à proposer une **théorie de la perception de la rugosité basée sur des processus spatiaux intervenant à plusieurs échelles et à évolution stochastique** : le geste permet la réalisation (sens statistique) de corrélations spatiales significatives entre reliefs de textures dès lors qu'ils sont commensurables.

Dans la partie qui va suivre, nous allons mettre à l'épreuve notre proposition avec le descripteur rugueux d'un outil reconnu d'analyse sensorielle : le SENSOTACT<sup>®</sup>. Ce travail constitue un challenge particulièrement intéressant. La plupart des études en psychophysique ont été effectuées avec des surfaces rainurées ou du papier de verre, calibrées à l'avance. Ceci a pu favoriser l'émergence de théories intensives ou fréquentielles. La confrontation à des textures industrielles, c'est à dire suffisamment élaborées pour aider à donner une consistance ou une dimension esthétique aux matériaux qui la revêtent, nous permettra peut être d'aller plus loin dans notre raisonnement. Ainsi, nous pourrions peut être préciser les limites de notre point de vue par rapport à une étude reposant sur la pénétration de la peau, et non pas l'emboîtement de l'empreinte. De plus l'outil SENSOTACT<sup>®</sup> est particulièrement intéressant car il va nous permettre d'aborder ce problème avec des textures préanalysées tribologiquement et sensoriellement. Ceci nous permettra alors de proposer une discussion psychophysique beaucoup plus riche grâce au bénéfice d'une caractérisation existante de ces textures.

## Chapitre 5

### Dynamique stochastique du toucher latéral : cas du Sensotact®

#### Sommaire

---

<b>5.1 Nature stochastique des mécanismes.....</b>	<b>135</b>
5.1.1 Peau considérée comme un système complexe.....	135
5.1.2 Caractère stochastique du frottement.....	136
5.1.3 Cas du mouvement dirigé.....	136
5.1.4 Conséquences sur les méthodes d'évaluation.....	137
<b>5.2 SENSOTACT® et descripteur « râpeux ».....</b>	<b>137</b>
5.2.1 Présentation générale de l'outil d'analyse sensorielle.....	137
5.2.2 Spécificités du descripteur « râpeux » et motivations pour son utilisation.....	138
5.2.3 Caractérisation des échantillons au profilomètre avant l'expérience.....	139
<b>5.3 Description statistique et multiéchelle des bruits du toucher.....</b>	<b>141</b>
5.3.1 Sujets.....	141
5.3.2 Méthode d'utilisation de l'équipement expérimental.....	141
5.3.3 Recueil des données et traitement.....	143
5.3.4 Analyse continue des transitoires à plusieurs échelles.....	143
5.3.5 Évolution de l'intensité sonore en fonction des notes.....	146
5.3.6 Transformée en ondelettes discrète.....	146
<b>5.4 Interprétation des résultats.....</b>	<b>148</b>
5.4.1 Pertinence d'agrégation des niveaux de détail .....	148
5.4.2 Interprétation des phénomènes au contact et de leur perception associée.....	149
5.4.3 Étude des corrélations.....	151
<b>5.5 Bilan de l'étude sur SENSOTACT®.....</b>	<b>153</b>

---

Au chapitre 2, nous avons mis en évidence un déplacement aléatoire du doigt. Ce résultat, mis en perspective avec l'analyse des chapitres 3 et 4 nous ont permis de comprendre que l'emboîtement superficiel, processus dynamique stochastique à cause du caractère non reproductible des situations de commensurabilité, détermine la perception de la rugosité de texture fine. Il est possible que la procédure exploratoire ait simplement pour but de maximiser les chances d'accrochage entre structures sans aucune ambition de participation à des mécanismes d'émergence de stimuli à caractère déterministes, comme des forces tangentielles à variation temporelle contrôlée [SCDL02] ou encore des vibrations continues [HBR98][BH03].

Dans ce chapitre, nous allons expliquer en premier lieu les subtilités d'un toucher latéral vu comme processus stochastique. Ce cadre de référence permettra de mieux comprendre notre intérêt pour le descripteur « râpeux » du SENSOTACT<sup>®</sup>, qui se résume principalement à une conception reposant sur un critère d'intensité de pénétration de la peau dans la texture, indépendant de considérations déterministes. En utilisant le microphone et des techniques de traitement du signal adaptées à l'analyse statistique de signaux aléatoires, nous allons essayer d'expliquer en quoi le mouvement peut contribuer à une meilleure perception des échantillons du SENSOTACT<sup>®</sup>, sous réserves que l'on puisse les considérer comme textures fines et ceci nous aidera à préciser les limites de notre contribution.

## **5.1 Nature stochastique des mécanismes**

Nous avons expliqué que l'exploration de la texture suivait un processus stochastique. Il ne faut pas comprendre par-là que les indices sont recueillis suite à des augmentations de valeurs de probabilité uniforme, sans aucune corrélation temporelle ni spatiale. Un phénomène aléatoire peut posséder une structure temporelle très organisée et des phénomènes de cohérence à longue portée. Ici la nature stochastique du phénomène et le caractère aléatoire de l'évolution se montre par le fait que la répétition de l'expérience conduit à une autre séquence temporelle. Nous allons immédiatement en voir les raisons.

### **5.1.1 Peau considérée comme un système complexe**

Avant d'aborder cette expérience de validation, rappelons nos interrogations, au chapitre 3 (section 3.5.2, p. 92) sur le choix d'un nombre de degrés de liberté pour décrire les structures en présence. Un système naturel comme la peau possède certainement un très grand nombre de degrés de liberté déterministes au niveau microscopique. Pour être plus explicite, on peut toujours, un utilisant un modèle mécanique simple comme celui de Maxwell-Kelvin exprimer la distribution temporelle de la force appliquée en un point en fonction de la déformation ou la distribution temporelle de la déformation en fonction de la force.

Nos expériences ont suggéré jusqu'ici une participation des crêtes épidermiques aux mécanismes vibratoires sur la peau. Ceci induit ainsi un comportement collectif observé à plus grande échelle plus riche que le comportement des éléments qui le composent, encore appelé

comportement *complexe*. Cette complexité ou absence d'évidence d'un déterminant phénoménologique de la perception de la rugosité ne suffit pas à rejeter un comportement déterministe en termes de modèles. Comme, le souligne Annick Lesne [Les04], il est toujours possible d'introduire des modèles stochastiques et déterministes pour décrire l'évolution d'un même phénomène et de relier leurs variables et paramètres respectifs. De fait, ce questionnement est un faux problème. La seule chose qui importe vraiment, en termes de modèles, est de dégager les *différentes échelles caractéristiques* d'un phénomène, avant d'aborder sa modélisation.

### 5.1.2 Caractère stochastique du frottement

Nous avons vu que la complexité de la rhéologie des tissus et du comportement dynamique de ses structures pourrait favoriser les approches stochastiques. Qu'en est-il du frottement ? Dans un état de l'art sur sa modélisation pour la simulation des systèmes dynamiques, Berger [Ber02] le présente comme un processus intrinsèquement stochastique. Cette nature vient de l'existence de phénomènes mécaniques large bande, modélisés d'ailleurs souvent comme un bruit fractal [ASR05], émergeant de vibrations de résonance. Cependant, la complexité d'ensemble du phénomène, trop élevée pour un observateur incapable de modélisation déterministe adéquate à petite échelle contribue, à tort, à faire croire à des interactions superficielles aléatoires.

### 5.1.3 Cas du mouvement dirigé

Peut-on modéliser de manière déterministe les mouvements du toucher latéral en réponse à un objectif de connaissance ? Nous n'avons pas trouvé de référence présentant de tels modèles de contrôle dans la littérature. Aussi, nous nous sommes intéressés aux travaux menés dans les tâches de pointage. Ceux-ci font état d'une grande variabilité des sous-mouvements par rapport aux trajectoires principales généralement constatées, ainsi que de variations d'amplitude et de vitesse. Cette nature stochastique du sous-mouvement [Mah94] s'explique de deux manières : soit par une réponse bruitée du système sensoriel et/ou moteur (cf. fig. 1.1, p. 7). Dans notre cas, ce bruit intrinsèque au système sensorimoteur devrait déjà contribuer à imposer une *nature* stochastique aux stimuli sur la pulpe.

Au-delà de cet argument, des trajectoires très variables et caractéristiques du macromouvement très variables ont été mises en évidence au chapitre 2. Or, on sait à présent que les corrélations spatiales entre aspérités déterminent la perception de la rugosité. Il est donc évident que ces situations de commensurabilité, propices à l'emboîtement surviennent de manière aléatoire. Il est aussi nécessaire de préciser que cette réflexion repose surtout sur le micromouvement puisque, l'emploi de textures lisses au chapitre 2 ne nous permet pas de savoir si le mouvement est :

- complètement aléatoire : le mouvement dirigé de badigeonnage permet un contrôle où les chances d'établissement de corrélations entre textures sont uniformisées.

- pseudo-aléatoire : le mouvement dirigé est décomposable en un sous-mouvement de badigeonnage aléatoire et un macromouvement au service d'une optimisation de l'intensité de la

sensation qui va restreindre l'exploration des situations de commensurabilité aux plus probables, et ainsi avoir une nature déterministe.

Nous venons d'expliquer que le caractère stochastique de la procédure exploratoire impose des entrées sensorielles du même type au système cognitif : tant les recherches neurologiques de l'équipe de Yoshioka [YGDS01] que nos mesures vibroacoustiques indiquent déjà ce comportement dynamique.

#### 5.1.4 Conséquences sur les méthodes d'évaluation

Compte tenu de la nature stochastique du phénomène tribologique, l'approche des deux précédents chapitres (chap. 3 et 4, pp. 63-133) paraît à présent bien restrictive. On le voit, elle impose des transitions de nature déterministe par l'organisation spatiale périodique des textures, le contrôle de la force et de la vitesse à des mécanismes aléatoires dans l'usage. C'est la raison pour laquelle nous allons employer des stimuli plus appropriés, les textures du SENSOTACT®, qui sont partiellement stochastiques. Nous utiliserons aussi la transformée en ondelettes discrète. Cet outil de traitement du signal va nous permettre de conserver le sens issu d'une analyse à plusieurs échelles, tout en permettant une lecture statistique simple de l'énergie qui y est contenue. Ainsi, notre objectif est de montrer en quoi un code stochastique peut constituer une entrée sensorielle fiable à la perception de la texture fine.

Avant de présenter une nouvelle expérience basée sur ces méthodes d'évaluation, nous allons tout d'abord décrire l'outil utilisé, le SENSOTACT® et son descripteur de la rugosité.

## 5.2 SENSOTACT® et descripteur râpeux

### 5.2.1 Présentation générale de l'outil d'analyse sensorielle

Le SENSOTACT® (figure 5.1) est un référentiel tactile présenté sous forme de valise. Il est subdivisé en trois sous-catégories qui sont les aspects primaires du sens du toucher : le toucher orthogonal (vert), tangentiel (bleu) et thermique (rouge). Il est largement utilisé dans l'industrie pour communiquer sur les perceptions tactiles, contrôler ou encore prévoir les attentes haptiques des consommateurs. Il permet de classifier les matériaux selon des bases de données tactiles, d'établir des cartographies des préférences ou encore de générer des identités tactiles. Les notes sont attribuées par un panel expert (ISO 11035) et les textures sont caractérisées instrumentalement [Cro04a][Cro04b].



Fig. 5.1 – SENSOTACT®

Les descripteurs du toucher latéral sont appelés “depth”, “roughness”, “braking”, “slippery” et “fibrous” pour profondeur, rugosité, blocage, glissant et fibreux. Dans cette étude nous nous intéressons au descripteur rugueux appelé « râpeux ».

### 5.2.2 Spécificités du descripteur « râpeux » et motivations pour son utilisation

Le descripteur « râpeux » (figure 5.2) est composé de cinq échantillons dont les topographies de surface reflètent davantage celles des textures de la vie quotidienne que celle étudiée jusqu’à présent avec des crans. Il présente plusieurs structures de surfaces, soit déterministes (0-15-100), soit aléatoires (40-75) à l’échelle de l’échantillon.

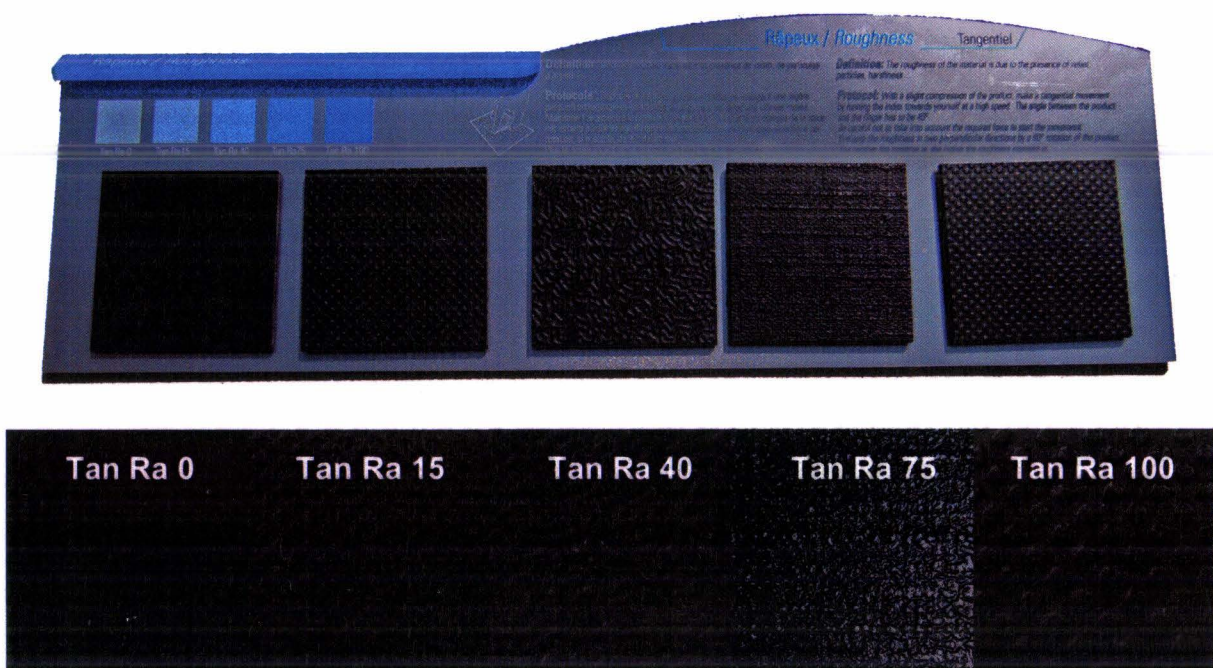


Fig. 5.2 – Descripteur rugueux et détail de ses cinq échantillons.

Roques-Carmes, Millot et Crochemore, concepteurs de l’outil, décrivent pour le sens commun et à partir d’une réflexion consensuelle, l’adjectif rugueux comme la perception tactile très variée du grattage [RMC04]. Cependant, ce descripteur a été conçu pour causer une sensation relié à une grandeur physique bien identifiée. La taille des aspérités et leur inter-espacement déterminent la capacité abrasive, si bien que ce descripteur a été bâti sur la base d’une relation linéaire entre les perceptions de la rugosité et de surface effective au contact. Pour cela, comme le montre la figure 5.3 en page 139, les surfaces effectives de ce descripteur sont mesurées par un microscope mécanique à balayage, filtrant l’information avec une bille de 1 mm de diamètre. Ceci permet d’obtenir une image, par la surface développée au contact, de la capacité des surfaces à favoriser la pénétration de la peau.

Cette approche nous a séduite de par sa compatibilité avec nos hypothèses sur les mécanismes temporels non déterministes auxquels nous avons conclu et le recours à la variation d’un

paramètre spatial pour permettre la perception de différentes intensités de sensation de « râpeux ». Comme son protocole d'utilisation requiert un mouvement volontaire que l'on peut

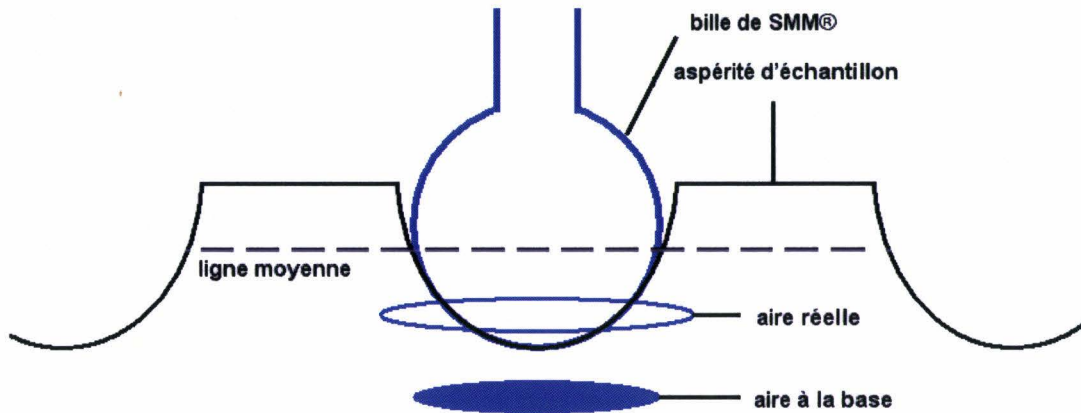


Fig. 5.3 – Explication simplifiée du critère physique retenu par Roques-Carnes et son équipe [RMC04] pour l'estimation instrumentale de la rugosité du SENSOTACT®.

qualifier de stéréotype du toucher latéral, nous avons ensuite pensé qu'il pourrait être intéressant de comprendre en quoi le mouvement pourrait favoriser la discrimination du paramètre d'aire effective au contact, critère de conception retenu pour le descripteur rugueux et déterminant des perceptions. Enfin, jusqu'à présent, nos études ont montré que *pour les textures fines* le mouvement favoriserait un emboîtement superficiel entre surfaces. De fait, l'émergence de forces tangentielles localisées sur l'empreinte déterminait l'intensité de la rugosité perçue. Ici, le descripteur « râpeux » propose une gamme de textures variant de la surface lisse (Tan Ra0) à la surface à points espacés d'une période d'environ 2 mm (Tan Ra100). Il est donc probable que nous ayons à étudier une transition vers des textures grossières où la peau serait, comme avec notre poulie, significativement déformée de sa position de référence, et dont le résultat pourrait nous aider à préciser les limites de notre étude.

### 5.2.3 Caractérisation des échantillons au profilomètre avant l'expérience

La seule donnée quantitative dont nous disposons pour décrire les états de surface des échantillons est la variation l'aire effective au contact [RMC04]. En fonction de la note attribuée, celle-ci suit une relation du type :

$$SD(\%) = 100 + \text{note} / 25$$

Afin de savoir si nos textures peuvent, a priori, entrer dans la catégorie des textures fines, nous avons jugé intéressant de mesurer leur état de surface au rugosimètre. Pour cela, nous avons employé un profilomètre (ISO3274) portable Taylor-Holson Surtronic 3+ qui fonctionne avec un capteur à reluctance variable. La pointe est un diamant de rayon de pointe égal à 5  $\mu\text{m}$ . Les mesures ont été effectuées sur une longueur de palpée de 10 mm à une vitesse de 1  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .



La figure 5.4 présente une mesure du profil de rugosité pour chacun des échantillons à relief significatif (Tan Ra 15, 40, 75 et 100). Pour tous les échantillons, nous détaillons deux paramètres d’amplitude et un paramètre d’espace : l’écart moyen de rugosité Ra, l’écart quadratique de rugosité Rq et la largeur moyenne des éléments Rsm qui définit la largeur d’une saillie et d’un creux consécutifs (norme ISO 4287).

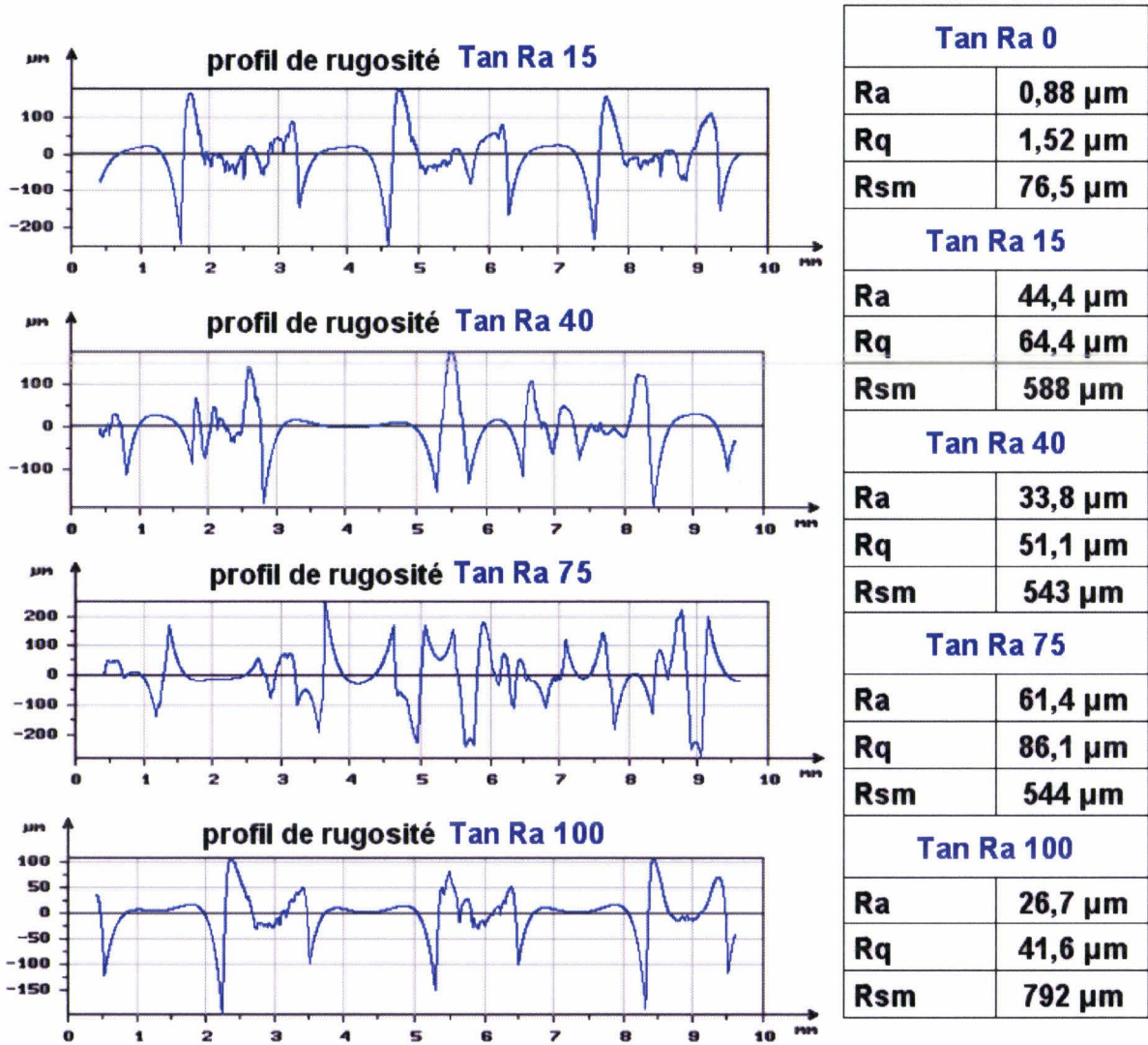


Fig. 5.4 – Profil de rugosité pour les échantillons Tan Ra 15, 40, 75 et 100 (0 ayant un Ra proche de 0) et valeur des paramètres Ra, Rq et Rsm pour chacun des échantillons.

Cette mesure nous donne des renseignements précieux. Tout d’abord, la hauteur maximale de profil est beaucoup plus importante que celle de 70 µm détaillée dans l’expérience de la section 4.3 (pp. 113-117). Ceci pourrait donner lieu à des contraintes de compression et de cisaillement lors de macrocourbures de la peau qui pourraient dominer les effets superficiels qui déterminaient les perceptions dans notre chapitre 4, et ce, dès l’échantillon Tan Ra 15, compte tenu de son relief élevé. Contrairement à l’étude précédente [RMC04] où une bille de 1mm a été utilisée, le fait d’avoir conservé la pointe diamant nous amène à observer des variations de hauteur jusqu’à 500

$\mu\text{m}$ . L'étendue de mesure du capteur étant normalement de  $\pm 150 \mu\text{m}$ , les mesures présentées dans ce travail pourraient être légèrement erronées à cause d'un enregistrement en dehors du domaine nominal d'utilisation. Pourtant, elles permettent de vérifier que nous avons des surfaces déterministes (cycliques) pour les échantillons Ta Ra 15 et 100. Enfin, elles indiquent des écarts moyen de rugosité Ra et écart quadratique de rugosité Rq non corrélés avec la rugosité perçue et un espacement moyen entre irrégularités plus important pour la dernière surface que pour les autres, en dépit d'une périodicité identique en apparence avec celle de l'échantillon Ra 15. Ceci s'explique peut être par une aire de vallées inférieure à celle des reliefs pour Tan Ra 15, ce qui augmente la portance de l'échantillon sur la pointe.

À présent, plutôt que d'utiliser un tribomètre équipé d'une pointe diamant pour caractériser nos surfaces, nous allons utiliser le doigt en tant que palpeur et notre microphone pour enregistrer les sons au contact, pour essayer de mieux comprendre à quelles échelles, et sous quelle forme l'énergie apportée par le doigt en mouvement est propagée au contact, tout comme au chapitre 3.

### 5.3 Description statistique et multiéchelle des bruits du toucher

Nous reprenons à présent la technique de mesure microphonique abordée au chapitre 3 pour son intérêt ergonomique, son originalité et sa pertinence par rapport aux autres techniques de mesure abordées dans ce travail. Nous allons évaluer l'influence du facteur rugosité perçue par texture sur des distributions de signatures sonores. Celles-ci sont élaborées grâce à une décomposition du signal compatible avec l'analyse statistique. L'examen des différences potentielles entre sujets par texture, issues de la sudation ou de la variation d'élasticité de la peau due au sexe ou à l'âge, ne sera pas abordé. La complexité géométrique des textures SENSOTACT<sup>®</sup> et le bruit de mesure sont mal appropriés pour isoler l'influence de tels facteurs.

#### 5.3.1 Sujets

Vingt-deux droitiers (8 femmes, 14 hommes) ont participé à l'expérience. Nous avons choisi un nombre de sujets suffisant pour respecter les prérequis de normalité et d'homoscédasticité à l'application des tests statistiques utilisés dans ce chapitre. Par contre, nous limitons le nombre de participants car le processus d'extraction des signaux est assez lourd. Les sujets ne doivent ni porter de bijoux, ni être vêtus de vêtements amples. Leurs mains sont préliminairement lavées et essuyées.

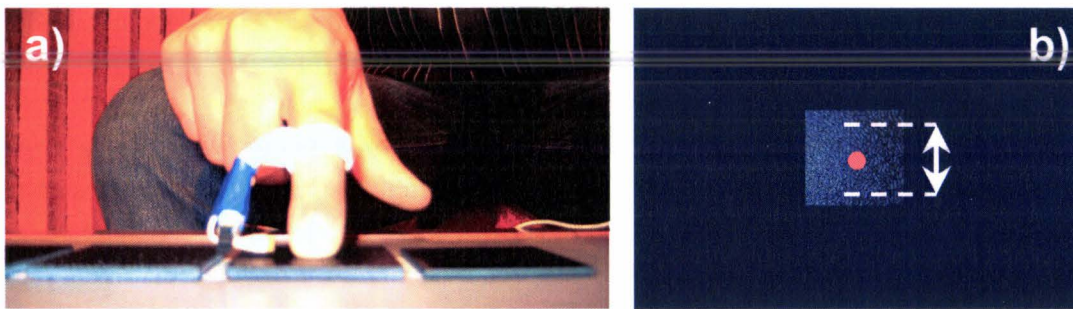
#### 5.3.2 Méthode d'utilisation de l'équipement expérimental

Dans l'expérience menée en chambre semi-anéchoïque, le doigt est équipé d'un système bague-perche. Cela permet de positionner notre microphone DPA4060 dans une position identique à celle employée au chapitre 3 (membrane à 15 mm du centre de la pulpe du doigt vue comme une sphère).

Cette technique va nous permettre de conserver la stéréotype de geste original du SENSOTACT<sup>®</sup>, qui est le suivant pour le descripteur râpeux :

« Avec une compression légère du produit, effectuer un mouvement tangentiel en déplaçant l'index vers vous à grande vitesse. L'angle entre le doigt et le produit doit être de 45°. Ne pas tenir compte des forces nécessaires au démarrage du geste. Évaluer le râpeux suivant deux directions par rotation, si possible de 90° du produit. Plus le matériau est rêche plus l'intensité du râpeux est élevée. »

Nous proposons la méthode suivante. Nos échantillons sont collés sur un caisson rigide. Les sujets s'assoient devant l'écran et les textures. Nous leur demandons de positionner le doigt 5 mm au-dessus de l'échantillon et de respecter un angle de 45° entre leur index et la surface. Dans notre expérience, la rotation à 90° du produit autour d'un axe normal au plan de la table ne présente pas d'intérêt pour l'analyse (nous le vérifierons avec une première série de mesures\*).



**Fig. 5.5 – a) Stimuli haptique et mesure embarquée sur le doigt effectuée en chambre anéchoïque. b) Stimuli visuels sur écran permettant la synchronisation du mouvement.**

Les participants doivent d'abord battre la mesure en rythme (4 temps), à voix haute, accompagnés par l'instructeur, tandis qu'ils sont aussi aidés par le déplacement d'une petite balle qui se déplace de haut en bas sur leur écran, dans une zone isomorphe où est présentée en arrière plan la référence qu'ils doivent toucher (cf. figure 5.5, p. 142). Ils s'entraînent à reproduire ce mouvement au-dessus de la texture sans la toucher. Cette opération dure 4 mesures. Ensuite, on les équipe de boules Quiès<sup>®</sup> pour éviter que leur vitesse moyenne à mi-parcours (environ  $12 \text{ cm.s}^{-1}$ ) ne soit perturbée par le bruit de frottement. Ils effectuent l'opération seuls, au contact de l'échantillon pendant 4 mesures. Pour finir, on leur demande de continuer à battre le rythme sans bruit, tandis qu'ils ne s'arrêtent plus de frotter. Nous enregistrons alors le bruit du frottement pendant 20 secondes, après un retard de déclenchement (prétrigger) de 3 secondes.

Dans une première série de mesures\* avec 10 personnes, préliminaire à celle avec nos 22 autres participants, les échantillons étaient disposés dans un ordre de rugosité croissant. Nous avons obtenu une relation singulière entre les échantillons Tan Ra 75 et 100 (nous en comprendrons mieux les raisons plus tard). Aussi, nous avons recommencé tous les essais en disposant les échantillons dans l'arrangement séquentiel Tan Ra 100-0-75-15-40 pour éviter que le frottement de textures de plus en plus rugueuses entraîne un appui normal moindre à cause d'un échauffement de la peau.

### 5.3.3 Recueil des données et traitement

Nos échantillons durent 20 secondes et contiennent environ 38 mouvements d’aller-retour. En utilisant dBFA32, nous commençons par effectuer un zoom pour visualiser précisément les signaux. Nous discriminons les mouvements proximaux-distaux (le doigt avance) des mouvements distaux-proximaux. Un mouvement dans la direction arrière (sens DP) est identifiable par un impact marqué en début de course, suivi d’un glissement permanent à un niveau macroscopique, tandis qu’un mouvement dans la direction avant (sens PD) peut être reconnu par une succession d’impacts.

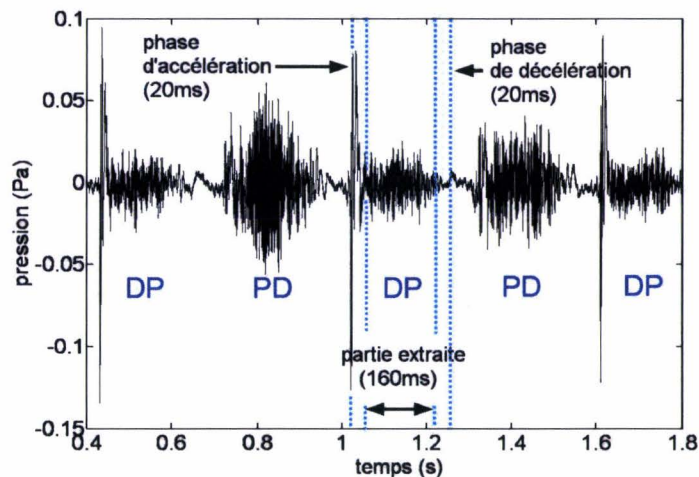


Fig. 5.6 – Traitement des signaux.

Pour chaque texture (5 au total) et chaque personne (22 sujets), nous prélevons 20 portions de signal DP (en accord avec la procédure du SENSOTACT<sup>®</sup>) comprises entre des phases d’accélération et de décélération de 20 ms chacune. Nous ne considérons pas l’effet du changement d’orientation du mouvement relatif puisque les textures possèdent une organisation similaire suivant les directions orthogonales dans le plan. Chaque nouveau signal est filtré pour compenser l’effet dièdre dans les hautes fréquences (cf. 3.2.4, page 74) puisque comme nous le verrons dans la partie 5.3.5 de la page 146, nous allons y obtenir un contenu sonore potentiellement significatif. L’ensemble est ensuite exporté vers Matlab<sup>®</sup>.

### 5.3.4 Analyse continue des transitoires à plusieurs échelles

En utilisant la transformée continue en ondelettes, notre objectif est de comprendre l’évolution des scalogrammes en fonction de l’échantillon du SENSOTACT<sup>®</sup> utilisé et donc des notes de rugosité qui lui sont attribuées. Ici, compte tenu des différences énergétiques entre les signaux, la longueur de l’échelle de couleur a été mise en relation à la valeur quadratique moyenne des variations de pression enregistrées. Ceci vise à faciliter la visualisation de l’évolution des phénomènes en intensité. Pour un sujet et pour chaque note, nous avons prélevé un échantillon pour comprendre les mécanismes d’émergence des différences de perception. Comme le suggère

aussi une autre séquence de signaux de la même expérience analysée de la même manière [MPC05b], les cinq scalogrammes de la figure 5.7 présentée ci-après page 145 représentent fidèlement les phénomènes généralement observés.

Les scalogrammes montrent que le mouvement génère des événements transitoires. Ces phénomènes apparaissent de façon aléatoire dans le temps (rappelons encore que le caractère stochastique n'exclut pas des corrélations avec la vitesse de mouvement ou encore les caractéristiques spatiotemporelles de la texture utilisée) mais dont la présence semble, en moyenne, si l'on observe une les échelles prises individuellement se renforcer en fonction de la note attribuée à l'échantillon.

échelle e (cf. 3.4.1, p. 84)	1	20	40	60	80	100	200	400	600
pseudo-fréquence (Hz)	17219	860,93	430,47	286,98	215,23	172,19	86,09	43,05	28,70

**Tab. 5.1 – Rappel des correspondances entre les échelles et fréquences centrales pour une ondelette de Meyer échantillonnée à 25,6 kHz.**

Le bruit du frottement entre le doigt et l'échantillon Tan Ra 0 est très peu énergétique et ne permet pas de voir apparaître de structure localisée. Les trois échantillons suivants Tan Ra 15, 40 et 75 mettent en évidence des structures similaires entre elles. Ces structures non périodiques contiennent des vibrations transitoires ou impacts répétés car les lignes horizontales sont discrétisées et la présence de structures verticale est très marquée. Elles sont localisées entre les échelles 20 et 70. Leur densité soit d'autant plus élevée que la perception de la rugosité est prononcée. Le dernier échantillon possède une structure similaire tout en étant en apparence plus énergétique. Il présente un contenu vibratoire important centré sur l'échelle 250.

On retrouve une prépondérance de phénomènes vibratoires à l'échelle de l'empreinte digitale qui fait vibrer les structures à haute fréquence. Seul le dernier échantillon Tan Ra 100 présente un contenu légèrement plus important à basse fréquence. Si nous raisonnons par analogie au cas de la roue crantée, cette échelle rappelle celle des crans en rotation qui indentaient la peau de manière significative. Il se pourrait que la pulpe, dans le cas de la dernière texture subisse une déviation plus prononcée de sa position de référence à cause d'un espacement entre les motifs trop important, qui porte moins l'ensemble de la pulpe. Les transitoires présentent des fluctuations sous forme de chirps, ce qui peut être dû aux compressions et détente des structures impliquées.

Cette première approche du descripteur supporte un caractère aléatoire d'une stimulation opérant sur la peau à deux échelles distinctes : celle de la peau et celle de l'empreinte. Il semblerait que la vibration, générée à haute fréquence par les chocs entre aspérités, détermine principalement le contenu sonore. Pourtant, le dernier échantillon (Tan Ra 100) pourrait, par une périodicité spatiale cinq fois supérieure à celle de l'empreinte (environ 3 mm) et surtout une moins bonne portance de ses motifs, avoir favorisé l'émergence d'une stimulation à l'échelle de la pulpe.

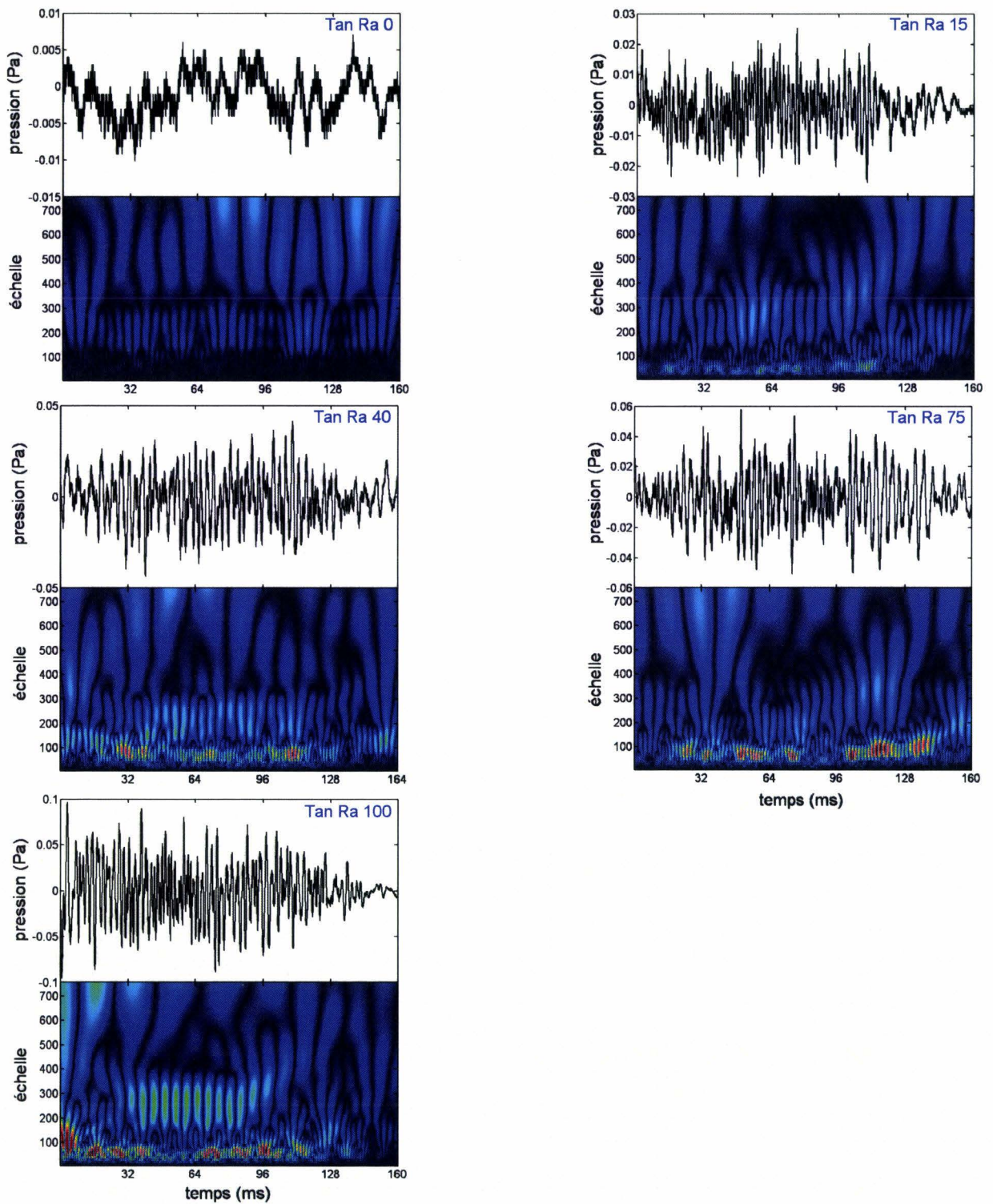


Fig. 5.7 – Exemples d'échantillon par texture SENSOTACT<sup>®</sup> et scalogrammes associés

### 5.3.5 Évolution de l'intensité sonore en fonction des notes.

La boîte à moustaches est un moyen rapide de figurer le profil essentiel d'une série statistique quantitative. Si on s'intéresse à la pression acoustique efficace  $P_e$ , on peut immédiatement s'apercevoir (figure 5.8) que le niveau sonore ne permet pas d'identifier un échantillon à cause des écarts-type importants. À ce stade, il est illusoire de discriminer les échantillons par des analyses de variance puisqu'elle n'est pas homogène entre les échantillons. On notera que le toucher latéral de l'échantillon Tan Ra 75 est en moyenne le plus bruyant.

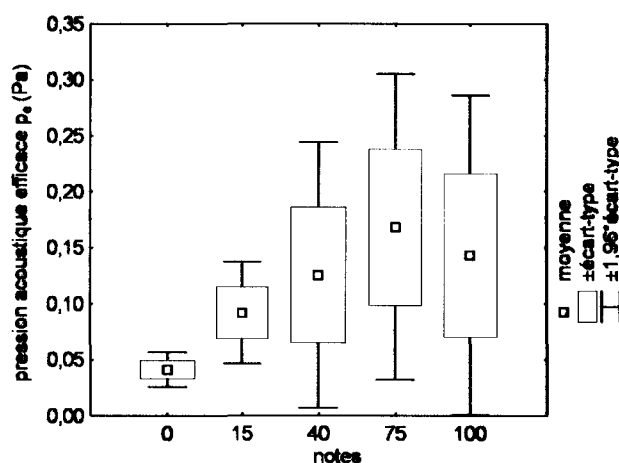


Fig. 5.8 – Pression acoustique efficace mesurée sur le panel en fonction des notes

Cette mesure d'ensemble confirme bien qu'il est inapproprié de considérer seulement le critère d'intensité des vibrations de surfaces au contact pour établir des relations systématiques avec les perceptions de rugosité de texture. Sans pour autant avoir une mesure spatiale, nous possédons à présent une connaissance sur le phénomène de frottement pour interpréter une densité d'évènement par échelle en termes spatiaux (occurrences des emboîtements à l'échelle des crêtes épidermiques ou encore des crans de la textures). Voyons si, en utilisant une technique d'analyse échelle-temps propice à l'exploitation statistique, nous pouvons obtenir davantage d'information sur les phénomènes.

### 5.3.6 Transformée en ondelettes discrète

Pour calculer des tests statistiques avec un nombre raisonnable de variables, nous nous sommes intéressés à la transformée en ondelette discrète. Celle-ci permet de compresser l'information de manière intuitive. Le lecteur intéressé par cette technique multirésolution de traitement du signal pourra consulter l'annexe D en page 181. Pour présenter succinctement cette technique, on peut dire qu'elle consiste en l'utilisation de filtres orthogonaux qui décomposent le signal de façon dyadique et récursive. À présent, de manière très simplifiée, le signal est découpé en deux en termes d'échelles. Un signal de détail contient les fluctuations dans les hautes fréquences tandis

qu'un un signal d'approximation conserve une forme plus grossière du signal, contenant les basses fréquences. Cette approximation peut à nouveau subir une découpage.

Comme nous utilisons des textures non sinusoïdales et non périodiques, il serait intéressant de vérifier que la structure de l'ondelette de Meyer soit toujours la plus adaptée au traitement que nous allons réaliser. Afin de discriminer les différences réelles de contenu sonore entre les échantillons, il nous faut une ondelette très sélective. Nous allons utiliser la même méthode qu'au chapitre 3. Pourtant, cette fois-ci, nous allons calculer une valeur de kurtosis par niveau de détail, car il est possible que des phénomènes transitoires, de natures différentes, aient lieu à deux échelles distinctes.

Nous testons une décomposition en ondelettes sur huit niveaux en faisant abstraction du niveau de détail le plus haut. Ainsi, pour l'ondelette de Meyer, la gamme d'étude s'étend de 33 Hz à 8609 Hz pour une ondelette mère de fréquence centrale égale à 17219 Hz.

Niveau de détail	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
Limite haute des pseudo-fréquences (Hz)	8609	4304	2152	1076	538	269	134	67

Tab. 5.2 – Décomposition dyadique sur huit niveaux avec l'ondelette discrète de Meyer

Un programme nous a permis d'automatiser la tâche de calcul des moyennes par bande de détail sur tous nos signaux. Cette opération a été effectuée avec de nombreux filtres, splines incluses : Haar, Meyer, Daubechies (2, 3, 4, 5), Symlets (4), Coiflets (3,4,5) (cf. tableau 5.3), splines biorthogonales et biorthogonales inversées (1.1, 1.3, 1.5, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 4.4, 5.5, 6.8). Ainsi 2200 valeurs (22 sujets × 20 échantillons × 5 textures - voir section 5.3.3 p.143) ont été calculés pour chaque ondelette (40 formes), chaque niveau de détail (8) sur les valeurs absolues des coefficients de détail, et non pas les valeurs discrètes du signal reconstruit.

ondelette	fréquence centrale (Hz)	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
haar	25518	4.0	4.2	4.1	3.9	3.8	4.1	5.9	3.2
dmey	17219	4.1	3.9	4.0	4.4	4.5	5.5	16.4	9.4
db2	17079	4.3	4.0	3.7	4.1	4.0	4.4	7.0	5.2
db3	20494	4.5	4.1	4.1	3.7	4.4	4.9	5.3	5.2
db4	18299	4.5	4.1	3.8	3.9	4.1	4.5	7.5	5.5
db5	17079	4.4	4.0	4.1	4.1	4.2	4.6	7.6	3.9
sym4	18299	4.0	4.1	4.1	3.8	4.1	4.5	4.9	5.4
coif3	18083	4.1	4.0	3.9	4.1	4.3	5.4	7.4	8.3
coif4	17821	4.1	4.0	3.8	4.6	4.1	6.0	10.0	8.5
coif5	17668	4.1	4.0	3.9	4.0	4.1	6.4	12.1	8.5

Tab. 5.3 – Valeur moyenne des kurtosis calculés par bande de détail



L'ondelette de Meyer présente encore une fois les valeurs de kurtosis les plus élevées. Les ondelettes à nombre de moments nuls et taille de support importants sont moins compétentes. Les Coiflets, qui possèdent des structures proches de l'ondelette de Meyer présentent des valeurs importantes. Ces éléments confirment la nature transitoire des sons du toucher latéral : on ne peut pas compresser le signal davantage car un transitoire peut intervenir à n'importe quel moment et dure peu de temps.

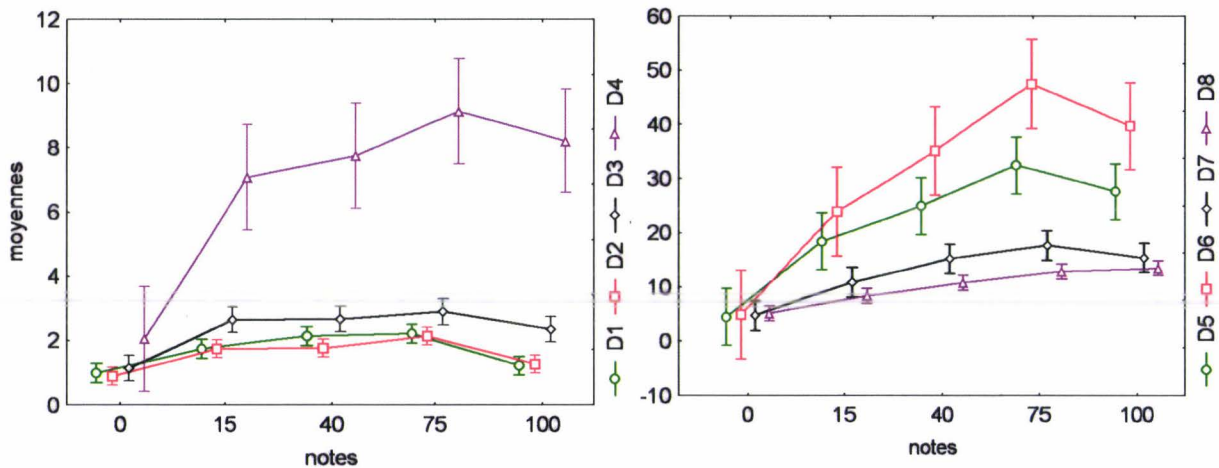


Fig. 5.9 – Moyennes multipliées par 1000 des coefficients de détail pour chaque note et chaque niveau de détail.

La figure 5.9 présente la décomposition dyadique sur huit échelles des moyennes de coefficients obtenus avec le filtrage des détails par ondelettes. À partir de maintenant, nous ne travaillons plus sur des valeurs efficaces mais sur des moyennes d'indicateurs de variation temporelle de pression acoustique à plusieurs échelles. Les variances étant à présent homogènes par niveau de détail, nous pouvons alors analyser les variations de moyenne du processus stochastique en fonction des échelles et des échantillons SENSOTACT®. Toutefois, le choix des huit niveaux étant motivé par la nécessité de couverture d'une large gamme d'échelles, ce nombre n'est peut être pas le plus approprié pour interpréter les phénomènes car nous ne savons pas comment ces niveaux peuvent être regroupés. C'est la raison pour laquelle nous allons immédiatement en discuter avant d'aller plus loin dans notre raisonnement.

## 5.4 Interprétation des résultats

### 5.4.1 Pertinence d'agrégation des niveaux de détail

Dans les chapitres 3 et 4 (pp. 63-133) nous avons mis en évidence l'existence de phénomènes physiques à trois, voire quatre échelles, celle de la crête épidermique de l'empreinte, celle de la texture (figure 3.15 page 88), celle de la phalange sur textures plus grossières (figure 4.3 page 107) ou au contraire de microaspérités de l'une des surfaces lors du glissement (figure 4.20 page 127). En nous référant à la figure 5.9, nous serions tenté de constituer les ensembles suivants

{D1,D2,D3}, {D4}, {D5,D6}, {D7,D8}. Pour vérifier quantitativement la pertinence de ce partitionnement, nous utilisons la classification ascendante hiérarchique (CAH). Un critère d'agrégation est celui du plus proche voisin. Ainsi, la distance entre deux classes de détail  $C_1$  et  $C_2$  est définie par la plus courte distance séparant un individu de  $C_1$  et un individu de  $C_2$ .

$$d(C_1, C_2) = \min \{d_{ij}; i \in C_1, j \in C_2\}$$

Comme le montre la figure 5.10 présentée ci-dessous, les classes terminales D1 et D2 subissent une première agrégation A1 formant un noeud à faible distance euclidienne. En dépit de l'éloignement entre le premier et le second noeud formé, nous préférons attendre les trois agrégations suivantes A2, A3 et A4 qui s'effectuent à des distances euclidiennes comparables pour fixer notre niveau d'observation. L'aîné du dernier noeud sépare les composantes à haute fréquence C1 (> 1076 Hz) des composantes à basse fréquence {C1, C2, C3}. Son benjamin a trois successeurs qui scindent les basses fréquences en trois échelles d'intérêt. On peut donc effectuer le regroupement en quatre classes dont nous avons fait l'hypothèse.

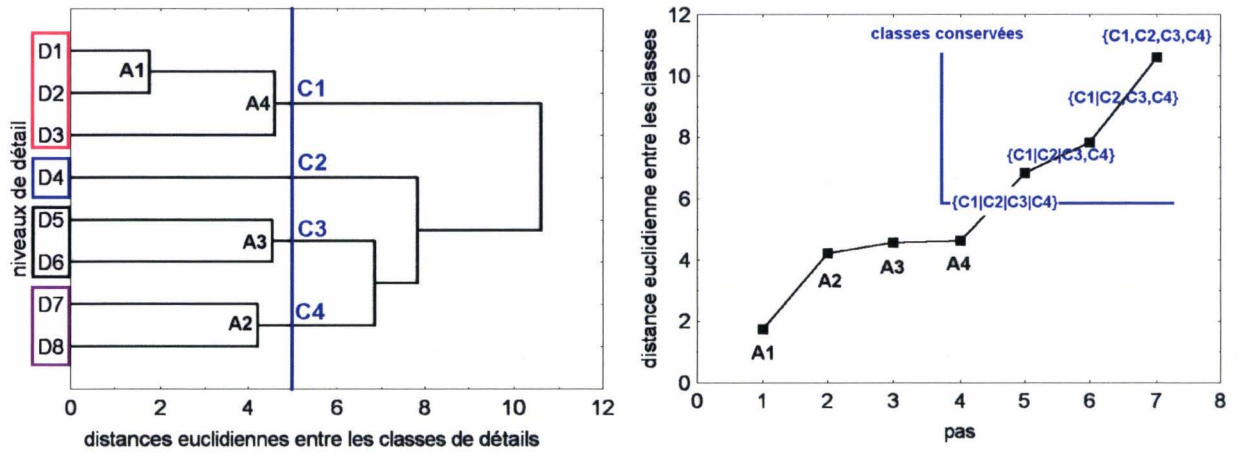


Fig. 5.10 – Classification ascendante hiérarchique

#### 5.4.2 Interprétation des phénomènes au contact et de leur perception associée

Dans la section 5.3.5 (p. 146), nous avons découvert que l'intensité du son, par les variations de pression propagées dans l'air reflète des déplacements des surfaces en vibration, ne permet pas d'établir de relation systématique avec la perception de la rugosité. Depuis, en analysant les distributions moyennes d'évènements transitoires par échelle, nous nous sommes demandé si en tenant davantage compte de critères spatiotemporels au sens stochastique, il serait possible d'obtenir une meilleure visibilité sur les phénomènes qui déterminent la perception de la rugosité de texture fine.

L'organisation de l'énergie sur huit niveaux incite, sur des critères de similarité dans l'intensité des évènements transitoires, à analyser la distribution à quatre échelles distinctes. Essayons donc à présent, en nous basant sur les résultats d'expérience des chapitres 3 et 4, de comprendre quels sont les phénomènes impliqués au contact *sur tous les essais* (2200 portions de signaux ou observations au total).

Aux très basses fréquences ( $33 < C4 < 134$  Hz), les moyennes de variations temporelles de pression sont peu prononcées. Ceci reflète les phénomènes de déformation lents subis à l'échelle de la pulpe (cf. section 4.1.5 page 105) peu dissipative. Nous avons jusqu'à présent suggéré qu'à ces échelles siégeaient des phénomènes de pénétration des aspérités de texture sur la pulpe et d'écart de la peau de sa position moyenne de référence. L'évolution à très basse fréquence suit une évolution croissante presque linéaire, en accord total avec le critère retenu pour la conception du descripteur.

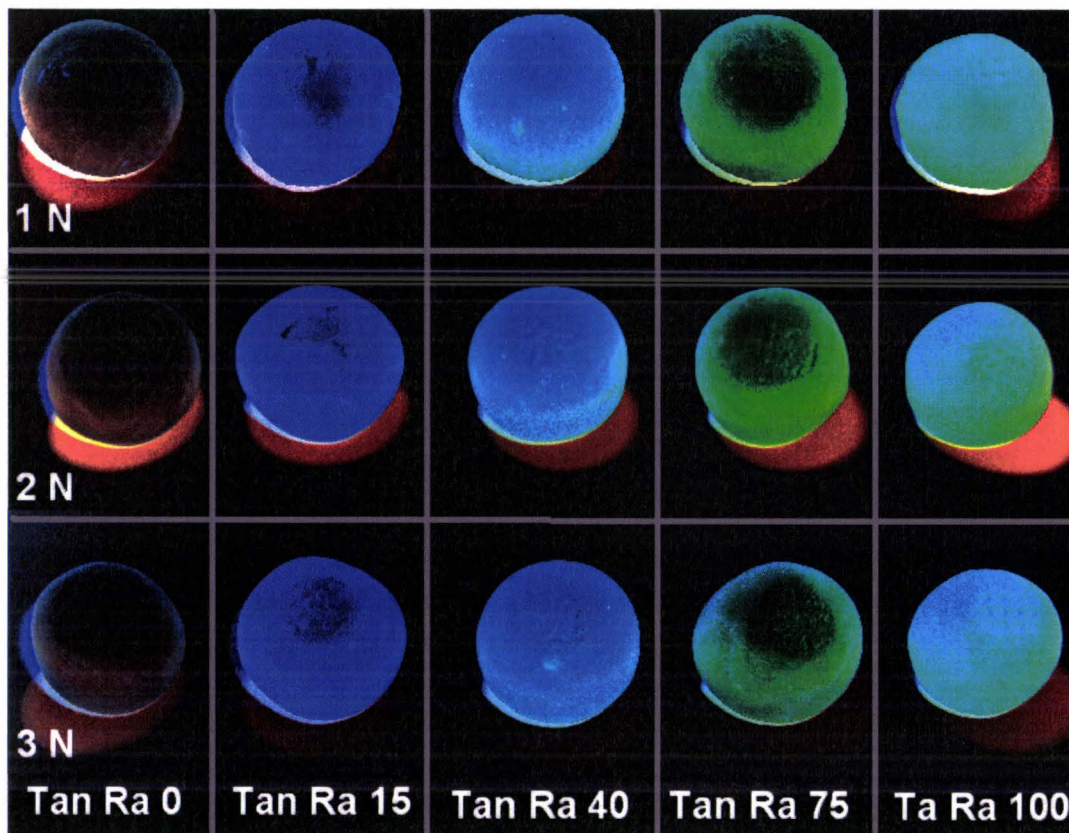


Fig. 5.11 – Motifs obtenus sur des sphères de pâte à modeler. Les échantillons SENSOTACT<sup>®</sup> sont posés sur une balance électronique et pressés 5 secondes avec un appui de 1, 2 et 3 N. Le négatif permet de discerner la déformation en surface.

Aux fréquences intermédiaires ( $134 < C3 < 538$  Hz), les indicateurs possèdent des moyennes très élevées par rapport aux précédents. Ici, il ne fait aucun doute, compte tenu du rôle de l'empreinte clairement mis en évidence au chapitre 4 que l'emboîtement superficiel explique la réponse intense du matériau qui résonne dans ces échelles. Ici, on constate une baisse d'intensité pour l'échantillon Tan Ra 100. Un espacement plus important entre motifs peut l'expliquer. La dernière texture portant moins la peau la laisserait davantage pénétrer dans sa structure et se courber par rapport à la texture Tan Ra 75, tout en limitant les interactions à l'échelle de l'empreinte par des motifs aux arêtes peu marquées. Nous l'avons vérifié grâce à la petite expérience proposée en figure 5.11. Le motif de la dernière texture est déjà inscrit dans la pâte

pour une force d'appui de 1 N alors que les autres reliefs commencent à pouvoir être distingués à partir de 2 N. Cette explication concorde d'une part avec la valeur plus prononcée du Rsm pour cette texture (fig. 5.4, p. 140), mais aussi avec le critère d'élaboration du descripteur.

À hautes fréquences ( $538 < C2 < 1076$  Hz), l'intensité des phénomènes devient beaucoup moins importante tout en continuant à suivre la tendance des fréquences intermédiaires, ce qui nous conduit à privilégier des vibrations issues de forces d'excitation non aérodynamiques. Dans notre cas, il est probable que la texture propage bien l'énergie au contact par la présence d'un mode résonant à cette échelle d'observation. Cependant, tout comme dans les très hautes fréquences que nous allons détailler, il est possible que des phénomènes mécaniques à très petite échelle viennent apporter de l'énergie. Dans le cas du pneumatique en roulement [Kui01][SE02][BA01][BSB02], il est généralement reconnu que les phénomènes au contact (stick-slip, stick-snap, vibration tangentielle du revêtement de la chaussée) sont présents et particulièrement complexes à ces échelles. Ici, les pores ou cavités sur les crêtes épidermiques de largeur comprise entre 88 et 220  $\mu\text{m}$  ainsi que les microaspérités de l'empreinte peuvent aussi expliquer des moyennes élevées.

Dans les très hautes fréquences ( $1076 < C1 < 8609$  Hz), on obtient un contenu sonore faible mais pourtant vraiment significatif par rapport au niveau usuel de la chambre semi-anéchoïque. La distribution paraît assez décorrélée des phénomènes à basse fréquence, plutôt constante et en retrait pour les deux textures extrêmes (Tan Ra0 et Tan Ra100). L'effet aérodynamique d'air pumping dépendant de la vitesse et de l'emprisonnement d'air au contact peut l'expliquer. Usuellement [SE02] l'intensité du son émis augmente quand l'air peut être emprisonné dans des cavités au contact, mais tend à diminuer lorsqu'elles sont ouvertes et laissent l'air s'échapper. Cet effet serait moins prononcé pour les échantillons Tan Ra 0 où les cavités sont absentes et Tan Ra 100 où elles sont peut être plus ouvertes. Sinon, encore une fois, la portance réduite du dernier échantillon pourrait causer une diminution de l'aire effective d'interaction et expliquer un bruit fractal (réaction modale haute fréquence à l'excitation anharmonique) moins prononcé.

Nos expériences des chapitres 3 et 4 nous ont surtout permis d'expliquer les phénomènes à l'origine de la formation des classes C4 et C3. Aux fréquences supérieures des classes C2 et C1, nous ne pouvons que formuler des hypothèses reposant sur des connaissances apportées par les études du contact pneu-chaussée.

### 5.4.3 Étude des corrélations

Analysons à présent plus quantitativement les corrélations de ces distributions avec la perception de la rugosité du descripteur râpeux.

Nous allons « normaliser » nos distributions en ordonnées, tout en conservant une relation linéaire entre les échelles. Les notes du SENSOTACT® sont donc incrémentées d'une unité pour permettre la transformation logarithmique des grandeurs en abscisses et en ordonnées de nos distributions précédentes.

niveaux de détail	D1	D2	D3	D4
ajustements				
$R^2_{\text{linéaire}}$	0.155	0.197	0.330	0.484
	19.857	26.481	53.209	101.457
probabilité de corrélation	$F(1,108)= 19.857$ $p < 0.000^*$	$F(1,108)= 26.481$ $p < 0.000^*$	$F(1,108)= 53.209$ $p < 0.000^*$	$F(1,108)= 101.457$ $p < 0.000^*$
pente	0.117	0.133	0.182	0.309
interception	0.010	-0.039	0.069	0.317
$R^2_{\text{quadratique}}$	0.272	0.298	0.425	0.532
probabilité de corrélation/	$F(2,107)= 19.940$ $p < 0.000^*$	$F(2,107)= 26.481$ $p < 0.000^*$	$F(2,107)= 53.209$ $p < 0.000^*$	$F(2,107)= 101.457$ $p < 0.000^*$
[a,b,c]	[-0.195, 0.494, -0.044]	[-0.184, 0.491, -0.091]	[-0.189, 0.548, 0.016]	[-0.186, 0.669, 0.265]
niveaux de détail	D5	D6	D7	D8
ajustements				
$R^2_{\text{linéaire}}$	0.619	0.710	0.526	0.651
$F(1,108)$	175.156	265.055	119.661	201.023
probabilité de corrélation	$F(1,108)= 175.156$ $p < 0.000^*$	$F(1,108)= 265.055$ $p < 0.000^*$	$F(1,108)= 119.661$ $p < 0.000^*$	$F(1,108)= 201.023$ $p < 0.000^*$
pente	0.420	0.478	0.271	0.203
interception	0.633	0.684	0.663	0.695
$R^2_{\text{quadratique}}$	0.648	0.731	0.539	0.654
probabilité de corrélation	$F(2,107)= 98.596$ $p < 0.000^*$	$F(2,107)= 145.504$ $p < 0.000^*$	$F(2,107)= 62.433$ $p < 0.000^*$	$F(2,107)= 101.121$ $p < 0.000^*$
[a,b,c]	[-1.178, 0.764, 0.583]	[-0.158, 0.784, 0.640]	[-0.082, 0.430, 0.640]	[0.028, 0.056, 0.023]

Tab. 5.4 – Analyse par bande de détail des corrélations entre les notes du descripteur « râpeux » et les moyennes des coefficients de la décomposition

Certaines distributions ne sont pas linéaires sur la figure 5.9 de la page 148. C'est pourquoi nous allons calculer des ajustements quadratiques en support d'ajustements linéaires. Nous étudierons ainsi s'il permettent une meilleure description des relations. Soit  $M_{(+1)}$ , la note attribuée à l'échantillon incrémentée de 1 et  $M_{(Di)}$  la valeur moyenne des valeurs absolues de coefficients d'ondelettes à l'échelle  $i$ , les formules ci-dessous sont employées pour modéliser la

relation quadratique entre l'intensité des variations temporelles sons de contact par bande de détail et les perceptions de la rugosité :

$$\log M_{(+1)} = a \times (\log M_{Di})^2 + b \times \log M_{Di} + c$$
$$M_{(+1)} = 10^c \times M_{Di}^{(a \times \log M_{Di} + b)}$$

Comme l'indique le tableau 5.4 de la page précédente, cet ajustement nous permet surtout de mettre en évidence que l'intensité des sons à haute fréquence (D1, D2, D3) suit une loi en U inversé avec un maximum situé au niveau du deuxième échantillon Tan Ra 15. Tant la forme de cette fonction, que la fermeture des cavités de l'échantillon sont compatibles avec l'effet d'air pumping rapporté dans la littérature.

Si la forme quadratique permet une meilleure représentation mathématique de l'évolution des phénomènes à haute fréquence, elle ne permet pas pour autant de trouver l'existence de corrélations importantes avec nos résultats dans les bandes D1-4. Elle est même sans grand intérêt pour les bandes (D5, D6) et (D7, D8) qui nous intéressent vraiment, car elle n'améliore pas vraiment la description du phénomène, excepté le retrait en intensité de l'échantillon Tan Ra 100 dans les bandes (D5, D6, D7).

## 5.5 Bilan de l'étude sur SENSOTACT®

Le SENSOTACT® nous a d'abord permis de vérifier un fonctionnement stochastique du toucher latéral par la nature transitoire et aléatoire des événements. Ensuite, l'aspect multiéchelle, indispensable à la compréhension des phénomènes, a été retrouvé par la distinction d'au moins deux classes. Enfin, nous avons pu préciser les limites de notre théorie : la perception de la texture est secondairement dépendante des effets superficiels de l'interaction tribologique.

Nos observations ont confirmé, en accord avec le travail de Roques-Carmes, Millot et Crochemore [RMC04] que la pénétration de la peau entre les aspérités et ses déformations aux basses fréquences déterminent *principalement* la rugosité perçue.

La présence d'interactions mécaniques très énergétiques aux fréquences intermédiaires nous amène cependant à envisager, compte tenu des résultats de notre chapitre 4 (pp. 102-133), une *meilleure acuité tactile* permise par des effets d'interaction superficiels.

Dans notre étude, nous avons observé qu'entre les échantillons Tan Ra 75 et 100, il se produit une diminution des phénomènes superficiels s'accompagnant de variations de pression sur la peau plus intenses et moins rapides. Ceci nous conduit finalement aux limites de notre approche. À partir du moment où la pulpe quitte sa ligne de référence et n'est plus portée de manière effective par la texture (voir figure 5.11 page 150), les compressions/cisaillements imposés par les macrocourbures de la peau à l'échelle de la pulpe déterminent principalement la perception de la rugosité. Ces contraintes de compression et traction dans la direction normale prédominent alors sur le cisaillement superficiel tangentiel fonction de la commensurabilité des surfaces.

Pour valider cette analyse, nous avons demandé à 15 autres sujets naïfs de classer nos échantillons par ordre d'intensité 1) de relief, 2) de frottement, 3) de densité de « grosses ou

macroaspérités », 4) de densité de « petites, fines ou microaspérités ». Les participants devaient alors respecter le protocole d'utilisation du descripteur « râpeux » mais on leur demandait d'*appuyer très légèrement*. Le classement Ta Ra 0-15-40-75-100 est respecté pour les trois premiers échantillons dans 100% des cas. Par contre, 1) 80, 2) 73, 3) 67 et 4) 87 % des sujets ont systématiquement inversé les échantillons Tan Ra 75 et Tan Ra 100. Les résultats obtenus ne sont pas surprenants compte-tenu de l'importance des effets superficiels dans le jugement de rugosité mis en avant au chapitre 4 (pp. 101-133), de la distribution de la signature acoustique de la texture Tan Ra 75 (figure 5.9 page 148) et du faible potentiel des textures à déformer notre pâte à modeler pour des forces déjà importantes ( $> 1$  N) par rapport à l'usage (tab. 2.2 page 53).

Citons les résultats de Moy et al. [MSTF00] qui pourraient discréditer nos résultats. La discrimination d'orientation de surfaces rainurées de période supérieure à 2.4 mm est facilitée lorsqu'un filtre passe-bas empêche le cisaillement de la peau. Les phénomènes intervenant à haute fréquence dégradent la qualité de l'information spatiale aidant à la discrimination de l'orientation dans le cas de formes grossières. Ces travaux ne permettent pourtant pas de conclure que les effets superficiels ont le même effet dans une tâche de discrimination de texture grossière. Le jugement d'orientation (au chapitre 4 pp. 101-133, dans la tâche de type GO, nos sujets évaluaient l'intensité d'une rugosité), impliquant une exploration de la structure spatiale d'un relief, ne résulte certainement pas d'un objectif de connaissance identique à celui de l'évaluation de la rugosité. Pour la rugosité, nous rejoignons plutôt Bergmann et Kappers [BK06] et leurs hypothèses récentes : deux dimensions distinctes pourraient intervenir en fonction de l'échelle spatiale à laquelle on accorde de l'importance. Hollins et al. [HBKY00] avaient aussi déjà noté qu'une dimension de jugement supplémentaire pouvait apparaître selon les sujets.

Revenons enfin au rôle du contact dynamique dans l'exploration de la texture. Nous avons à présent des preuves évidentes que le mouvement apporte des interactions tribologiques marquées entre aspérités de texture et il transforme ainsi les champs de contrainte sur la pulpe par rapport à ceux qui seraient observables pour un toucher vu comme une succession d'états statiques. Au chapitre 4, nous avons appris que s'il est mal orienté par rapport au motif de surface, la rugosité perçue peut être absente. Nous venons de voir qu'un changement de la gamme de force d'appui mène à des estimations différentes. Le contrôle (toucher actif) joue donc un rôle vraiment essentiel dans la caractérisation haptique de la texture.

Avant de conclure cette étude, nous avons tenu à proposer un dernier chapitre. Celui-ci comporte un état de l'art sur les propositions d'afficheur tactile dont le design a partiellement motivé cette étude. Nous verrons que nos travaux apportent une réflexion nouvelle sur les solutions technologiques à privilégier.

## Chapitre 6

### Perspectives de simulation du toucher actif de texture

#### Sommaire

---

<b>6.1</b>	<b>Présentation des propositions d'afficheurs tactiles.....</b>	<b>156</b>
6.1.1	Méthodes de stimulation cutanée.....	156
6.1.2	Créativité des solutions technologiques.....	157
6.1.3	Classification des stimulateurs par nature des contraintes au contact.....	157
	- <i>Contraintes de traction / compression</i> .....	157
	- <i>Contraintes de cisaillement</i> .....	160
<b>6.2</b>	<b>Recommandations de design aux afficheurs de texture (fine).....</b>	<b>163</b>
6.2.1	Développer les techniques de mesure des grandeurs physiques du contact.....	164
6.2.2	Proposer des solutions ergonomiques.....	164
6.2.3	Utiliser des résolutions en amplitude et spatiales appropriées.....	164
6.2.4	Penser à une organisation multicouche ou large bande passante.....	165
6.2.5	Éviter le perturbation des forces de réaction modales du stimulateur.....	166
6.2.6	Respecter la nature transitoire des événements.....	166
6.2.7	Proposer des solutions de cisaillement de l'épiderme à l'échelle de ses crêtes....	167
<b>6.3</b>	<b>Perspectives.....</b>	<b>168</b>

---



Les propositions d'afficheurs de texture fine sont encore très peu nombreuses. C'est la raison pour laquelle nous avons jugé intéressant de proposer un sixième chapitre. Celui-ci vise d'une part, à présenter les solutions existantes d'afficheurs tactiles et d'autre part, à discuter des apports potentiels de notre étude en termes de recommandations de conception pour une stimulation haptique compatible avec la perception de la texture fine.

## **6.1 Présentation des propositions d'afficheurs tactiles**

Un afficheur tactile de texture est une interface homme-machine qui doit proposer un couplage sensorimoteur approprié pour permettre la perception des paramètres tribologiques, rhéologiques et thermiques de la texture. De nombreux afficheurs tactiles ont été proposés, il est donc intéressant d'étudier leur potentiel.

Dans cette section, nous décrivons les méthodes employées pour l'affichage tactile, les formes de propositions technologiques et leur classification fonction de la nature des contraintes qu'elles imposent sur la peau.

### **6.1.1 Méthodes de stimulation cutanée**

Les techniques d'affichage du Braille et les technologies d'imprimantes matricielles ou à aiguilles ont pour beaucoup influencé les recherches en stimulation cutanée. Jusqu'à présent, deux méthodes de rendu sur la peau ont principalement été proposées<sup>6</sup> : l'affichage de forme et l'application de stimuli vibrotactiles. Pour les concepteurs de stimulateurs tactiles, l'affichage de forme s'apparente souvent à une reconstitution de l'état de surface d'un matériau et finalement peu à un affichage d'un champ de contrainte imposé sur la pulpe lors du contact. Pourtant, en réalité virtuelle, l'affichage de forme est vu comme tel pour permettre une stimulation réaliste [Com95]. La stimulation vibrotactile, telle qu'elle est entendue actuellement vise à tirer parti des réponses phasiques des canaux SAI, RA et PC du système somatique pour améliorer la transmission d'une information, mais ne représente pas les effecteurs utilisant la vibration de manière indirecte pour, par exemple, régler un frottement ou un contact contrôlé sur la pulpe.

### **6.1.2 Créativité des propositions technologiques**

Chaque stimulateur tactile possède son propre domaine de validité. Leur innovation émane de critères très divers concernant une caractéristique spatiale, une technologie, un domaine d'application ou encore la direction des forces imposées sur la pulpe doigt.

Ainsi, les afficheurs tactiles peuvent être répartis suivant la discrétisation et l'étendue spatiale de l'aire de stimulation [KWB90] en :

---

<sup>6</sup> Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux aspects mécaniques du toucher latéral de texture, nous resterons principalement focalisés sur les méthodes de stimulation imposant une contrainte mécanique à l'échelle de la pulpe du doigt.

- afficheurs à un seul élément,
- afficheurs de type ligne ou vecteur (1D)
- afficheurs de type surface ou matrice (2D).

La diversité des moyens technologiques utilisés pour produire le retour d'effort permet également de former d'autres ensembles. Ainsi on trouve des effecteurs à base d'actionneurs [BHA04][Pas05] :

- électromagnétiques
- piézoélectriques
- électrostatiques
- à fluide électro ou magnéto-rhéologiques
- polymères électroactifs
- à alliages à mémoire de forme
- pneumatiques

On peut également les regrouper autour des domaines de la téléopération et de la téléprésence, de la recherche sur la perception tactile, de la substitution sensorielle, de la création de surfaces 3D, de systèmes braille et du jeu [BHA04].

### 6.1.3 Classification des stimulateurs tactiles par nature des contraintes au contact

Dans cette étude, nous proposons une classification suivant la nature des contraintes exercées sur la pulpe du doigt. En premier lieu, nous allons recenser les dispositifs imposant des forces de traction/compression, puis poursuivre avec les dispositifs imposant des contraintes de cisaillement.

#### **Traction/compression :**

Dans les études de compression-relaxation de la peau, de détermination d'impédance des membres ou de l'étude de la sensibilité aux vibrations, il est fréquent de rencontrer des dispositifs à un seul effecteur final permettant l'indentation de la peau dans la direction normale. Ils utilisent le plus souvent des technologies électromagnétiques simples à mettre en œuvre, comme les moteurs à courant continu et les voice-coils, mais aussi les bilames piézoélectriques.

*Technologie électromagnétique :* dans cette catégorie d'actionneurs, on trouvera par exemple les tactors commercialisés par EAI engineering acoustics (fig. 6.1, p. 158), utilisés comme transducteurs d'information, les pots vibrants [CM05] ou encore des indenteurs montés sur des moteurs à courant continu [PH99]. Bien qu'encombrante, cette technologie bénéficie de possibilités d'intégration sous des formes diverses et permet ainsi la distribution spatiale de l'information tactile dans des souris, des vestes ou encore des dispositifs dédiés. Ainsi le VITAL du CEA-List (fig. 6.2, p. 158) permet d'afficher des informations vibrotactiles de forme grâce à des micro-bobines [BOM04]. Des afficheurs de forme comme le FEELEX de l'université de Tsukuba ou encore l'afficheur de forme à moteurs radio commandés de Wagner, Lederman et Howe [WLH02] se présentent plutôt sous forme de sandwich (fig. 6.3, p. 158). D'autres

possèdent des moteurs déportés sur le poignet et une transmission par câbles en nylon [STC05]. Un afficheur de grande dimension ( $64 \times 64$ ), avec un moteur en rotation permettant un mouvement linéaire pour chaque indenteur par vissage/dévisage, a été proposé pour afficher des images en relief pour les aveugles. Dans cette catégorie, on peut également citer la méthode qui consiste à attacher des aimants sur la peau de la main et à les attirer ou repousser en fonction du champ magnétique induit par le courant circulant dans les bobines [ATS98] comme le montre la figure 6.4.



Fig. 6.1 – Tactor C2

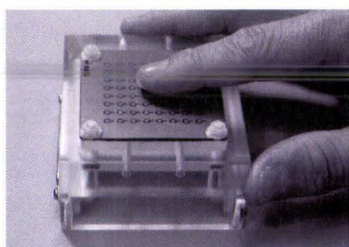


Fig. 6.2 – VITAL

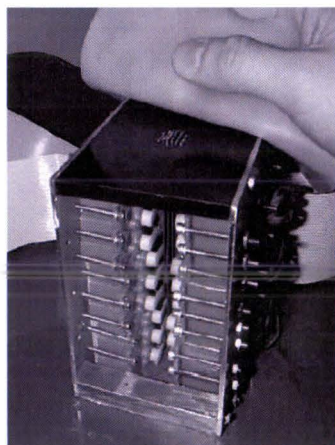


Fig. 6.3 – Interface à moteurs radiocommandés à structure étagée

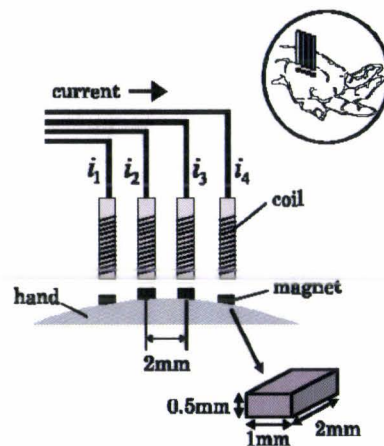


Fig. 6.4 – Attraction ou répulsion d'aimants attachés sur la peau

#### Matériaux électroactifs :

Technologie piézoélectrique : les actionneurs piézoélectriques sont utilisés dans les périphériques haptiques pour générer des vibrations à haute fréquence (dans la bande passante du système sensoriel) de petite amplitude. Dans cette catégorie, l'Optacon (fig. 6.5, p.159) est une figure emblématique. Proposé par Linvill et Bliss [LB66] et commercialisé en 1971, il utilise une superposition de 6 rangées de 24 poutres piézoélectriques en flexion. L'université d'Exeter [SC02] a également conçu une matrice de la sorte (fig. 6.6, p.159). Cependant un arrangement circulaire en 5 couches permet l'utilisation de bilames plus larges et donc plus solides qui peuvent subir des déformations de plus grande amplitude. Ainsi, la bande passante est améliorée par rapport à celle de l'Optacon [SC02]. En 1987, Van Doren et al. [VPV87] proposent un assemblage de 88 plaques de telle sorte que les éléments (9 éléments représentés sur la fig. 6.7, p.159) subissent une elongation dans la direction de polarisation et donc une diminution de hauteur ( $17\mu\text{m}$ ). Dans cette publication on précise qu'une onde progressive discrète est réalisable, ce qui le positionne aussi comme dispositif capable de cisailer la peau. Un empilement de céramiques piézoélectriques (fig. 6.8, p.159) ainsi qu'un système d'amplification du mouvement à deux leviers peut permettre des déplacements de 1.6 mm sur un effecteur final [FBD04]. Des chercheurs ont montré qu'avec un arrangement octogonal de matrices de transducteurs piézoélectriques (fig. 6.9, p.159), la pression de radiation en surface peut produire un champ de contrainte variable sur la peau [IS06].



Fig. 6.5 – Optacon™



Fig. 6.6 – Afficheur tactile piézoélectrique large bande (20-400Hz)

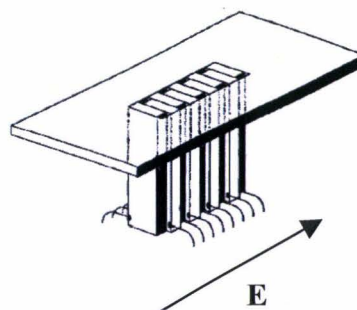


Fig. 6.7 – Stimulateur tactile constitué de 88 éléments piézoélectriques alignés

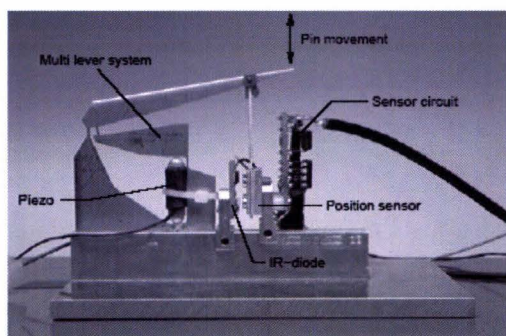


Fig. 6.8 – Système combiné utilisant un empilement de cristaux piézoélectriques

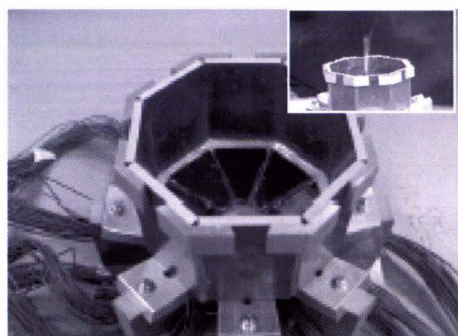


Fig. 6.9 – Transducteur à ultrasons

Alliages à mémoire de forme : afin d'imposer des déformées à petite échelle sur la peau suivant une ligne, des dispositifs à base de fils en alliage à mémoire de forme ont été proposés pour indenter la peau dans la direction normale [WPFH97]. Ici l'originalité des travaux repose surtout sur l'intégration d'un dispositif de refroidissement qui permet d'améliorer la bande passante des actionneurs. Une intégration séduisante de ces actionneurs sous forme de ressorts antagonistes a été proposée très récemment par Velasquez et al. [VPW06].

Fluides électro-rhéologiques : une matrice constituée de poches emplies de fluide électro-rhéologique peut permettre de distribuer spatialement des forces normales sur la pulpe du doigt qui précontraint alors le dispositif. Cette opération est effectuée grâce à une modification locale de la viscosité sous l'action d'un champ électrique ce qui entraîne le ressenti d'une rigidité variable sur la pulpe du doigt. Cependant, des progrès doivent encore être accomplis en termes de précision [THV96]. Ainsi la figure 6.10 présente un périphérique à 25 blocs mesurant chacun 11×11 mm et espacés de 2 mm.

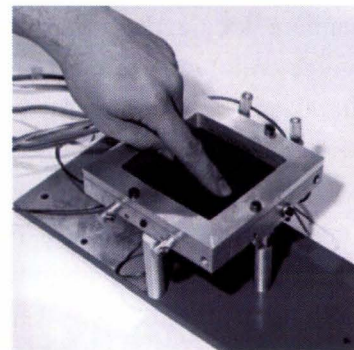
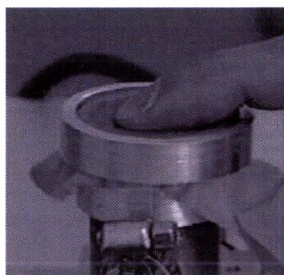
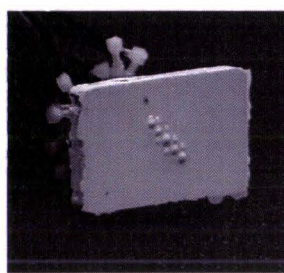


Fig. 6.10 – Interface à fluide électro-rhéologique

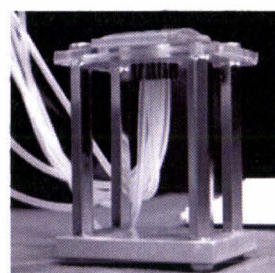
*Technologie pneumatique* : Outre les poches d'air insérées dans les gants du TeleTact Glove et emplies par un compresseur, d'autres dispositifs ont été proposés : des pistons actionnés par des moteurs [FO01] permettant un ressenti de raideur variable de membrane (fig. 6.11) ou encore des dispositifs utilisant une pompe pour expulser [CLF92] ou aspirer de l'air grâce à des microvalves électromagnétiques binaires [MS05] (fig. 6.12 et 6.13).



**Fig. 6.11 – Softness display interface**



**Fig. 6.12 – Buses à expulsion d'air déformant une matrice de chambres en silicone**



**Fig. 6.13 – Dispositif de succion localisée**

### **Cisaillement :**

La stimulation tangentielle est pertinente car, comme nous l'avons largement montré dans cette étude, elle est présente dans l'activité d'exploration du toucher latéral. Elle est interprétable physiologiquement [PCS02] et pourrait ainsi apporter plus de réalisme aux interfaces homme-machine. Ainsi des dispositifs produisant des forces de cisaillement sur la peau ont été proposés. Parmi ceux-ci, il est intéressant de constater qu'il y a eu deux approches de conception. La première consiste à faire ressentir un glissement variable lié à l'interaction doigt surface. La seconde vise d'avantage à permettre la perception de détails isolés.

*Technologie électromagnétique* : Du dispositif expérimental à rouleau (fig. 6.14, p. 161) de Salada et ses collègues [SVC04] au « Slip Aesthesia » (fig. 6.15, p. 161), un périphérique 2D d'étirement de la peau utilisant des rouleaux miniatures en rotation au contact [TH05], les moteurs à courant continu sont utilisés pour cisailer la peau comme lorsqu'elle glisse sur une texture lisse. Ils peuvent aussi servir à actionner des aiguilles étirant la peau (fig. 6.16 p. 161) de manière locale dans deux directions [DFZ05]. Des actionneurs électriques à bobine mobile (voice-coils) ont été aussi utilisés pour étirer des barres de 0.8 mm (fig.6.17 p. 161) espacées de 1 mm dans la direction tangentielle avec une amplitude maximale de 100  $\mu\text{m}$ . Pour ce dispositif, la perception de la rugosité augmente avec l'amplitude et la fréquence des stimuli [TMM02]. Des pots vibrants peuvent être utilisés pour exciter des plaques minces (fig. 6.18 p. 161) et créer des ondes stationnaires semi-sinusoïdales en leur surface jusqu'à un point de séparation, où l'onde s'amortit ensuite de manière exponentielle. Ainsi, il est possible de déplacer ce point et de moduler le signal en amplitude pour permettre un ressenti de glissement variable dans la direction tangentielle [NMY98]. De manière quasi analogue, mais cette fois ci avec deux transducteurs de Langevin à ultrasons résonant à 75 kHz, Watanabe [WF95] et ses collègues excitent une poutre à

ses extrémités. Le matériau en résonance subit des propagations d'ondes de déformation stationnaires. Au contact, l'air se comprime entre le doigt et la poutre, ce qui permet le contrôle du coefficient de glissement.

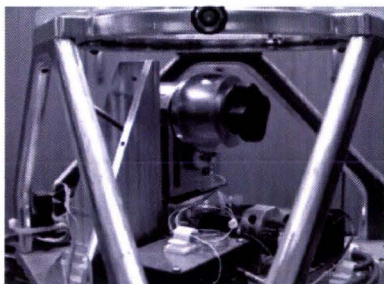


Fig. 6.14 – Dispositif d'étude de la perception du glissement



Fig. 6.15 – « Slip Aestheasis »

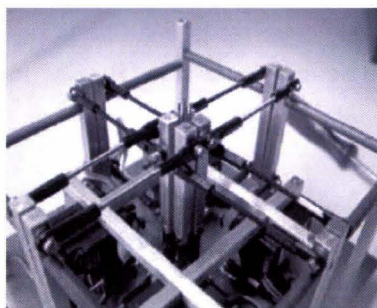


Fig. 6.16 – Le « SFD » (Shear force Display ou afficheur de forces de cisaillement)

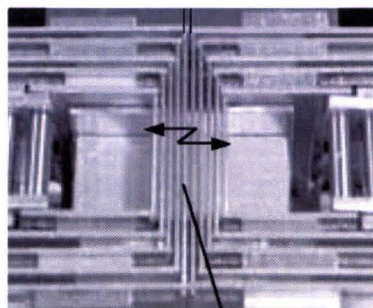


Fig. 6.17 – Dispositif d'étirement de la peau dans la direction latérale

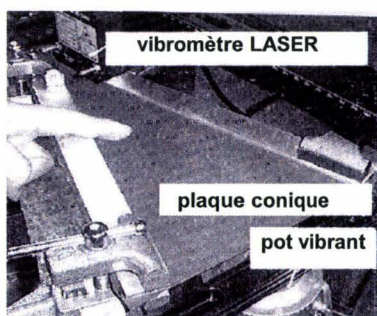


Fig. 6.18 – Ondes élastiques se propageant dans une plaque dont la largeur décroît graduellement

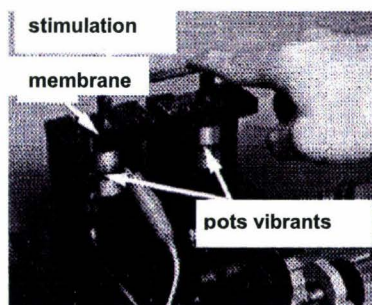
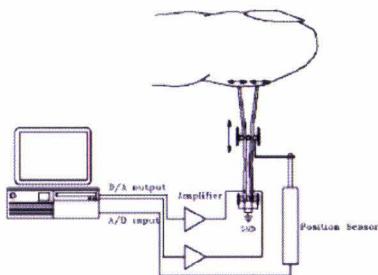


Fig. 6.19 – Utilisation de deux pots vibrants pour permettre l'infiltration d'air sous pression au contact et créer ainsi une lubrification

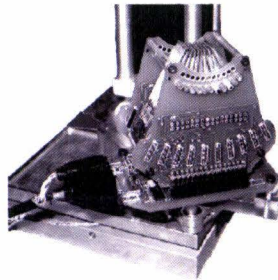
*Matériaux électroactifs :*

Actionneurs piézoélectriques : Dans la littérature, les bimorphes piézoélectriques ont été utilisés de manière initiale pour stimuler la peau dans la direction tangentielle. Si ces actionneurs sont prometteurs, leur interaction avec la peau est souvent mal contrôlée. C'est la raison pour laquelle Wang, Hayward et Smith ont cherché à offrir une impédance variable [WHS04] à un dispositif d'étirement / compression de la peau (fig. 6.20). Ce petit dispositif permet d'étudier les perceptions, mais aussi le comportement biomécanique à des contraintes de cisaillement élémentaires. Parallèlement, cette équipe vient de proposer un nouveau [WH06b] « STRESS » à  $6 \times 10$  actionneurs (fig. 6.21) conçu cette fois de façon modulaire (voir aussi [PH03]).

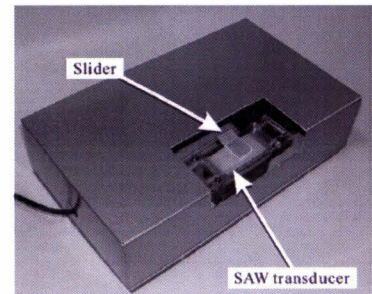
Des dispositifs à onde acoustique de surface (SAW) ont été également proposés (fig. 6.22). Des transducteurs interdigitaux excitent un substrat piézoélectrique en surface par une onde de Rayleigh. Une onde stationnaire est générée sur le dispositif en utilisant la superposition de deux ondes progressives qui présentent des formes de trains d'onde. La fréquence de ces trains d'onde permet de créer un frottement variable [NTMb01]. Comme nous l'avons récemment proposé, il est également possible de faire varier l'état de compression de l'air introduit entre un doigt en mouvement et un moteur à onde progressive. Ceci permet de cisailier la peau de manière variable et l'exploration presque (le contrôle n'est pas total) active de la texture fine [BGSM06].



**Fig. 6.20 – Stimulation latérale de la peau à impédance mécanique contrôlable**



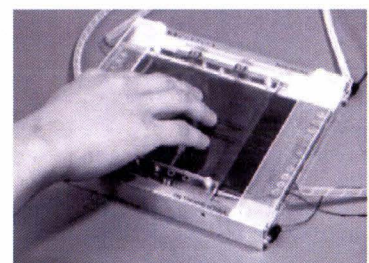
**Fig. 6.21 – STRESS<sup>2</sup> au design modulaire monté sur un pantographe**



**Fig. 6.22 – Afficheur tactile SAW**

Actionneurs électrostatiques : dans le but de générer un frottement de manière non localisée sur la pulpe, il est possible de charger un stator et un film mince avec deux distributions sinusoïdales de potentiels électriques (fig. 6.23). Leur interaction génère une force de poussée sur le patin [YIT01].

Actionneurs pneumatiques : absents de la littérature.



**Fig. 6.23 – Afficheur tactile électrostatique à fin film**

Voyons à présent quelles sont, à partir des études multidisciplinaires de la littérature auxquelles nous avons été confrontées, mais aussi de nos résultats expérimentaux, quelles sont les recommandations de design qui pourraient être apportées aux afficheurs.

## **6.2 Recommandations de design aux afficheurs de texture (fine)**

Dans la première partie consacrée à l'analyse des connaissances en toucher de texture, nous avons rappelé que l'exploration haptique peut être considérée comme un processus d'extraction d'indices tribologiques, rhéologiques et thermiques. Si les avancées technologiques présagent de propositions imminentes de stimulateurs sophistiqués, permettant de simuler des rugosités, élasticités ou conductivités thermiques de surfaces virtuelles, aucune proposition existante ne semble encore prometteuse pour l'accès au ressenti de la texture haptique fine, et encore moins à la texture fibreuse. Nous envisageons plusieurs explications à cela.

D'abord, plusieurs primitives haptiques sont impliquées et leur contribution relative à la sensation haptique est mal comprise, même sur échantillons réels. Ceci est particulièrement vrai pour les déterminants à caractère tribologique, tant il est difficile de mesurer et de modéliser l'évolution au contact et la participation en tant qu'entrées au système somesthésique. Ensuite, il est technologiquement difficile d'opérer la fusion transparente de ces diverses dimensions sensorielles [BHA04]. Enfin, les recherches dans ce domaine s'inspirent toujours trop des technologies développées pour la « substitution sensorielle » (utilisé par abus de langage pour addition de couplage sensorimoteur comme il est précisé dans [HSG00]). On pense souvent que si un stimulateur n'a pas le potentiel de permettre la perception d'une texture, il pourra au moins être exploité comme outil de communication en proposant des sensations diverses. Aussi, ceci ralentit cette quête de texture fine simulée haptiquement puisque nous devrions plutôt utiliser ces stimulateurs pour comprendre en quoi leurs entrées sont insuffisantes par rapport à celles permises par l'interaction réelle.

Les sous-sections qui suivent présentent des recommandations de design au concepteur inspirées de l'étude présentée dans les chapitres précédents.

### **6.2.1 Développer les techniques de mesure des grandeurs physiques du contact**

Avant toute chose, il est essentiel de s'intéresser autant aux solutions pour mesurer le mouvement des membres aux diverses échelles d'intérêt du toucher latéral qu'aux effecteurs actionnant la peau.

On ne peut pas envisager de produire des interactions réalistes et tangibles tant que les événements mécaniques du cas réel à simuler ne sont pas identifiés.

Il est aussi nécessaire de commencer à maîtriser l'erreur introduite lors de la simulation d'une interaction à petite échelle. Nous pourrions ainsi accéder à la possibilité d'asservissement de futures propositions d'actionneurs capables d'opérer dans ces gammes spatiotemporelles.



## 6.2.2 Proposer des solutions ergonomiques

Jusqu'à présent, les études n'ont jamais accordé d'importance à la posture des sujets dans le dimensionnement des solutions. Dans un contexte de simulation de texture, le contrôle du mouvement dirigé de la procédure exploratoire du toucher latéral jouant un rôle prépondérant, tout obstacle à ce processus est contre-indiqué. Dans cette étude, nous avons suggéré que dans un contexte d'interaction bureautique, avant bras posé, une zone d'affichage carrée mesurant environ 10 centimètres d'arête suffise à contenir les trajectoires du mouvement pour la plupart des sujets (voir fig. 2.16 p. 59). Pour un afficheur collé en permanence à la pulpe, on pourra se référer aux résultats de l'annexe A pour que l'utilisateur ne ressente pas la limite des moyens technologiques, mais seulement une surface active.

Plus généralement, nous préconisons au moins une étape de dimensionnement de l'espace de travail, issue de données anthropomorphiques ou de mesures cinématiques.

La question de la robustesse du dispositif et de la sécurité de l'utilisateur est aussi importante. On ne peut pas proposer un système fragile, sujet aux pannes en espérant qu'il prenne de l'importance dans un contexte d'utilisation quotidienne [HSG00]. On ne peut pas non plus exposer l'utilisateur aux risques d'électrocution, de blessure mécanique ou même de perte de sensibilité cutanée par une exposition abusive à des contraintes mécaniques ou thermiques surdimensionnées. Comme le suggèrent le tableau 2.2 et la figure 2.12 situés en page 53, notre étude a d'une part montré que les sujets n'exercent pas des forces importantes sur la surface quand ils interagissent avec la texture fine (maximum de 5.48 N dans notre étude) et d'autre part, mis en évidence que la vitesse du doigt même instantanée peut être rapide, mais n'excède guère, dans l'usage,  $30 \text{ cm.s}^{-1}$ .

La prise en compte des critères esthétiques doit résoudre une apparente contradiction (inspiré de la substitution sensorielle : limites et perspectives [HSG00]) : être transparente tout en étant affordante. Le dispositif doit savoir se faire oublier afin de ne pas distraire l'utilisateur ou lui proposer une apparence visuelle inadaptée aux stimuli qu'il propose. Il doit révéler au sujet ses potentialités d'interaction dans l'usage. On le voit, si l'utilisateur ne ressent pas la propriété physique qu'il s'est proposé d'explorer, il y a de fortes chances pour qu'il effectue un usage détourné du stimulateur en cherchant d'autres propriétés physiques, mettant en œuvre, au besoin d'autres stratégies gestuelles, potentiellement incompatible avec les moyens technologiques.

## 6.2.3 Utiliser des résolutions en amplitude et résolutions spatiales appropriées

Pour percevoir la texture, tant réelle que simulée, il est nécessaire de tirer parti d'une bonne précision dans la définition de sa hauteur. Nos expériences du chapitre 4 nous ont montré que nous étions capables de discriminer des différences d'amplitude de  $70 \mu\text{m}$ . Tan et ses collègues [TATK06] suggèrent même dans une recherche récente que des différences d'amplitude de  $3.9 \mu\text{m}$  (longueur d'onde de  $2.5 \text{ mm}$  et amplitude de référence de  $50 \mu\text{m}$ ) peuvent être ressenties avec le doigt nu pour des textures sinusoïdales. On retrouve les ordres de grandeur énoncés par

Srinivasan, Lamotte, Whitehouse [LW86][SLW00]. Il faut donc maîtriser la stimulation à l'échelle micrométrique.

D'un point de vue spatial, un espacement minimal de 1 mm entre les effecteurs finaux des afficheurs matriciels a souvent été recommandé. Cette valeur rapportée par Philips and Johnson [PJ81] dans une tâche *statique* de type GO, s'explique surtout par la densité spatiale des disques de Merkel, au nombre de 100 par cm<sup>2</sup>.

Pourtant, cet interespacement n'est plus forcément pertinent pour le cas dynamique, où l'acuité spatiale de notre système sensoriel est bien meilleure. Loomis l'a montré en 1979 [Loo79] puisque la localisation d'un point peut être mesurée avec une précision spatiale de 150 µm. Ce résultat a été confirmé par Philips and Johnson [PJ81], une ligne de largeur 200 µm peut être détectée. Notre expérience du chapitre 4 suggère même des valeurs en dessous de 100 µm pour des crans espacés de 250 µm. Le motif de l'empreinte et sa périodicité spatiale semblent pouvoir lui conférer une excellence particulière à échantillonner les singularités de petite taille.

Il est donc nécessaire de bénéficier d'afficheurs avec une résolution spatiale élevée. Nous déconseillons donc l'usage d'afficheurs à aiguilles en cas de commensurabilité avec les dermatoglyphes de l'empreinte. Par leur diamètre ou forme de leur extrémité, ces solutions pourraient générer un frottement local conséquent sur la pulpe, dont la sensation pourrait être difficilement compensée.

#### 6.2.4 Penser à une organisation multicouche ou large bande passante

Nous l'avons vu à plusieurs reprises dans les chapitres 3, 4 et 5, la dynamique des mouvements du toucher de texture est caractérisée par la présence de forces d'interaction au contact à plusieurs échelles (se rappeler aussi de la figure 1.2 en page 11). La superposition de dispositifs peut donc être intéressante dans l'éventualité où leur faible bande passante les limiterait à un travail à une échelle. De plus, comme d'autres indices, rhéologiques ou thermiques peuvent toujours être intéressants à proposer conjointement à la texture fine, même s'ils sont occultés [HBKY00] lors de la discrimination derrière la rugosité, l'approche multicouche paraît particulièrement pertinente. Dans cet état d'esprit, nous avons vu le VITAL qui propose un retour thermique en plus d'un retour cutané [BOM04] et des associations de dispositifs [WH06b][DJDH04]. Compte tenu de la cohérence de la décomposition multiéchelle avec celle de nos résultats des chapitres 3 et 4, nous avons retenu l'intérêt de l'approche de Drif, Citérin et Kheddar [DCK04] qui, par opposition à l'ensemble des travaux existants, ont proposé en plus d'un retour d'effort à l'échelle de l'espace de travail des membres, deux échelles distinctes de stimulation : l'une déformant la peau dans son ensemble par une matrice de picots, qu'ils ont appelé niveau de rugosité et l'autre opérant une déformation superficielle par une haute densité d'actionneurs appelé niveau de texture. Les actionneurs utilisés sur la dernière couche sont des petits vibreurs qui ne permettent cependant pas de cisailer la peau en surface. L'idéal serait de proposer une commande multiéchelle (plusieurs modulations en amplitude) sur un générateur de contraintes sur la peau à large bande passante spatiotemporelle.

### 6.2.5 Éviter les perturbations des forces de réaction modales du stimulateur.

Notre travail nous a permis de comprendre l'importance de la rhéologie du matériau simulé qui détermine aussi les forces d'interaction au contact. Si le doigt est amené à frotter un afficheur tactile, il subira nécessairement des forces de réaction modales à sa surface ou forces inertielles, comme nous l'avons étudié au chapitre 4. Celles-ci seront en relation avec le comportement de la structure mécanique de l'afficheur. Même si nous avons montré que l'intensité et les caractéristiques fréquentielles de ces forces ne déterminent pas la perception de la rugosité avec le doigt nu, des études ont suggéré qu'en l'absence d'indices tactiles fiables, elles peuvent interférer avec le jugement [Led79]. Ainsi, il est préférable de rendre plutôt les forces inertielles du matériau simulé sur le doigt, que de proposer celles exercées par un afficheur. Pour cela soit on évite tout contact entre le doigt et l'afficheur (voir solution de l'équipe d'Asamura [ATS98], figure 6.4 page 158 ou encore la notre où un gap ou coussin d'air est introduit [BGMS06]) ou soit on s'assure que ce dernier possède un comportement modal identique à celui du matériau dont il faut simuler la texture.

### 6.2.6 Respecter la nature transitoire des événements

Il est important de respecter les aspects stochastiques du toucher de texture fine. Dans notre étude, nous avons montré que les contraintes sur la peau du toucher latéral ne sont pas de nature périodique, car le fait de changer simplement l'orientation des trajectoires du mouvement ou encore l'angle d'inclinaison du doigt sur la surface, modifie complètement les grandeurs dynamiques au contact. Si des périodicités sont apparues dans cette étude, c'est lorsque nous avons imposé une adjacence entre les motifs de texture, des vitesses et force d'appui constantes. Ce cas très particulier d'interaction, visant à une meilleure compréhension des phénomènes, n'est pourtant pas généralisable.

Il pourrait être intéressant de tenir compte des aspects transitoires du toucher latéral. Pour cela nous pourrions proposer un schéma de stimulation en nous inspirant de l'approche « Event-Based Haptics » de Hwang et al. [HWN04], mise en place pour améliorer le réalisme du retour des forces lors du tapotement. Leur idée était de sélectionner des formes transitoires de forces d'excitation et de les déclencher sous forme d'événements lorsque les impacts se produisent entre le doigt et la surface. Nous pourrions reprendre cette idée de gestion du rendu des forces de collision mais cette fois-ci appliquée aux aspérités en fonction d'un critère : la commensurabilité. Sur la figure 6.24 page 167, nous proposons une représentation schématique de notre proposition. Pour tenir compte permettre un geste aléatoire à l'utilisateur, les positions de la phalange, de la pulpe et même du motif de l'empreinte pourraient être mesurés. À partir de cette donnée, on pourrait alors calculer des matrices contenant les indices spatiaux d'intensité d'emboîtement. Les modèles mécaniques à plusieurs échelles, mais aussi les études de psychophysique et de neurophysiologie pourraient nous enseigner à partir de quel seuil de pénétration d'un cran en défilement, une contrainte de cisaillement sur l'empreinte détermine le ressenti tactile et doit être

simulée. Après seuillage des coefficients, à partir d'une librairie de transitoires, nous pourrions générer un champ de contrainte caractéristique sur la peau à l'échelle d'emboîtement concernée et la vibration transitoire du matériau simulé qui lui est associée.

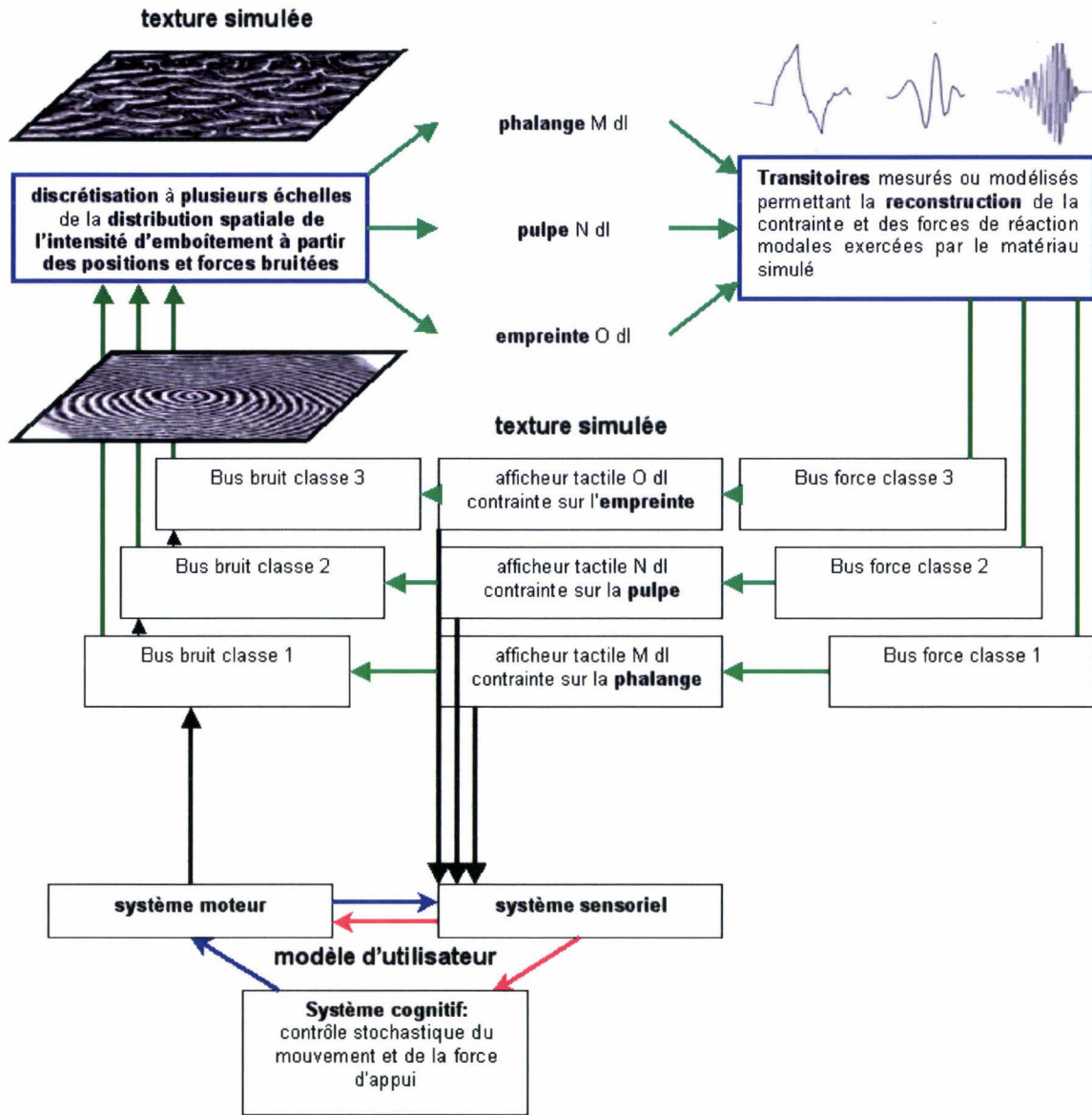


Fig. 6.24 – Proposition de schéma de stimulation multiéchelle basée sur l'événement et compatible avec un processus d'exploration stochastique

### 6.2.7 Proposer des solutions de cisaillement de l'épiderme à l'échelle de ses crêtes

Les dispositifs permettant de cisailier la peau localement, par exemple, le STRESS [PH03][WH06b] monté sur un pantographe en figure 6.21 page 162 ou le SFD [DFZ05] présenté en figure 6.16 page 161 sont particulièrement intéressants. Il est important de pouvoir modifier le

coefficient de frottement localement sous la pulpe ou encore faire en sorte qu'il existe des gradients spatiaux de vitesse relative entre le doigt et la texture prononcés. Aussi, sur le critère du contrôle local de l'étirement de la peau, ces dispositifs constituent des solutions particulièrement cohérentes avec l'expérience pour aboutir aux requis de stimulation de la texture fine. C'est d'ailleurs le design du STRESS qui avait motivé l'expérience B du tableau 3.1 situé en page 66 [LH03], expérience qui nous avait amené à faire l'hypothèse de la participation d'autres mécanismes vibratoires au contact.

### **6.3 Perspectives**

Les performances de discrimination de la texture sont reliées à la production d'une exploration haptique par l'homme, gérée par les systèmes sensoriels, cognitifs et moteurs. Pour être efficaces, les interfaces haptiques de simulation de la texture doivent intégrer les contraintes de conception imposées par le fonctionnement de chacun des sous-systèmes. Aussi, on peut les voir comme des systèmes symétriques à la boucle haptique (fig. 1.1, p. 7) dont l'homme bénéficie. Ceux-ci peuvent être équipés de capteurs pour acquérir l'état de déformation des membres au contact, d'unités de traitement déterminant les consignes de contraintes à imposer sur la peau à partir de modèles d'interaction tribologiques appropriés à la texture simulée et d'actionneurs déformant la peau. On le voit, pour donner aux dispositifs toutes les fonctions d'interfaces perceptuelles de la texture haptique, il est à présent nécessaire d'aller plus loin dans la compréhension de la « psychotribologie du toucher » ou de l'influence sur la perception humaine de forces d'interactions élémentaires caractéristiques du contact glissant (frottement, adhérence, etc.) aux plus petites échelles.

Dans nos futures recherches, nous aimerions entreprendre une démarche méthodique mêlant biomécanique, psychophysique et neurophysiologie. Par une approche minimaliste, il serait intéressant d'identifier les primitives des perceptions du contact. En travaillant à l'échelle d'intérêt de Srinivasan, LaMotte et Whitehouse [SLW00][LS86], mais aussi de l'équipe d'Hayward [WH06][LH03], nous examinerons les spécificités des contraintes/déformations sur la peau qui provoquent la perception du glissement, puis du frottement et enfin du relief de formes microscopiques tout en analysant les événements dans les voies somesthésiques. Il nous faudra cerner la mesure dans laquelle nous pouvons considérer que des stimuli aux petites échelles sont équivalents d'un point de vue neurophysiologique puis psychophysique pour caractériser les filtres et simplifier la stimulation.

Une investigation préliminaire sur les instruments s'impose. Notre stimulateur tactile à onde progressive [BGSM06] constitue un bon départ dans ce travail car son action tend à supprimer la sensation du relief puis du frottement en introduisant un gap d'air. Mais les capteurs, techniques de mesure, actionneurs et méthodes de stimulation beaucoup plus transparents et à bande passante beaucoup plus large seront aussi au centre de nos préoccupations. Cette recherche nous permettra peut-être de maîtriser la dimension microscopique du toucher latéral, écueil certain de la science haptique, y compris pour le challenge de la texture simulée.

## Conclusion

Notre travail visait à expliquer la contribution du frottement imposé par le mouvement volontaire aux mécanismes perceptifs de la texture.

En premier lieu, nous avons regroupé et structuré les principaux résultats de psychophysique, de biomécanique et de neurophysiologie requis pour l'étude du toucher de texture. Cette synthèse très multidisciplinaire nous a permis d'aboutir à une compréhension d'ensemble des mécanismes impliqués. Toutefois, nous avons vu que cette forme d'exploration haptique mérite d'être approfondie pour plusieurs raisons.

D'abord, le contrôle du mouvement volontaire du toucher de texture, appelé toucher « actif » n'a pas encore été vraiment caractérisé. Ensuite, la nature de son apport en termes d'entrées sensorielles est encore obscure : la nature de la dépendance spatiotemporelle des codes candidats à la perception de la rugosité n'est pas comprise car la forme des contraintes/déformations à différentes échelles résultant du frottement est mal identifiée. Enfin, il nous a semblé important de mieux cerner la contribution de la topographie de l'empreinte digitale à la perception de la texture.

Un deuxième chapitre nous a permis de commencer à répondre au problème ainsi décomposé. Nous y avons caractérisé la cinématique de la pulpe du doigt pour vérifier la présence systématique de la procédure exploratoire sur texture fine. Puis, nous avons formulé une hypothèse d'invariants dans la stratégie de contrôle du toucher de texture fine. Nous nous sommes alors interrogés sur l'existence d'un contrôle déterministe du mouvement : un toucher dans une direction privilégiée qui aurait pu permettre une meilleure sensibilité des mécanorécepteurs ou davantage d'ergonomie, une force normale gardée constante qui aurait pu aider à la détection des non-uniformités ou encore le maintien d'une vitesse identique qui aurait favorisé l'émergence de codes temporels cycliques au contact.

Afin de proposer des conditions expérimentales qui soient ergonomiques, transparentes et compatibles avec l'environnement bureautique, nous avons proposé un capteur extensométrique à trois degrés de liberté. Celui-ci a permis d'enregistrer les trajectoires du mouvement d'exploration du doigt et la force normale d'appui au contact de textures fines.

Les résultats de cette campagne de mesure du mouvement à l'échelle du membre nous ont permis de vérifier la présence systématique d'un geste de badigeonnage, qui est en apparence aléatoire au raison des caractéristiques de ses trajectoires, vitesse et force normale déployées dans une zone restreinte de la texture.

À la fin de cette expérience, nous ne pouvions ni conclure sur un rôle de fenêtre, visant à élargir le champ exploré puisque l'aire de travail restait restreinte, ni favoriser l'hypothèse de l'aide à l'élaboration d'un code temporel consistant pour la perception de la rugosité, puisque les paramètres mesurés semblaient aléatoires, reflétant ainsi un processus d'exploration stochastique.

Pour expliquer ce comportement à l'échelle des membres par des contraintes à l'échelle de la peau, nous avons concentré nos recherches sur les mécanismes du mouvement au contact.

Dans le troisième chapitre, nous avons fait l'hypothèse suivante : quand deux textures ont des aspérités observables à une même échelle, elles peuvent interagir ensemble et s'imposer mutuellement des forces complexes.

Nous avons mis en place une technique de mesure microphonique. Afin d'obtenir une image intéressante des variations de pression superficielles des structures informatives sur les phénomènes tribologiques d'interaction, nous avons pris trois précautions. Nous avons d'abord vérifié l'effet des interférences de rayonnement causées par la géométrie du doigt, puis contrôlé l'écho, mais aussi utilisé un stimulateur tactile à ultrasons peu bruyant dans l'audible.

Lors des mesures, le doigt était immobilisé dans un support mécanique et frotté par une roue crantée en rotation à force d'appui normal et de vitesse contrôlées. Les crêtes de l'épiderme et les motifs de la texture étaient adjacents entre eux.

La transformée continue en ondelettes des signaux a mis en évidence un contenu vibratoire significatif à haute fréquence. Celui-ci reflétait la participation des dermatoglyphes de l'empreinte aux interactions de contact. De plus, nous avons trouvé un contenu vibratoire fonction du sens du mouvement de la roue et des relations non linéaires avec la vitesse.

Sous réserve de preuves de la participation effective de l'empreinte à la tribologie du contact, et de contenu vibratoire identique sur la peau, la nature variée des phénomènes vibratoires au contact d'une même texture nous a amené à remettre en question la théorie duplexe de la perception de la rugosité. Nos mesures suggéraient un frottement de nature complexe et des vibrations associées dont le contenu ne reflétait pas les caractéristiques de texture de manière fiable. En décrivant les différents types d'excitation que la peau peut subir en interaction avec une surface, nous avons mis en évidence qu'il était préférable d'identifier celles qui contribuent vraiment à l'information de rugosité. Nous nous sommes alors intéressés à la commensurabilité entre textures.

Au quatrième chapitre, nous avons apporté des preuves expérimentales de la participation de l'empreinte aux mécanismes dynamiques, puis analysé l'influence de l'emboîtement relatif entre structures sur les perceptions.

Dans une première expérience, nous avons utilisé une vibromètre LASER Doppler pour valider la présence d'un contenu vibratoire transitoire sur la peau fortement dépendant de l'empreinte. Les résultats n'ont pas permis de mettre en évidence des phénomènes dynamiques différents à l'échelle de l'empreinte en fonction de l'angle entre la phalange distale et la texture. Toutefois, les variations des forces inertielles imposées à la phalange distale nous ont convaincus de l'importance de l'évolution dynamique de la posture sur la vibration au contact ; et qu'en cela, la vibration d'ensemble est bien incapable de représenter un code fiable de rugosité tant par ses aspects intensifs que temporels.

Pour étudier l'effet spatial d'emboîtement dans des conditions où les textures au contact ont des dimensions superficielles similaires, nous avons mis en oeuvre une expérience

psychophysique d'estimation de rugosité en fonction de l'orientation de rainures de faible hauteur, s'emboîtant différemment dans l'empreinte. Celle-ci a confirmé nos hypothèses : plus les rainures épidermiques sont alignées avec celles de la texture fine et la pénétration dans les structures de la peau prononcée, plus les surfaces sont estimées comme rugueuses.

Ensuite, nous avons abordé les aspects intensifs et temporels de la vibration au contact par l'étude de l'influence de la commensurabilité sur les forces inertielles imposées sur la peau. Une description du toucher latéral en terme d'interaction dynamique et tout à fait justifiée.

En utilisant seulement une fine lame, puis une texture avec une ligne, nous avons pu mettre en évidence l'excitation de la texture par l'empreinte, sa vibration résultante et la présence de forces d'inertie dans les directions normales et tangentielles agissant sur l'ensemble du doigt au contact. Toutefois, nous avons conclu encore une fois à l'absence de relations systématiques entre phénomènes vibratoires de nature déterministe et la perception de la rugosité. En effet, avec les plaques, ni les changements en fréquence, ni en intensité de la vibration transmise à l'ensemble de la pulpe du doigt ne sont suffisamment prononcés pour expliquer de façon fiable les jugements de rugosité des sujets. Nous avons enfin enregistré et rejoué la vibration de surface pour isoler son retour haptique d'indices spatiaux. De manière cohérente avec les observations précédentes, l'absence de cisaillement localisé sur l'empreinte ne permet pas de reconnaître une texture simulée.

Ces résultats nous éclairent sur la stratégie de badigeonnage du doigt sur la texture. Nous pouvons l'interpréter comme un contrôle des interactions superficielles entre textures par une recherche d'emboîtement optimal. L'empreinte favorise un processus de localisation des contraintes grâce à son anisotropie et des reliefs spatialement cycliques sur certaines régions.

Dans un cinquième chapitre, l'analyse microphonique sur les échantillons du SENSOTACT<sup>®</sup> nous a d'abord permis de vérifier l'hypothèse d'un fonctionnement totalement stochastique du processus d'exploration par la nature transitoire et aléatoire des événements vibratoires. Ensuite, nous avons mis en avant que le frottement était principalement décomposable en deux classes de phénomènes reliés à deux processus distincts. Nous avons précisé notre contribution et ses limites : deux dimensions de jugement, le relief et le frottement, permettent d'accéder à la perception de la rugosité. La portance de la texture ou sa capacité à maintenir la peau sur une même ligne de référence à l'échelle de la pulpe du doigt constitue, à notre sens, un critère de distinction intéressant entre texture fine et grossière. Tant que la peau ne subit pas de macrocourbure, l'emboîtement relatif entre détails de surfaces, qui est permis par le mouvement dirigé, est un déterminant d'interaction fiable pour expliquer les jugements de rugosité. À partir du moment où la peau pénètre dans la texture, il semblerait que le relief, causant des phénomènes dynamiques à basse fréquence lorsqu'il y a mouvement, contribue davantage au jugement.

Le dernier chapitre de cette thèse présente un état de l'art non-exhaustif des propositions d'afficheurs tactiles et une valorisation des contributions de ce travail à la création d'un nouveau cadre de référence de conception de simulateurs de texture. Nous y avons d'abord souligné



l'importance de conditions ergonomiques d'exploration. Ensuite, nous avons proposé de respecter la nature multiéchelle de l'interaction du toucher de texture dans un contexte de conception. Il serait avantageux d'offrir l'accès à des grandeurs micrométriques, tout en restituant fidèlement les contraintes/déformations sur le système musculo-squelettique, la pulpe du doigt et l'empreinte. Enfin, nous proposons un schéma de rendu haptique de texture virtuelle décrivant la création d'une distribution de contraintes transitoires sur la pulpe en fonction d'un calcul spatial d'emboîtement.

### Contributions significatives

Nous avons proposé des solutions de capteurs et de traitement du signal très variées, pour expliquer par la mesure et l'analyse des résultats d'expériences psychophysiques. Ceci nous a permis de montrer que les vibrations ne déterminent pas la perception de la rugosité et qu'en cela, elles ne motivent pas le mouvement. Lors de la discrimination de texture fine, le mouvement volontaire sert plutôt à faire l'expérience d'emboîtements variables entre deux textures, ce qui favorise la saillance de forces d'interaction au contact. Si l'on prend un peu de recul par rapport aux méthodologies et résultats particuliers, les apports principaux au domaine de l'haptique peuvent être envisagés à trois niveaux.

En ce qui concerne la cinématique, nous avons tout d'abord précisé un aspect stochastique de la procédure exploratoire du toucher latéral. Nous savons à présent que cette action est motivée par une recherche de conformité spatiale. Ceci permet d'expliquer les stratégies très variables des sujets en précisant le stéréotype du toucher latéral proposé par Klatzky et Lederman en 1987, et suggère un suivi de contour dans l'étude de 2002 menée par Smith, Gosselin et Houde.

Ensuite, nous avons montré toute l'importance des crêtes épidermiques dans les mécanismes de la perception de la texture fine, base d'une deuxième dimension participant de manière moindre au jugement de rugosité pour la texture grossière. Depuis les expériences de LaMotte, Whitehouse et Srinivasan effectuées entre 1986 et 1991, il était admis que les rainures de la peau puissent jouer un rôle déterminant dans la perception tactile d'un point, du glissement ou de la texture lorsqu'elle est micrométrique. Leur présence a permis, dans de nombreuses études, d'expliquer une acuité spatiale accrue ou encore des anisotropies haptiques révélées par des expériences psychophysiques. Toutefois, leur implication dans le cas de détails de textures commensurables, situation où l'on s'attend à ce que leur présence joue le rôle le plus significatif au contact, n'a pas été abordée : le problème du rôle du mouvement et de son apport à la perception de la rugosité était traité comme si la pulpe du doigt ne possédait pas de crêtes épidermiques. Ainsi, dans notre approche, nous avons considéré la peau comme une texture pour proposer une analyse à dimension « psychotribologique », basée sur une relation non pas d'action mais d'interaction. De cette manière, nous avons dépassé une analyse seulement fondée sur les propriétés physiques de la texture.

Enfin, nous proposons que le motif d'empreinte puisse jouer un rôle important dans le contrôle du mouvement volontaire. Nous devons adapter la forme de la texture de notre peau à celle des

surfaces de notre environnement pour mieux le percevoir. La dimension écologique de cette explication est une voie alternative aux études sur la perception de la rugosité qui favorisent les explications en termes de caractéristiques de texture, de contraintes sur la peau et de réponses des voies somesthésiques.

### Limites et perspectives

Ce problème de la perception du mouvement d'exploration de la texture à plusieurs échelles, est si complexe et multidisciplinaire qu'il nous semble, en dépit des enseignements de cette étude, extrêmement difficile d'en cerner tous les aspects et d'atteindre une compréhension complète. Ce travail nous a permis de prendre conscience des lacunes et des obstacles qu'il faudra surmonter pour aller plus loin dans cette analyse.

D'abord, il sera nécessaire d'utiliser des techniques de mesures plus appropriées pour répondre aux spécificités des phénomènes aux différentes échelles. Notre analyse est surtout fondée sur des techniques vibroacoustiques favorables à l'analyse temps-intensité. Or, la mesure du mouvement doit intégrer l'importance de la dimension spatiale dans la tribologie de contact. Il serait alors intéressant d'obtenir une mesure de la pénétration de la peau dans la texture, de contrôler le caractère superficiel de l'interaction et enfin le précieux déplacement d'ensemble du motif d'empreinte, comme l'ont proposé Levesque et Hayward en 2003. Simultanément nous pourrions essayer d'évaluer les déformées de la pulpe d'un point de vue plus macroscopique, ainsi que celles des membres. À l'échelle des crêtes épidermiques, il nous faudrait localiser les forces de cisaillement, leur direction et leur intensité, sans perturber le contact réel par des capteurs à l'interface. Même la « poussière intelligente » utilisée pour mesurer une distribution spatiotemporelle de forces au contact pourrait être encore trop invasive et le challenge technologique reste entier.

Ensuite, pour expliquer les résultats expérimentaux avec des lois de comportement, il faudrait formuler des contraintes locales sur la peau cohérentes avec la complexité tribologique du contact. Jusqu'à présent, à part quelques travaux très récents à l'échelle de l'empreinte digitale avec des stimuli simples comme ceux de Wang et al. en 2006, la majorité des contributions en biomécanique in vivo reste macroscopique et en décalage avec les aspects micromécaniques présents lors du toucher de texture. Sans cette compréhension préalable, il nous semble difficile d'évaluer les mécanismes de stimulation des voies somesthésiques et de relier des expressions de champs de contrainte à la sensation.

Enfin, une meilleure compréhension de l'évolution conjointe des paramètres de mouvements à toutes les échelles nous permettrait de mieux comprendre le fonctionnement du système haptique et de la boucle sensorimotrice.

Pour prolonger cette étude, il serait extrêmement intéressant de parvenir à mesurer puis de modéliser l'évolution temporelle de la cartographie spatiale des contraintes de compression et de cisaillement sur la pulpe, avec une résolution microscopique ; et ce, en fonction d'un critère tribologique d'emboîtement.

## Annexe A : espace de travail minimal en contact statique

Afin de définir un espace de travail minimal acceptable, nous nous sommes intéressés aux travaux visant à évaluer la taille de l'aire de contact minimale entre un doigt et une surface rigide en fonction de la force appliquée. Cependant, la plupart de ces études ne sont pas directement exploitables pour obtenir une information de design ergonomique sur la forme et les dimensions de l'aire de travail effectivement occupée par un doigt au contact.

Comme nous l'avons évoqué dans la première partie, Pawluk [Paw97] utilise un modèle de contact hertzien pour calculer les distributions en pression à l'interface de telle sorte que :

$$a = \left( \frac{3 \times PR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}}$$

avec  $a$  définissant l'aire de contact,  $P$  la force d'appui et  $R$ ,  $E^*$  respectivement des rayons de contact et module d'élasticité modifiés. Dans ces travaux, un capteur de force est utilisé pour valider le modèle. Les résultats indiquent une distribution circulaire conformément au modèle choisi.

Sérina et ses collègues ont modélisé et mesuré l'aire de contact en fonction de la force exercée sur une surface plane pour un angle de doigt de  $45^\circ$  et des appuis de 0.25, 0.5, 1, 2, 5 et 10 N [SMMR98]. Ici, le doigt est enduit d'encre et maintenu durant deux secondes sur un capteur de force, ensuite l'empreinte est encadrée par un carré dont la largeur est mesurée et élevée au carré. Le même protocole a été utilisé par des chercheurs de PERCRO Pise et de l'université Sienne mais cette fois ci pour un angle de  $0^\circ$  [BFSB04] et en utilisant l'*Image Processing Toolbox de Matlab* pour détecter l'aire de contact. Suite à ces essais, un modèle a été proposé :

$$\frac{a}{a_{\max}} = \left( 1 - e^{(-P/P'_0)} \right)$$

où  $P'_0 = 0.1101$  est un paramètre d'ajustement et  $a = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$  avec  $A$ , valeur de l'aire de contact.

Aussi, un protocole proche de celui de Sérina et de ses collègues a été repris au détriment de l'utilisation de l'*Image Processing Toolbox de Matlab* et de sa fonction *bwarea(image binaire)*. En effet, si cette méthode est plus précise car elle informe du contact réel entre rainures d'empreinte et surface, elle a tendance à sous estimer l'espace nécessaire au positionnement de la pulpe en retranchant les zones décollées dans le cas des pressions faibles. L'empreinte est encadrée par un rectangle ce qui permet d'énoncer clairement les deux dimensions de l'espace de travail, puis l'aire peut être calculée en tenant compte d'une forme elliptique.

Sujets : Nous avons choisi dix volontaires masculins de 25 à 51 ans non rémunérés pour faire l'expérience.

Protocole : La plate forme verticale de stabilométrie décrite au chapitre 2 est seulement employée pour contrôler les forces appliquées par la pulpe du doigt dans son ensemble avec une précision de 0.02 N. Un support mécanique est attaché à un support élévateur Boy, lui-même immobilisé sur le plan du bureau. Il permet de contraindre le doigt en lui imposant un angle de

30° par rapport au plan de travail. Le chargement de la pulpe est contrôlé par le bouton en rotation du support élévateur. Les participants enduisent leur doigt d'encre noire à tampon, et ce dernier est placé dans l'encoche prévue à cet effet. Les empreintes digitales sont recueillies de 0.2 à 10N par pas de 0.2N sur des feuilles de papier scotchées à la plate forme du dispositif. Les empreintes sont d'abord encadrées par un rectangle puis mesurées avec une règle de précision.

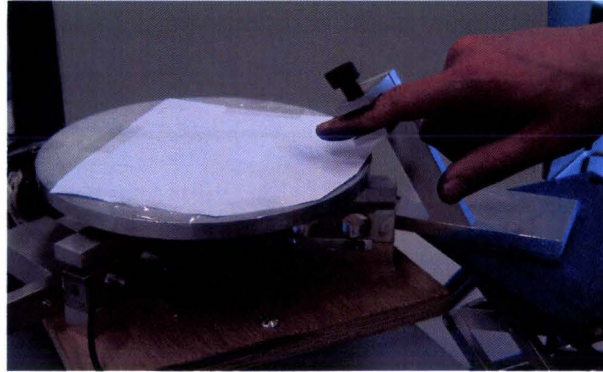
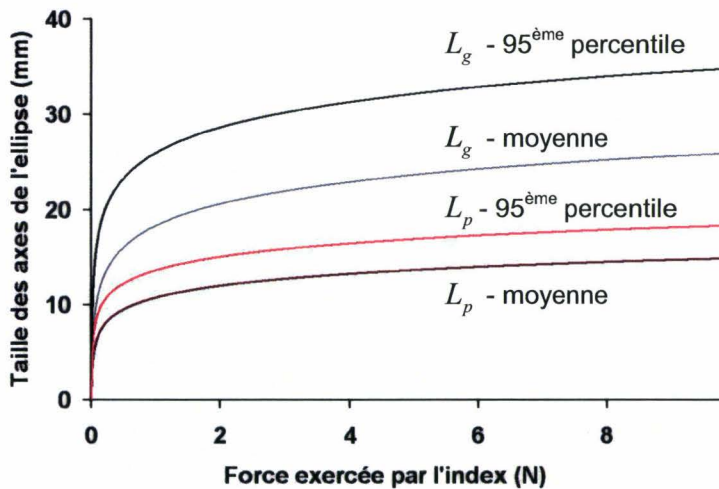


Fig. A.1 – Recueil de l'empreinte à force d'appui et angle d'inclinaison contrôlé

Résultats : La forme de la zone de contact est elliptique. La longueur (mm) des grands ( $L_g$ ) et petits ( $L_p$ ) axes de l'ellipse sont bien décrits par des fonctions logarithmiques de la force (N) comme le montre la figure qui suit.



Les relations qui suivent permettent de calculer, en fonction de la force exercée sur le dispositif, la taille minimale de la zone de contact acceptable pour un 95<sup>ème</sup> percentile.

$$L_g = 4.77 \times \ln(177.04 \times F_n + 1)$$

$$L_p = 2.35 \times \ln(235.40 \times F_n + 1)$$

Ce qui permet aussi de calculer l'aire de la forme elliptique:

$$a = \frac{\pi \times L_g \times L_p}{4}$$

Fig. A.2 – Taille des axes de l'ellipse en fonction de la force appliquée

En ce qui concerne l'évolution logarithmique de l'aire de contact en fonction de la force d'appui, ces résultats sont tout à fait en accord avec ceux de la littérature précédemment citée.

## Annexe B : fonctions de Hankel, de Legendre et d'ondes sphériques

Lorsque l'on cherche à connaître la partie spatiale de la solution de propagation d'une onde, il est nécessaire de résoudre l'équation de Helmholtz  $\nabla^2 P + k^2 P = 0$ . En coordonnées sphériques, on la sépare en une somme de trois équations différentielles partielles en accord avec la formulation du Laplacien. Ceci mène alors à une forme composite de solution  $P(r, \theta, \varphi)$  [You04] :

$$P(r, \theta, \varphi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\varphi)$$

Des fonctions exponentielles de type  $e^{jm\varphi}$  sont solutions  $\Phi(\varphi)$  pour la partie « oscillateur harmonique » de l'équation de Helmholtz dépendant de l'angle azimutal. La description mathématique des solutions  $R(r)$  et  $\Theta(\theta)$  est moins évidente. Les solutions  $R(r)$  sont des fonctions de Hankel, représentant le caractère progressif des ondes et les solutions de  $\Theta(\theta)$  sont des fonctions de Legendre permettant d'ajouter une dimension modale à l'expansion multipôle. Ce sont ces deux constructions plus particulières, utilisées au chapitre 3, que nous nous proposons d'étudier ci dessous.

Fonctions de Hankel sphériques de deuxième espèce  $h_m^2(x)$  :

On appelle fonction sphérique d'ordre  $n$  la fonction complexe définie par [Bou96] :

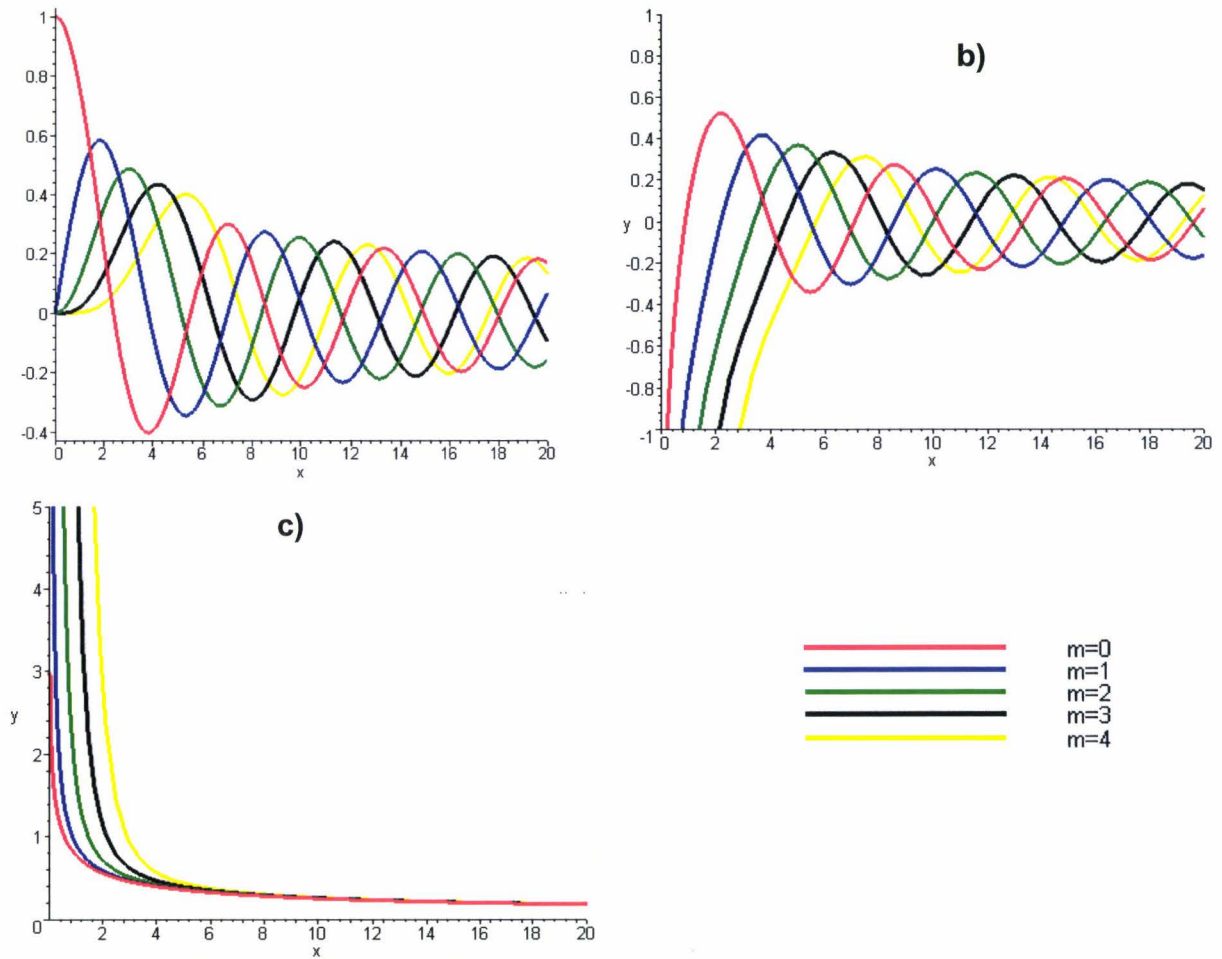
$$h_m^2(x) = x^m \left(-\frac{1}{x} \frac{d}{dx}\right)^m \frac{\sin(x)}{x} - ix^m \left(-\frac{1}{x} \frac{d}{dx}\right)^m \frac{\cos(x)}{x}$$

Où  $j_m(x)$  représente la fonction sphérique de Bessel d'ordre  $m$  et  $y_m(x)$  la fonction sphérique de Neumann d'ordre  $m$ . À partir de la relation précédente, on peut également exprimer  $h_m^2(x)$  en fonction des dérivées du noyau de Green en espace libre  $G_0(x)$  :

$$h_m^2(x) = -4\pi jx^m \left(-\frac{1}{x} \frac{d}{dx}\right)^m G_0(x)$$

Cette fonction  $G_0(x)$ , solution élémentaire de l'équation des ondes en géométrie sphérique traduit le principe de Huygens suivant lequel chaque point émet une onde hémisphérique. À une constante près, elle traduit le rayonnement d'un monopôle et s'exprime par :

$$G_0(x) = \frac{e^{-jx}}{4\pi x}$$



**Fig. B.1 – a) Allure des fonctions de Bessel  $j_m(x)$ , de b) Neumann  $y_m(x)$  et c) module de la fonction de Hankel de deuxième espèce  $|h_m^2(x)|$  pour les quatre premières harmoniques et  $x \in [0, 20]$  ( $kr$  dans nos calculs).**

Fonctions de Legendre  $P_{mn}(x)$  :

Le polynôme de Legendre  $P_n(x)$ , nécessaire à la définition des fonctions  $P_{mn}(x)$ , solutions de l'équation différentielle de Legendre, s'exprime avec la formule de Rodrigues [Bel68] par :

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2 - 1)^n]$$

Nous pouvons à présent définir les fonctions de Legendre associées en écrivant

$$P_{mn}(x) = (-1)^m (1-x^2)^{\frac{m}{2}} \frac{d^m}{dx^m} \left( \underbrace{\frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} [(x^2-1)^n]}_{P_n(x)} \right)$$

Ces fonctions, lorsqu'elles sont normalisées s'expriment  $\bar{P}_{mn}(x) = \sqrt{\frac{2m+1(m-n)!}{2(m+n)!}} P_{mn}(x)$ . La figure ci-dessous montre leur allure en fonction du degré du polynôme de Legendre choisi.

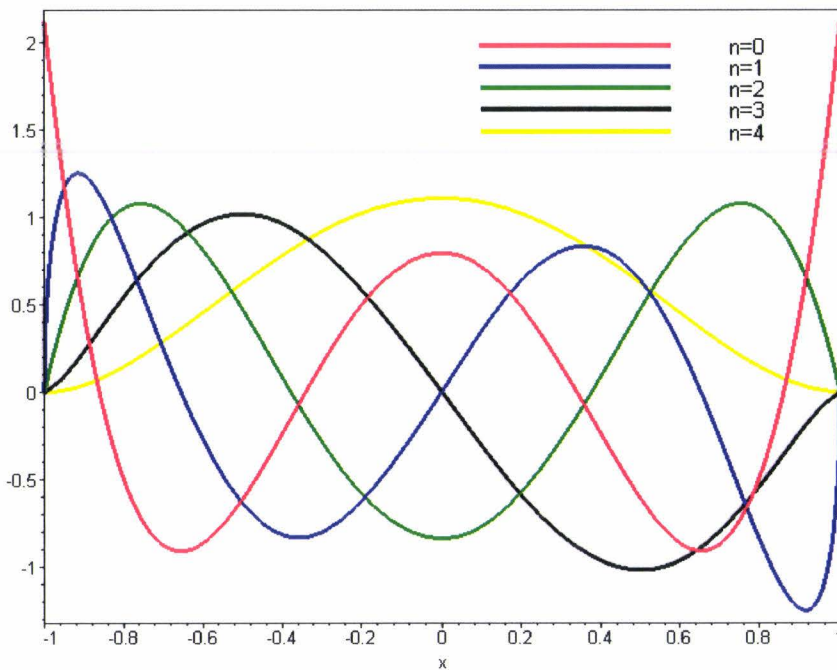


Fig. B.2 – a) Allure des fonctions de Legendre normalisées  $\bar{P}_{mn}(x)$  pour les quatre premières harmoniques et  $x \in [-1, 1]$  ( $\cos \theta$  dans nos calculs).

Harmoniques sphériques  $Y_{mn}^\sigma(x)$  et fonctions d'onde sphériques  $\Psi_{m\sigma}^{mul}(x)$  :

Dans cette thèse, nous avons fait le choix de conserver une formulation de la solution sous forme de produit reflétant la géométrie sphérique et la séparation issue de la résolution de l'équation de Helmholtz en trois composantes : fonctions de Hankel, polynôme de Legendre et terme exponentiel, le tout modulé en amplitude par des coefficients  $A_{mn}$ . Dans la littérature, on pourra également trouver la fonction harmonique sphérique normalisée notée :

$$\bar{Y}_{mn}^{\sigma}(x) = \begin{cases} \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{2\pi}} \cos(n\varphi) \bar{P}_{mn}(\cos\theta) & \text{si } \sigma = 1 \\ \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{2\pi}} \sin(n\varphi) \bar{P}_{mn}(\cos\theta) & \text{si } \sigma = 0 \end{cases}$$

Où  $\varepsilon_n$  facteur de Neumann prend les valeurs suivantes

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & \text{si } n = 0 \\ 2 & \text{si } n \geq 1 \end{cases}$$

La fonction d'onde  $\Psi_{mn\sigma}^{mul}(x) = \bar{Y}_{mn}^{\sigma}(x)h_m(kr)$  est la description mathématique du rayonnement acoustique d'un (m+1)-pôle (m=0 pour un monopôle, m=1 pour un dipôle). Par rapport à la formulation du troisième chapitre, on peut alors écrire :

$$p(r, \theta_1, \varphi_1) = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m A_{mn}^{ref} h_m^2(kr) P_{mn}(\cos\theta_1) e^{jn\varphi_1} = \sum_{m=0}^{+\infty} \sum_{n=-m}^m \sum_{\sigma=0}^1 C_{mn}^{ref} \Psi_{mn\sigma}^{mul}(r, \theta_1, \varphi_1)$$

Dans cette nouvelle présentation, les fonctions  $\Psi_{mn\sigma}^{mul}(x)$  décrivent les modes de rayonnement de la pulpe du doigt vue comme un multipôle sur la portion de peau proche de la zone de contact tandis que les coefficients  $C_{mn}^{ref}$  désignent les coefficients modaux.



## Annexe C : bruit du système moteur - roue dentée

Nous avons les FFT (cf. annexe D) des signaux microphoniques enregistrés pour un moteur en rotation à différentes vitesses dans la configuration présentée en 3.3.1, sans frottement du doigt.

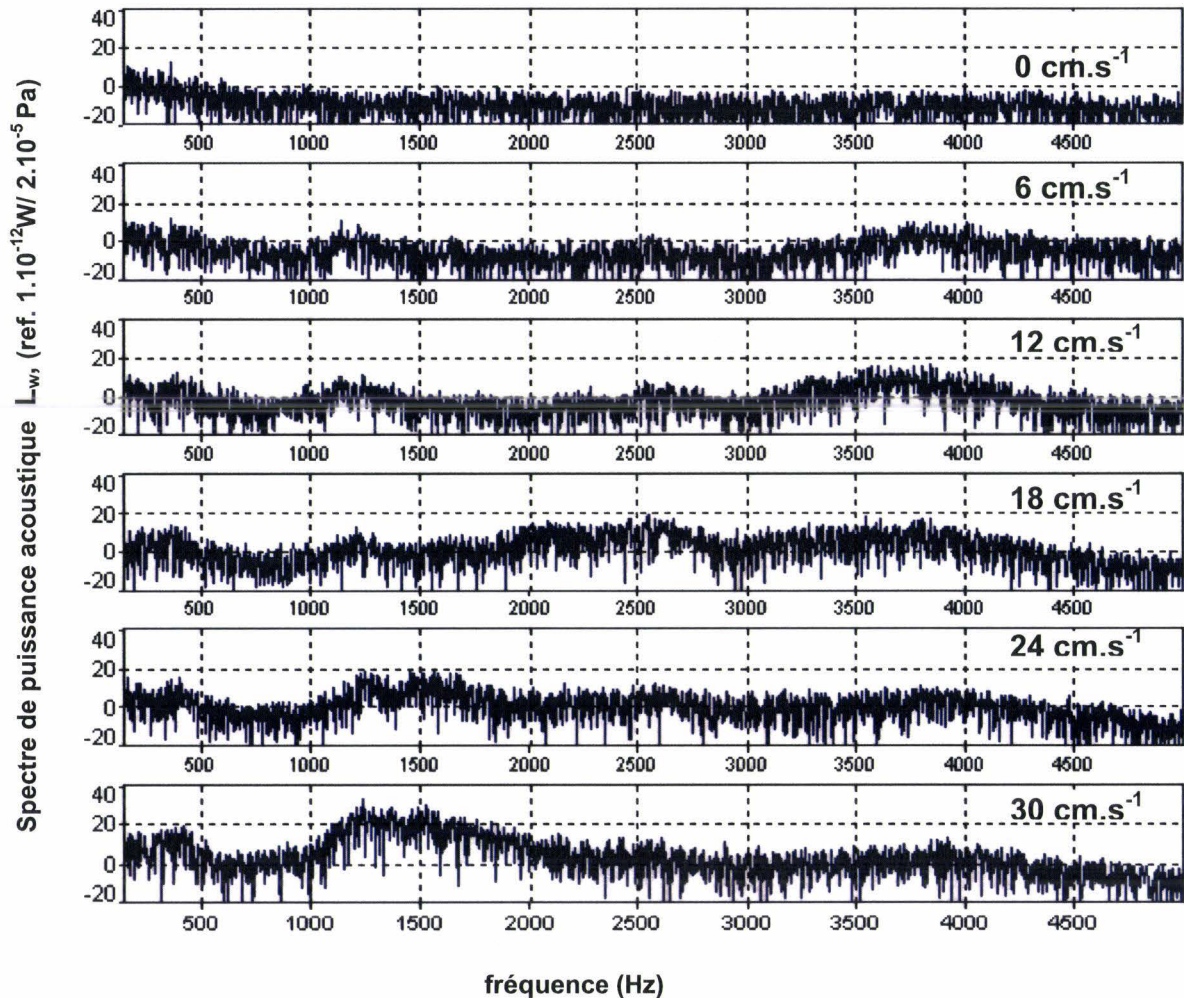
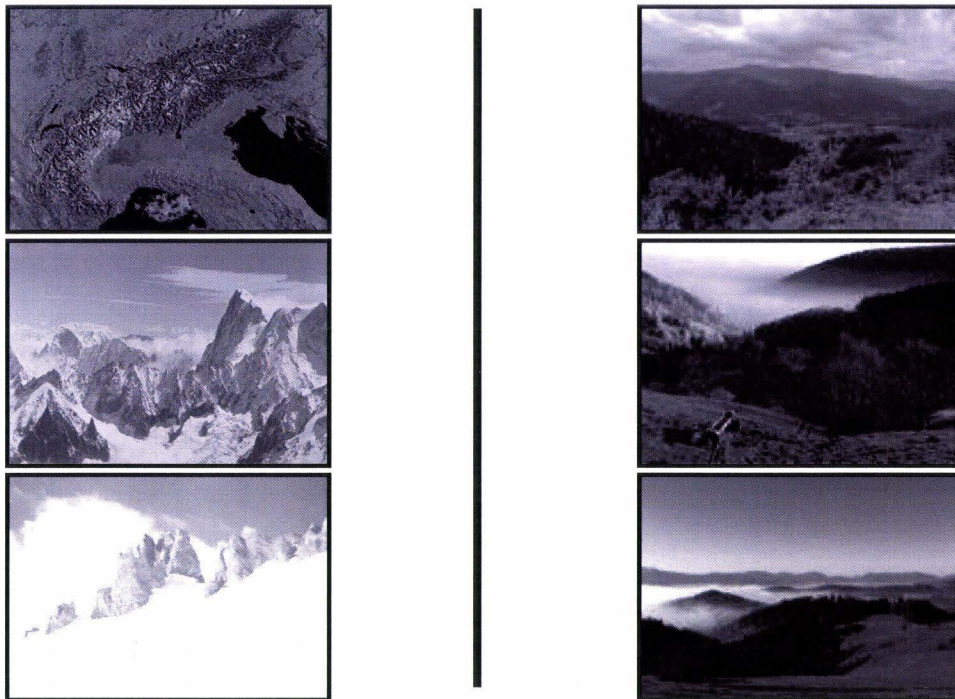


Fig. C.1 – Spectre de puissance en bandes fines du bruit du système moteur-roue « à vide ».

Moteur éteint, la chambre est très silencieuse mis à part à basses fréquences (< 200 Hz) où il y a un peu plus de contenu spectral. Toutefois ces conditions restent très acceptables. En effet, dans une chambre où des personnes sont endormies, le niveau sonore équivalent avoisine 30 dB. Dans notre étude les fluctuations se produisent en dessous de cette valeur. La mise en rotation du moteur génère une sorte de « bruit blanc » sur tout un intervalle de fréquence. Ainsi, entre 6 et 18 cm.s<sup>-1</sup>, on voit des composantes liées au frottement apparaître entre 3 et 4.5 kHz qui cèdent ensuite leur place entre 6 et 18 cm.s<sup>-1</sup> à des phénomènes se produisant à plus basse fréquence entre 1 et 2 kHz. Ensuite, l'augmentation de la vitesse du moteur ne change plus l'allure du spectre de puissance de manière significative. Compte tenu des très faibles changements d'intensité acoustique liées au changement de vitesse de la roue dentée, celle-ci sera négligée.

## Annexe D : transformée de Fourier et ondelettes

Pour présenter de manière simple les différences principales existant entre l'analyse de Fourier et l'analyse par transformée en ondelette, intéressons nous d'abord à un problème de représentation. Les deux séries de trois images qui suivent (figure D.1) font référence à un relief montagneux. Nous préférierions celle de gauche pour décrire les Alpes européennes car elles permettent de mieux réaliser l'étalement géographique du massif à l'échelle de la planète, mais aussi de comprendre qu'il y existe des reliefs localement très abrupts.



**Fig. D.1 – Représentation imagée des différences d'approche entre la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes**

Même si le contraste de l'image en bas à droite est bien meilleur que celui des images de son symétrique à gauche, les trois clichés de droite ne permettent pas de décrire correctement la réalité topographique des Alpes pour deux raisons. D'abord, la forme des massifs y est « sinusoïdale ». Ensuite, l'information contenue dans les trois scènes y est très redondante : les images n'informent ni sur la forme d'ensemble du massif, ni sur ses singularités géométriques locales. On le voit, même si les images de droite suggèrent des montagnes et possèdent une qualité de détail comparable sur les niveaux de gris, les images de gauche offrent un bien meilleur compromis de représentation. Sans aborder des notions de temps, d'espace, de fréquence ou encore d'échelle, nous venons de manière imagée de présenter les différences principales, forme et compromis de résolution qui, en pratique, amènent à préférer un microscope mathématique [Car00] la transformée en ondelettes à la transformée de Fourier. Plutôt que de

balayer un signal à même distance avec un seul objectif possible, celle-ci permet d'utiliser des filtres plus adaptés à l'information recherchée et de « zoomer » sur les détails intéressants. Voyons à présent la description mathématique des deux approches.

Transformée de Fourier rapide à court terme (TFCT ou STFT) :

*Série de Fourier* : toute fonction  $f(x)$   $2\pi$ -périodique continue par morceaux ou intégrable peut être décomposée sous forme d'une série de sinus et des cosinus telle que :

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$$

*La transformée de Fourier* : en faisant correspondre à une fonction du domaine temporel une fonction dans le domaine fréquentiel, la transformée de Fourier permet d'analyser le contenu fréquentiel d'un signal par l'examen de la contribution des sinus et cosinus à chaque fréquence.

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i\omega x} dx$$

*La transformée de Fourier discrète (DFT)* : la transformée de Fourier est effectuée sur le signal  $f(x)$  discrétisé de la forme  $x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$  à une fréquence d'échantillonnage choisie comme au moins égale au double de la fréquence analogique pour ne pas perdre le contenu du signal (Shannon). Elle s'exprime :

$$\hat{f}(\omega_j) = \sum_{n=0}^{N-1} (x_n \omega_j^n) = \sum_{n=0}^{N-1} (x_n e^{\frac{2\pi i j n}{N}})$$

avec les termes  $\{\omega_j\}$  qui forment l'ensemble des racines n-ièmes de l'unité.

*La transformée de Fourier rapide (FFT)* : la transformée de Fourier rapide (FFT), fait quand à elle référence à une DFT ayant subi une séparation des termes puis une factorisation de telle sorte que la complexité arithmétique de l'opération passe de  $O(n^2)$  à  $O(n \log n)$ . L'algorithme proposé par Cooley et Tukey est le suivant :

$$\hat{f}(\omega_j) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} (x_{2n} e^{\frac{2\pi i j n}{N/2}}) + e^{\frac{2\pi i j}{N}} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} (x_{2n+1} e^{\frac{2\pi i j n}{N/2}})$$

*La transformée de Fourier fenêtrée (WFT)* : l'une des principales limitations de la transformée de Fourier est l'absence de localisation des événements isolés dans le temps. La transformée de Fourier fenêtrée est une opération permettant d'aboutir à une représentation temps-fréquence ou espace-fréquence. Elles est beaucoup mieux appropriée aux signaux non périodiques que les FT ou DFT. En effet, pour analyser un transitoire avec une FT ou DFT, il est nécessaire d'étendre le signal pour avoir une périodicité, ce qui peut poser des problèmes de continuité à ses extrémités. Avec la WFT, la portion du signal analysée est simplement pondérée par une fonction qui donne moins d'importance au contenu aux extrémités (convergence vers zéro) qu'au milieu. Ce sont ces

fonctions ou *fenêtres d'apodisation* qui permettent de localiser des événements dans le temps ou l'espace. Au final, avec la transformée de Fourier fenêtrée ou sur instant court (STFT), on a d'une part une modulation chargée de décaler le spectre grâce au terme exponentiel, mais aussi un filtrage passe-bas par une fenêtre que l'on peut choisir. Cette opération peut s'effectuer par des mécanismes continus ou discrets, et dans ce cas avec l'algorithme FFT.

- Approche continue (STFT) :

$$S\hat{f}(\omega, \tau) = \langle f, h_{\omega, \tau} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) h_{\omega, \tau}^*(t - \tau) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) p(t - \tau) e^{-i\omega t} dt$$

où  $h_{\omega, \tau}(t) = p(t - \tau)e^{i\omega t}$  est l'atome de la STFT et  $h_{\omega, \tau}^*(t)$  désigne son complexe conjugué

- Approche discrète (STDFFT) :

$$\begin{aligned} S\hat{f}(\omega_j, s) &= \langle x, h_{\omega_j, s} \rangle_{\text{pair}} + e^{\frac{2\pi i j}{N}} \langle x, h_{\omega_j, s} \rangle_{\text{impair}} \\ &= \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} (x_{2n} p_{2(n-s)} e^{\frac{2\pi i j n}{N/2}}) + e^{\frac{2\pi i j}{N}} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} (x_{2n+1} p_{2(n-s)+1} e^{\frac{2\pi i j n}{N/2}}) \end{aligned}$$

avec :

$$\begin{cases} h_{\omega, s}(n) = p_{2(n-s)} e^{\frac{2\pi i j n}{N/2}} & \text{indices pairs} \\ h_{\omega, s}(n) = p_{2(n-s)+1} e^{\frac{3\pi i j n}{N/2}} & \text{indices impairs} \end{cases}$$

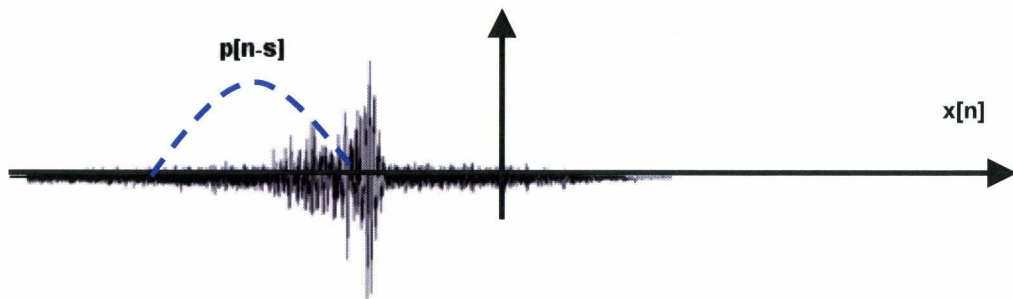


Fig. D.2 – Fenêtrage ou analyse d'une portion de signal

*Fenêtres d'apodisation* : parmi les fonctions les plus courantes, on retrouve la fenêtre rectangulaire (zero-padding), les fenêtres de Hanning et Hamming proches du sinus augmenté de 1 et la fenêtre de Blackmann. Elles possèdent deux paramètres importants : la largeur de bande de transition jusqu'à leur fréquence de coupure ainsi que l'atténuation de l'amplitude des premiers lobes de leur transformée. Comme l'indiquent le tableau D.1 et la figure D.3 page suivante, le choix de la fenêtre est fonction du signal analysé, mais surtout du compromis localisation temporelle/précision fréquentielle lors de la détection.

Fenêtre	Expression de $p_m$ pour $0 \leq m \leq M$	Largeur de la bande de transition	Atténuation (dB)
rectangulaire	$p_m = 1$	$1/M$	21
Hanning	$p_m = (1 - \cos(2\pi m / (M - 1))) / 2$	$2/M$	44
Hamming	$p_m = 0.54 - 0.46 \times \cos(2\pi m / (M - 1))$	$2/M$	53
Blackman	$p_m = 0.42 - 0.5 \times \cos(2\pi m / (M - 1)) + 0.08 \times \cos(4\pi m / (M - 1))$	$3/M$	74

Tab. D.1 – Description des fenêtres d'apodisation courantes

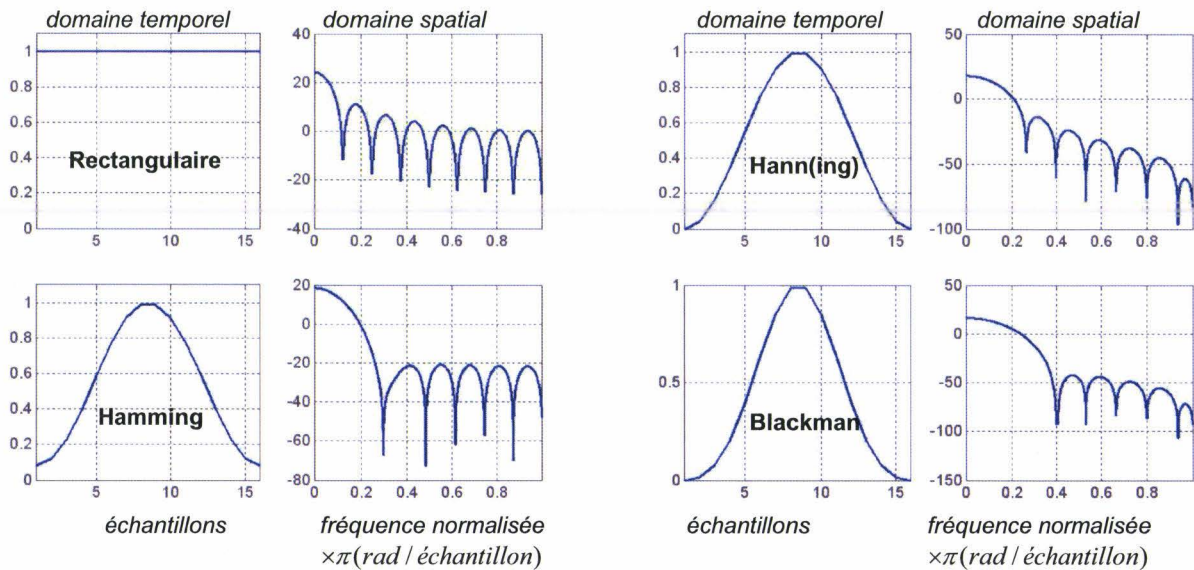


Fig. D.3 – Calcul effectué pour M=16 avec l'outil Matlab Window Design and Analysis

-Recouvrement (overlap) : en STFT discrète, on peut régler le retard du produit de convolution de telle sorte que les fenêtres se superposent ou non. Ceci vise surtout à optimiser la représentation temps fréquence, et ne sert pas à offrir une représentation moyenne des composantes spectrales dans le temps. Plus la superposition est importante, plus la représentation est précise à haute fréquence pour isoler les phénomènes de courte durée. Par contre, un pourcentage de recouvrement trop élevé entre fenêtres peut empêcher le glanage d'information sur l'oscillation à basse fréquence par manque de points.

La STFT est donc considérée comme une méthode d'analyse temps fréquence à résolution fixe et ce, dans les domaines fréquentiel et temporel. En effet, la fenêtre d'apodisation possède une largeur (fréquence de coupure de la bande) et un pas constant. Le *spectrogramme*, diagramme de représentation de la distribution temps-fréquence de la puissance se calcule à partir de STFT comme suit :

$$P_{\widehat{Sf}(\omega, \tau)} = \left| \widehat{Sf}(\omega_j, s) \right|^2$$

Présentation de la transformée en ondelettes continue :

Dans un contexte de détection, nous allons présenter la transformée en ondelette continue et discrète de manière non exhaustive. Par exemple, la reconstruction des signaux et toutes les considérations associées aux transformations inverses ne seront jamais abordées. L'aide de la wavelet Toolbox du logiciel Matlab [Mat02] constitue une entrée en matière simple et concise. L'ouvrage de Stéphane Mallat [Mal00] contient quant à lui tous les développements mathématiques utiles à une compréhension approfondie de la présentation qui va suivre. Cette description, élaborée à partir de nombreuses autres références [Car00][Qui98][Tru98][MR02][Cou97][LP06] vise surtout une bonne compréhension de notre attrait pour la technique par rapport à l'approche de Fourier et une explication plus approfondie de notre intérêt pour l'ondelette de Meyer.

Les sinusoïdes de la transformée de Fourier sont très bien localisées en fréquence, mais pas en temps, car leur support est infini. En effet, si  $f$  est une fonction dans  $L^2$  d'énergie finie contenue dans un intervalle, il n'existe pas d'analyse fréquentielle instantanée car la transformée de Fourier ne peut s'annuler sur cet intervalle. Si on cherche à représenter les propriétés fréquentielles d'un signal localement dans le temps, il convient d'utiliser une base constituée de fonctions à support compact (espace fermé et borné) à la fois en temps et en fréquence. Le principe d'incertitude d'Heisenberg stipule que si  $f$  est une fonction dans  $L^2$ , l'écart-type en temps  $\sigma_f$  et en fréquence  $\sigma_f$  de sa transformée de Fourier respecte :

$$\sigma_f \sigma_t \geq \frac{1}{4}$$

Cette relation montre que nous sommes mathématiquement contraints à un compromis entre les résolutions temporelles et fréquentielles. Dans le cas de la sinusoïde  $\sigma_f$  est nul et  $\sigma_t$  est infini.

Dans notre étude l'utilisation des techniques d'ondelettes va être avantageuse pour deux raisons. D'abord, en permettant l'utilisation de fonctions particulières, elle va permettre une meilleure détection et caractérisation de la forme des événements transitoires. Ensuite, en raisonnant toujours avec l'approche temps-fréquence de Fourier, la technique des ondelettes va apporter une bonne précision temporelle pour localiser les composantes à hautes fréquences (haute) dans nos signaux (image c) et une bonne précision fréquentielle pour les événements basse fréquence (image a) tout en offrant un bon compromis pour les fréquences intermédiaires.

Avec la transformée de Fourier fenêtrée, la décomposition du signal sur le plan temps-fréquences se fait sous forme de boîtes de taille constante (boîtes d'Heisenberg) avec  $\sigma_f$  déterminé par la fréquence d'échantillonnage et  $\sigma_t$  constant, déterminé par la taille de la fenêtre.

*L'idée de la transformée en ondelettes est d'utiliser des boîtes d'Heisenberg à  $\sigma_t$  et  $\sigma_f$  de tailles variables réparties différemment sur un plan temps-« pseudo-fréquences ». Cette opération est réalisée grâce à des étirements et des translations d'une fonction dont on analyse la similarité avec le signal.*

Notre propos peut être illustré de la manière suivante :

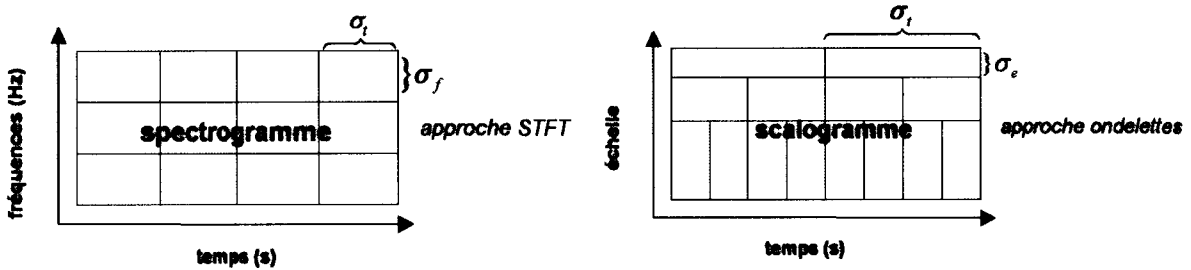


Fig. D.4 – Différences entre les écarts types en temps et en fréquence du spectrogramme et du scalogramme

La transformée en ondelettes remplace la sinusoïde de la transformée de Fourier par une fonction capable de se dilater et de se traduire : l'ondelette [Mal99]. Elle s'écrit comme un calcul de corrélation (produit scalaire de  $L^2$ , espace des fonctions mesurables et d'énergie finie) entre le signal à analyser et des fonctions localisées en temps et en fréquence.

Elle s'exprime par :

$$\widehat{Wf}(l, e) = \langle a, \psi_{l,e} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \frac{1}{\sqrt{e}} \psi^* \left( \frac{t-l}{e} \right) dt \text{ avec } e \in \mathbb{R}^+ \text{ et } l \in \mathbb{R}$$

Pour la transformée de Fourier fenêtrée, nous avons vu que l'atome  $h$  est une sinusoïde  $e^{-i\omega t}$  multipliée par une fenêtre  $p$  symétrique d'énergie finie qui possède deux arguments : le temps et la fréquence. L'atome  $\psi_{l,e}(t)$  de la transformée continue en ondelettes (CWT) n'est plus une sinusoïde, mais une fonction de moyenne nulle, centrée au voisinage de 0 et d'énergie finie suivant :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \text{ et } \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty$$

La translation et la dilatation, paramètres de transformation, appliqués à l'atome de base que l'on appellera  $\psi$  forme une famille de vecteurs  $\psi_{l,e}$  définie comme suit par rapport à l'approche de Fourier.

**Atome de la STFT :**  $h_{\omega,\tau}(t) = p(t-\tau)e^{i\omega t}$

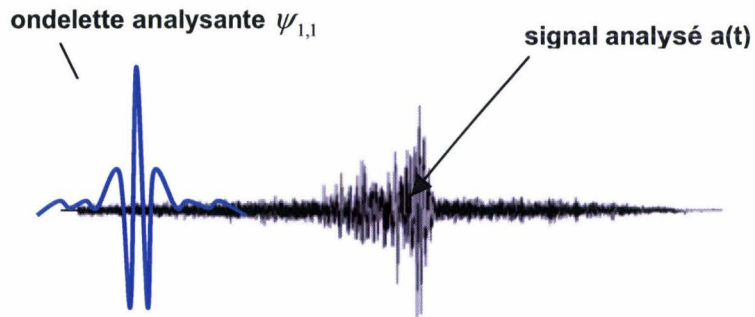
- Centré fréquentiellement en  $\omega$
- Symétrique par rapport à  $\tau$

**Atome de la CWT :**  $\psi_{l,e}(t) = \frac{1}{\sqrt{e}} \psi\left(\frac{t-l}{e}\right)$

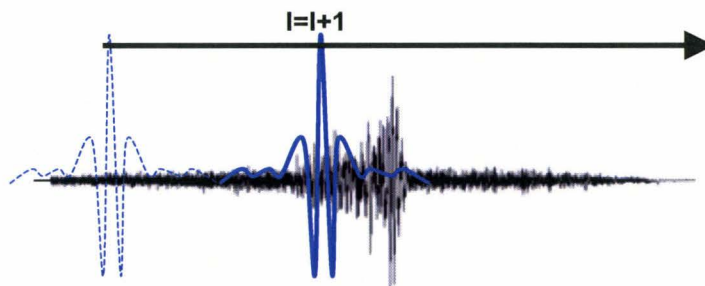
- Centré au voisinage de  $l$ , paramètre de translation
- Si la pseudo-période au centre de  $\psi$  est  $\lambda_\psi$ , alors la pseudo-période de la fonction dilatée est  $\lambda = \lambda_\psi e$

La transformée en ondelette continue s'effectue comme suit [Mat02] :

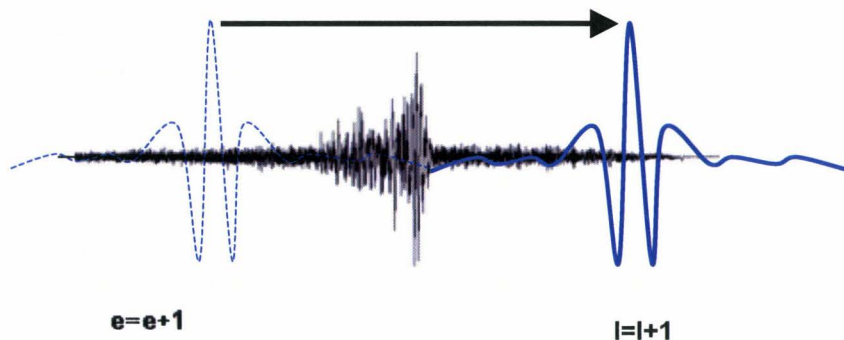
**A) Comparaison de la fonction de base non dilatée à une portion de signal similaire en largeur. Le calcul de  $\widehat{W}_f(l, e)$  fournit un *indice de similarité* représentant la corrélation entre les deux formes de signaux (c'est un coefficient de corrélation si les deux formes de signaux possèdent la même énergie) qui dépend du choix de l'ondelette  $\psi$ .**



**B) Décalage de la position  $l$  à la position  $l+1$  tant que toute la longueur du signal n'a pas été analysée et calcul de  $\widehat{W}_f(l, e)$ . À l'issue de cette étape on possède toute l'information nécessaire sur la ressemblance entre la forme d'ondelette et le signal analysé.**



**C) Dilatation de la forme d'ondelette et répétition des étapes A), B) et C)**





La représentation temps fréquence de la transformée en ondelette est appelée *scalogramme*. Il se calcule comme suit :

$$P_{\widehat{Wf}(l,\lambda)} = \left| \widehat{Wf}(l, e) \right|^2 = \left| \widehat{Wf}\left(l, \frac{\lambda}{\lambda_\psi}\right) \right|^2$$

et de manière normalisée :

$$P_{\widehat{Wf}(l,\lambda)}^{norm} = \frac{1}{e} \left| \widehat{Wf}(l, e) \right|^2 = \frac{\lambda_\psi}{\lambda} \left| \widehat{Wf}\left(l, \frac{\lambda}{\lambda_\psi}\right) \right|^2$$

La transformée dyadique :

Tout en conservant une approche continue au niveau temporel, pour ne pas avoir à sous-échantillonner les signaux dans les basses résolutions, il est possible de ne discrétiser que les échelles. On donc peut écrire  $e = (2^{1/\gamma})^m$  comme une suite géométrique telle que les échelles soient des puissances de 2 et qu'il y ait  $\gamma$  échelles intermédiaires dans chaque intervalle. Son intérêt est sa capacité à représenter un signal et à le reconstruire de manière stable et parfaite. Dans ce document, les décompositions sont effectuées de manière dyadique mais en conservant  $\gamma = 1$ .

La transformée en ondelette continue discrétisée (DCWT) :

Nous venons de voir qu'il était possible de discrétiser le nombre de résolutions représentées, étudions à présent comme discrétiser l'axe temporel. Si  $n$  désigne le numéro d'échantillon d'un signal  $a$  de longueur  $N$  et  $l$  celui d'une ondelette discrète analysante  $\psi$  de longueur  $L$ , sa définition à une échelle d'indice  $m$  est la suivante :

$$\psi_m[l] = \frac{1}{\sqrt{e}} \psi\left(\frac{l}{e}\right)$$

Comme pour la TFD, on peut écrire la transformée en ondelettes comme un produit de convolution.

$$\widehat{Wf}\left(l, e = \left(2^{1/\gamma}\right)^m\right) = \langle a, \psi_{l,e} \rangle = \sum_{n=0}^{N-1} a[n] \psi_{l,e}^*[n-l]$$

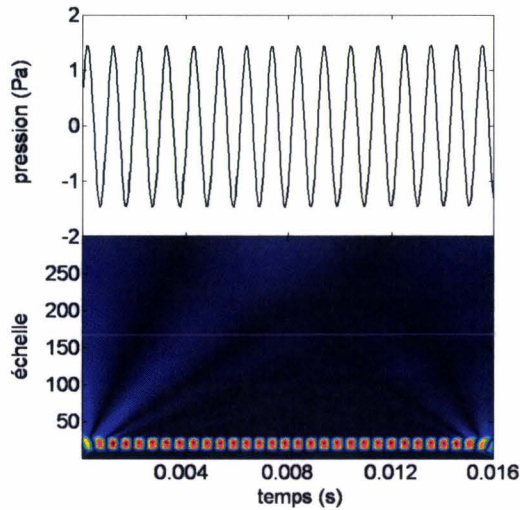


Fig. D.5 – DCWT avec l’ondelette de Meyer d’un signal sinusoïdal enregistré à partir d’un microphone *DPA 4060* et d’un calibreur *01dB Cal21* à 94 dB(A) – 1000Hz

Régularité :

La régularité d'une ondelette, liée à sa continuité et à sa dérivabilité en chaque point, est la propriété permettant de localiser les singularités dans un signal. Son nombre de moments nuls est un indicateur de régularité. Plus le nombre de moments nuls est important, plus la capacité de filtrage de la forme d'ondelette est élevée. L'ondelette  $\psi(t)$  a  $N$  moments nuls si

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^n \psi(t) dt = 0 \text{ pour } 0 \leq n < N$$

Considérons  $f(t)$  est un signal polynomial qui vérifie la propriété précédente

$$f(t) = \sum_{n=0}^{N-1} (a_n t^n)$$

Alors ses coefficients de similarité  $\widehat{wf}(l, e)$  sont nuls. En effet, une ondelette à  $N$  moments nuls assure la suppression des composantes polynomiales d'un degré inférieur ou égal à  $N$ . Si un signal est régulier, c'est à dire d'un degré polynomial peu élevé par rapport au nombre de moments de l'ondelette analysante, alors beaucoup de coefficients seront nuls. On peut d'ailleurs montrer, en utilisant un développement en série de Taylor autour de  $t=0$ , que les coefficients possèdent aussi des valeurs moins élevées car les composantes présentes jusqu'à  $N$  sont filtrées.

Taille du support et compromis :

Si un signal  $f(t)$  possède une singularité isolée (point où la dérivée est indéterminée) à  $t_0$  bien qu'elle existe partout ailleurs et que  $t_0$  est à l'intérieur du support, alors les coefficients  $\widehat{Wf}(l, e)$  pourraient posséder de grandes amplitudes. Si  $\psi_{l, e}$  a un support compact de taille  $N$ , il y a donc  $N$  positions pour le paramètre translation telles que l'événement  $t_0$  soit détectable pour l'ondelette analysante. Si  $\psi(t)$  possède  $K$  moments nuls, alors la taille de son support est au moins égale à  $2k-1$ . Il est donc nécessaire de trouver un compromis :

-Si le nombre de défauts à détecter est important, on préférera une ondelette analysante avec un support de taille courte pour mieux isoler les événements.

-Si on cherche une représentation claire d'un défaut à haute fréquence dans un environnement plutôt bruité, on préférera une ondelette analysante « sélective » avec un grand nombre de moments nuls.

Analyse multirésolution - la transformée en ondelettes discrète :

On appelle « analyse multirésolution » ou « AMR », toute suite décroissante de sous espaces emboîtés  $(V_j), j \in \mathbb{Z}$   $X_{+\infty} \subset \dots \subset X_j \subset \dots \subset X_{-\infty}$  de  $L^2(\mathbb{R})$  vérifiant les cinq propriétés suivantes :

-  $\bigcap_{-\infty}^{\infty} X_j = \emptyset$  (intersection nulle)

-  $\bigcup_{-\infty}^{\infty} \bar{X}_j = L^2(\mathbb{R})$  (réunion des complémentaires est l'ensemble des fonctions à énergie finie de  $\mathbb{R}$ )

-  $f(t) \in X_j, f(2t) \in X_{j-1}, \dots, f(2^j t) \in X_0$

-  $f(t) \in X_j \Leftrightarrow f(t-k) \in X_j$

-  $\exists \zeta \in X_0$  tq la famille de fonctions  $\{\zeta(t-k), k \in \mathbb{Z}\}$  soit une base orthonormée de  $X_0$

Tant que le signal n'a pas été complètement décomposé, on peut considérer qu'il existe deux types d'espaces respectant les propriétés de  $X_j$ . D'une part, on a des espaces d'approximation  $A_{j-1}$  et d'autre part, des espaces de détail  $D_j$  emboîtés. Mathématiquement, on définit le supplémentaire orthogonal  $D_j$  de  $A_j$  dans  $A_{j-1}$  et leurs fonctions de projections sur les bases associées comme suit :

$$A_{j-1} = A_j \oplus D_j \quad \text{et} \quad \zeta = \{\phi_{A_j}, \Psi_{D_j}\}$$

La projection du signal  $f(t)$  sur les espaces  $A_j$ , grâce à la fonction d'échelle  $\phi_j$  constitue une approximation du signal initial à l'échelle  $2^j$  tandis que celle effectuée sur les espaces  $D_j$  grâce à la fonction d'ondelette  $\psi_{w_j}$  permet d'isoler les détails. Les trois dernières propriétés permettent de montrer que les espaces  $X_0$  possèdent les propriétés nécessaires pour permettre le passage à une base orthonormée  $X_j$  par une fonction d'échelle nommée  $\zeta(t)$  définie comme suit :

$$\zeta_{j,t}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \zeta_{j,t}(2^{-j}t - k) \text{ avec } k \in Z, j \in Z$$

De fait, quand on effectue un changement de base de  $X_j$  à  $X_{j+1}$ , on dilate l'amplitude et la période des fonctions analysantes d'un facteur 2. Dans un espaces emboîté  $X_{j+1}$ , n'importe quelle fonction peut s'écrire comme une combinaison linéaire de fonctions  $\{\zeta_{j,t}(t) = \sqrt{2}\zeta(2t - k), k \in Z\}$  dans  $X_j$ . Les coordonnées des fonctions  $\zeta = \{\phi_{A_j}, \Psi_{D_j}\}$  appelés  $h_n$  et  $g_n$  ou coefficients respectifs des filtres d'approximation et de détail permettent d'écrire les fonctions  $\phi_{A_j}$  et  $\Psi_{D_j}$  comme suit :

$$\phi_A(t) = \sqrt{2} \sum_n h_n \phi_A(2t - n) \qquad \Psi_D(t) = \sqrt{2} \sum_n g_n \Psi_D(2t - n)$$

Utilisation avec un banc de filtres discrets :

Un banc de filtres discrets sous échantillonnés opère la convolution d'un signal en entrée avec la séquence de coefficient  $h_n$  et  $g_n$  en parallèle. Le premier canal est donc un filtre passe-haut visant à extraire les détails et le second est un filtre passe bas donnant une approximation du signal en l'absence de ces détails.

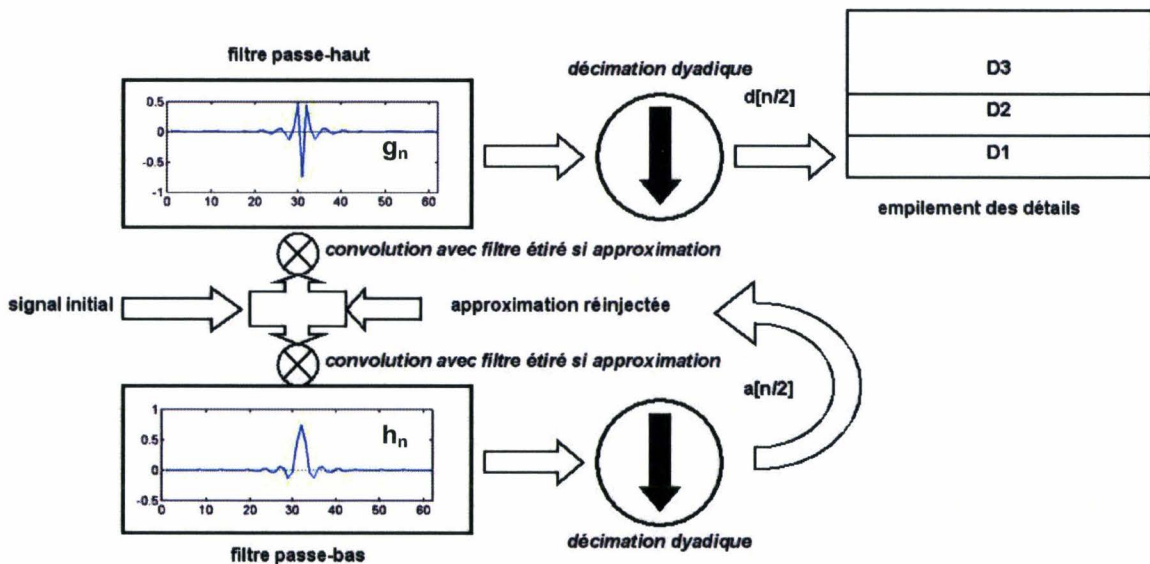


Fig. D.6 – Banc de filtres associé à la transformée en ondelettes discrète. Le schéma représente les filtres associés à l'ondelette 'dmey' d'Abry (1997)

Ondelette de Meyer :

L'ondelette de Meyer présentée sur la figure est orthogonale, à support compact. Sa transformée de Fourier est définie de manière continue dans le domaine fréquentiel par les relations :

$$\hat{\Psi}(\omega) = \begin{cases} (2\pi)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{i\omega}{2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} \nu\left(\frac{3}{2\pi}|\omega|-1\right)\right) & \text{si } \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3} \\ (2\pi)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{i\omega}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{2} \nu\left(\frac{3}{4\pi}|\omega|-1\right)\right) & \text{si } \frac{4\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{8\pi}{3} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{où } \nu(x) = x^4(35 - 85x + 70x^2 - 20x^3), x \in [0,1]$$

La transformée de Fourier de sa fonction d'échelle est quant à elle définie comme suit :

$$\hat{\phi}(\omega) = \begin{cases} (2\pi)^{\frac{1}{2}} & \text{si } |\omega| \leq \frac{2\pi}{3} \\ (2\pi)^{\frac{1}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{2} \nu\left(\frac{3}{2\pi}|\omega|-1\right)\right) & \text{si } \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3} \\ 0 & \text{si } |\omega| \geq \frac{4\pi}{3} \end{cases}$$

La figure D.5 présentée ci-dessus représente les versions discrétisées ('dmey') des fonctions  $\Psi$  et  $\phi$  de Meyer. Elle sont à support compact et sont compatible avec les approches continues et discrètes. Utilisé de manière conjointe, l'algorithme Kolaczyk [Kol94] travaillant directement avec les coefficients de Fourier de l'ondelette et du signal permet des calculs rapides d'une complexité arithmétique de  $O(n \log n)$  opérations. On parle alors de FDWT.

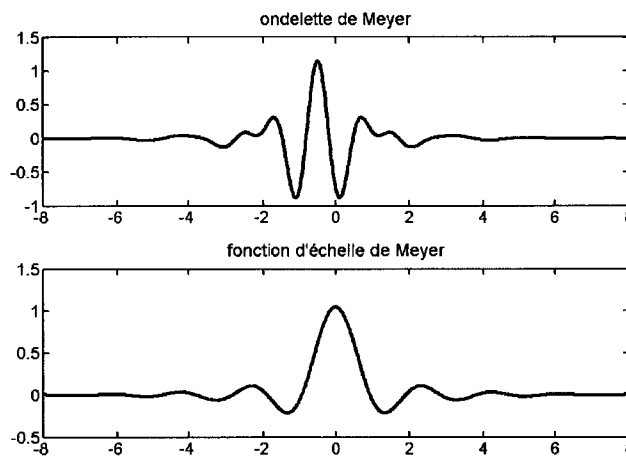


Fig. D.7 – Ondelette de Meyer et sa fonction d'échelle

Forme d'autres fonctions d'ondelette citées dans le document :

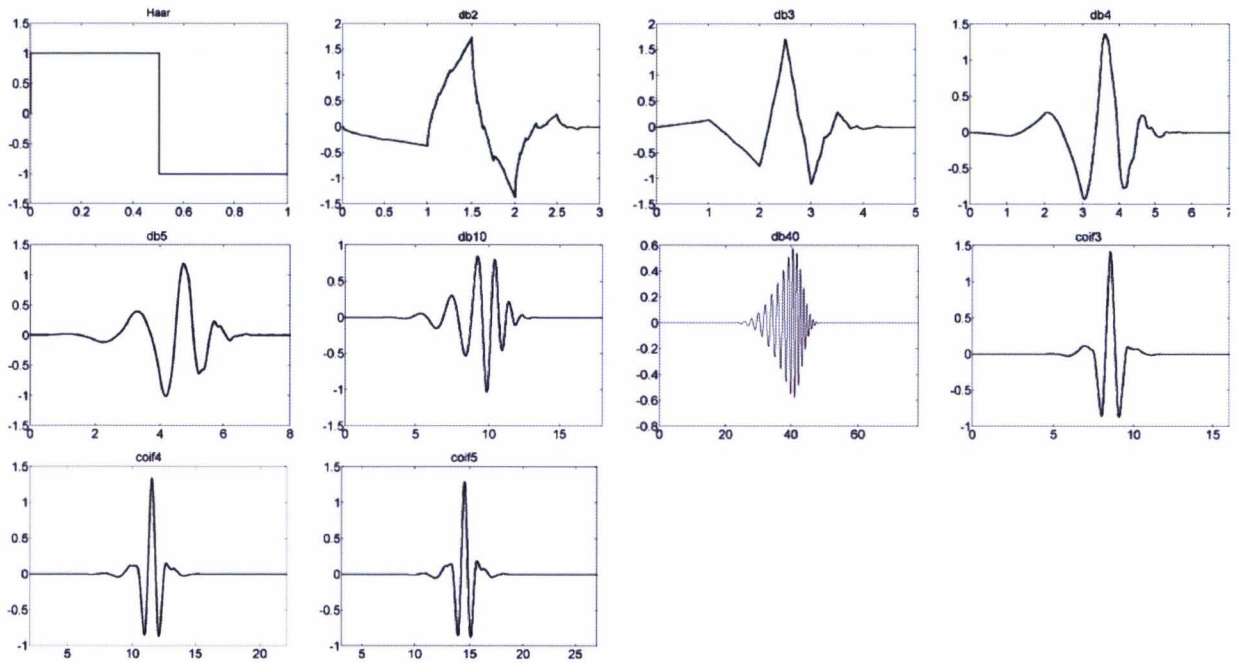


Fig. D.8 – Ondelettes de Haar, Daubechies (N = 2, 3, 4, 5, 10, 40), Coiflets (N = 3, 4, 5).

## Glossaire

### A

**Aléatoire (variable)** : une variable aléatoire est une fonction définie sur l'ensemble des résultats possibles d'une expérience aléatoire, telle qu'il soit possible de déterminer la probabilité pour qu'elle prenne une valeur donnée ou une valeur dans un intervalle donné.

**Anéchoïque (chambre)** : une chambre anéchoïque est une salle d'expérimentation dont les murs et le plafond sont totalement absorbants aux ondes sonores ou électromagnétiques, et ne provoquent aucun *écho* venant perturber les mesures.

**Affordance (cognitive)** : potentialité d'interaction révélée à partir d'une perception d'invariance d'une ou d'un ensemble de propriétés physiques en situation d'usage.

**Apodisation** : découpage, troncature.

**Anisotropie** : contraire d'isotropie, exprime la dépendance en direction.

### e

**Cinématique** : discipline de la mécanique qui étudie le mouvement des corps à partir de la géométrie analytique.

**Chirp (« gazouillis »)** : Signal sinusoïdal dont la fréquence change de manière continue entre deux fréquences.

**Commensurabilité** : caractère comparable de l'ordre de grandeur de deux rugosités de surface de telle sorte qu'il puisse se produire des situations d'emboîtement partiel sous réserve d'un positionnement mutuel adéquat.

**Cohérence** : un faisceau laser est dit « cohérent » spatialement et temporellement car il possède une longueur d'onde uniforme et des ondes en phase.

**Complexe (système)** : un système est complexe si le comportement collectif observé à l'échelle du système est plus riche que le comportement des éléments qui le composent.

### D

**Directivité** : dépendance en orientation de la sensibilité en réception ou de l'efficacité de rayonnement

**Dièdre** : (ensemble) formé par deux demi-plans qui ont une arête commune

**Déterministe** : dont la variation peut être définie dans sa forme temporelle et spatiale

**Dynamique (phénomène)** : phénomène dont la forme évolue à la fois dans le temps et dans l'espace en fonction de forces d'inertie.

**Dyadique (décomposition)** : discrétisation selon une loi géométrique établie par rapport aux puissances de deux.

### F

**Fondamental** : en acoustique, la fréquence fondamentale ou son fondamental est l'harmonique de premier rang (voir harmonique).

## H

**Haptique** : haptique, du mot grec « *haptikos* » qui signifie saisir, toucher, percevoir. Syn. tactile.

**Harmonique** : fonction trigonométrique sinusoïdale (sinus ou cosinus) dont la fréquence est un multiple de la fréquence de la fonction périodique décomposée. La somme infinie de tous les harmoniques d'une fonction périodique reconstitue la fonction.

**Homoscédasticité** : homogénéité ou constance de la variance.

## P

**Pseudo-fréquence** : fréquence sur un instant court d'un signal oscillant.

**Phonon** : initialement étudié dans l'étude des cristaux, le phonon est un quantum d'énergie mécanique libéré sous forme de son ou de vibration à cause d'instabilités mécaniques qui se produisent lors d'une transition d'un mode de vibration à un autres dans les échelles atomiques.

## R

**Rhéologie** : science des déformations de la matière.

**Rugueux** : (1) marqué par des inégalités, des points, des brins, des crans ou des projections en surface, (2) dru (pelage), (3) qui évoque la cassure, la rupture, la non-uniformité ou la dissimilarité en surface, (4) scabreux, raboteux, difficile à traverser ou à pénétrer (résistant) à cause des irrégularités (5) déplaisant au toucher, irritant, douloureux, non esthétique. (*inspiré du webster merriem collégiate dictionary*)

## S

**Statique** : au repos dans un repère galiléen.

**Stationnarité** : un phénomène aléatoire est stationnaire si ses caractéristiques essentielles ne se modifient pas au cours du temps. Au sens strict ses densités de probabilité ne dépendent pas du temps, au sens faible, la moyenne ne dépend pas du temps.

**Stochastique** : qui relève de la dépendance en temps d'un phénomène aléatoire.

**Somesthésie** : mécanismes de la sensibilité aux stimuli haptiques.

## T

**Tribologie** : science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs. Il recouvre, entre autres, tous les domaines du frottement, de l'usure et de la lubrification (Salomon 1968).



## Références bibliographiques

- [Abr97] P. Abry, *Ondelettes et turbulence, Multirésolutions, algorithmes de décomposition, invariance d'échelles*, Diderot Editeur, Paris, 1997.
- [AFH04] G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, W. C. Hall, A.-S. LaMantia, D. Purves, *Neurosciences*, Third Edition, Sinauer Associates, 2004.
- [AHT02] B. Amento, W. Hill, L. Terveen, *The Sound of One Hand : A Wrist-mounted Bio-acoustic Fingertip Gesture Interface*, in proc. of CHI'2002, 2002.
- [ASR05] F. Avanzini, S. Serafin, D. Rocchesso, *Interactive simulation of rigid body interaction with friction-induced sound generation*. in proc. of IEEE Trans. on Speech and Audio Processing, 13, 2005.
- [ATS98] N. Asamura, N. Tomori, H. Shinoda, *A Tactile Feeling Display Based on Selective Stimulation to Skin Receptors*, in proc. of Virtual Reality Annual International Symposium, 1998.
- [BA01] Y. Brosseaud, F. Anfosso Ledee, *Les revêtements de chaussures limitant le bruit de roulement*, LCPC, Centre de Nantes, France, 2001.
- [BCJ06a] S. Bensmaïa, J. C. Craig, K. O. Johnson, *SAI and RA Afferent Responses to Static and Vibrating Gratings*, J. Neurophysiol. vol. 95, pp. 1771-1782, 2006.
- [BCJ06b] S. J. Bensmaïa, J. C. Craig, K. O. Johnson, *Temporal Factors in Tactile Spatial Acuity : Evidence for RA Interference in Fine Spatial Processing*, J. Neurophysiol, vol. 95, pp. 1783-1791, 2006.
- [Bel68] W. W. Bell, *Special Functions for Scientists and Engineers*, D. Van Nostrand Comp. Ltd., 1968.
- [Ber02] E. J. Berger, *Friction modeling for dynamic system simulation*, Applied Mechanics Reviews, vol. 55, no. 6, pp. 535-577, 2002.
- [BFSB04] F. Barbagli, A. Frisoli, K. Salisbury and M. Bergamasco, *Simulating human fingers : a Soft Finger Proxy Model and Algorithm*, in proc. of Haptics Symposium 2004, pp. 9-17, 2004.
- [BGV88] S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and C. M. Checkosky, *Four Channels Mediate the Mechanical Aspects of Touch*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 84, no. 5, pp. 1680-1694, 1988.
- [BH03] S.J. Bensmaïa, M. Hollins. *The vibrations of texture*, Somatosensory and Motor Research, vol. 20, pp. 33-43, 2003.
- [BHA03] M. Benali-Khoudja, M. Hafez, J. M. Alexandre, A. Kheddar, *Electromagnetically Driven High-Density Tactile Interface Based on a Multi-Layer Approach*, in proc. of International Symposium on Micromechatronics and Human Science, Nagoya, Japan, pp.147-152, 2003.
- [BHA04] M. Benali Khoudja, M. Hafez, J. M. Alexandre, A. Kheddar, *Tactile Interfaces. A State of the Art Survey*, in proc. of International Symposium on Robotics, Paris, 2004
- [BHS02] G. G. Batrouni, A. Hansen, J. Schmittbuhl, *Elastic response of rough surfaces in partial contact*, Europhys. Lett., vol. 60, no. 5, pp. 724-730, 2002.
- [BHY05] S. Bensmaïa, M. Hollins, J. Yau, *Vibrotactile Intensity and Frequency Information in the Pacinian System : A Psychophysical Model*, Perception & Psychophysics, vol. 67, no. 5, pp. 828-841, 2005.
- [Bir03] I. Birznieks, *Tactile Sensory Control of Dexterous Manipulation in Humans*, Umeå University Medical Dissertations New series, no. 822, ISSN 0346-6612, ISBN 91-7305-372-4, 2003.

- [BJ97] D. T. Blake, K. O. Johnson, S. S. Hsiao, *Monkey cutaneous SAI and RA responses to raised and depressed scanned patterns. Effects of width, height, orientation, and a raised surround*, J. of Neurophysiology, vol. 78, pp. 2503-2251, 1997.
- [BCJ06] S. J. Bensmaïa, J. C. Craig, K. O. Johnson, *Temporal Factors in Tactile Spatial Acuity : Evidence for RA Interference in Fine Spatial Processing*, J. Neurophysiol, vol. 95, pp. 1783-1791, 2006.
- [BM90] J. D. Becker, C.D. Mote, *Identification of a Frequency Response Model of Joint Rotation*, J. of Biomech. Eng., vol. 112, pp. 1-8, 1990.
- [BK06] W.M. Bergmann Tiest, A.M.L. Kappers, *Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility*. Acta Psychologica, vol. 121, pp. 1-20, 2006.
- [Ber10] G. Berkeley, *A New Theory of Vision*, 1709.
- [BM97] R. Balakrishnan, I. S. MacKenzie, *Performance differences in the fingers, wrist, and forearm in computer input control*, in proc. of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI'97, New York, pp. 303-310, 1997.
- [BOM04] M. Benali-Khoudja, C. Orange, F. Maingreud, M. Hafez, A. Kheddar, E. Pissaloux, *Shape and Direction Perception Using VITAL : A Vibro-TActiLe Interface*, in proc. of IROS, 2004.
- [Bou96] L. Bouchet, *Calcul du Rayonnement Acoustique de Structure par une Méthode de Sphère Équivalente*, thèse de doctorat soutenue publiquement à l'INSA de Lyon, 1996.
- [BS02a] J. Biggs, M. A. Srinivasan, *Haptic Interfaces. Handbook of Virtual Environments*. K. Stanney. London, Lawrence Earlbaum, Inc., chapt. 5, pp. 93-116, 2002.
- [BS02b] J. Biggs, M. A. Srinivasan, *Tangential Versus Normal Displacements of Skin : Relative Effectiveness for Producing Tactile Sensations*, 10th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Orlando, FL, IEEE Computer Soc., pp. 121-128, 2002.
- [BSB02] T. Beckenbauer, P. Spiegler, G. Van Blokland, *Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch* (Influence of the roadway texture on the tyre/road noise), Germany, 2002.
- [BHI99] A. J. Brisben, S. S. Hsiao, K. O. Johnson. *Detection of vibration transmitted through an object grasped in the hand*. The J. of Neurophysiology, vol. 81, no. 4, pp. 1548-1558, 1999.
- [Ca94] C. Cadoz. *Les réalités virtuelles*. Flammarion, Paris, 1994.
- [Car00] P. Carré, *Méthodes numériques temps-échelle et temps-fréquence pour le traitement du signal et des images*, thèse de doctorat soutenue publiquement à l'université de Poitiers.
- [Cas04] G. Casiez, *Contribution à l'étude des interfaces haptiques. Le DigiHaptic : un périphérique haptique de bureau à degrés de liberté séparés*, PhD. Thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [Cau54] N. Cauna, *Nature and function of the papillary ridges of the digital skin*. Anat. Rec., vol. 119, pp. 449-468, 1954.
- [CAU64] J. J. Caubet, *Théorie et pratique industrielle du frottement*, Paris, Dunod-Technip, 1964.
- [CHPJ90] C. E. Connor, S. S. Hsiao, J. R. Philips, K. O. Johnson. *Tactile roughness : Neural codes that account for psychophysical magnitude estimates*. J. of Neuroscience, vol. 10, pp. 3823-3836, 1990.
- [CJ92] Connor, C.E., & Johnson, K.O. (1992). *Neural coding of tactile texture : Comparison of spatial and temporal mechanisms for roughness perception*. J. of Neuroscience, vol. 12, pp. 3414-3426, 1992.
- [CLF92] G. Moy, C. Wagner, R.S. Fearing Compliant Tactile Display for Teletaction, ICRA, 2000 .

- [CM05] F. Chia-Yu, O. Manny, *Direct Measurement of Index Finger Mechanical Impedance at Low Force*, in proc. IEEE/Worlhaptics 2005, pp. 657-659, 2005.
- [CM94] E. Y. Chen, B. A. Marcus, *Exos Slip Display Research and Development*, Dynamic Systems and Control, ASME, vol. 55, no. 1, 1994.
- [Coh88] J. Cohen, *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.) Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
- [Com95] Committee on Virtual Reality Research and Development, National Research Council (1995) *Virtual Reality : Scientific and Technological Challenges*, N. I. Durlach and A. S. Mavor Editors, ISBN 0-309-05135-5, 1995.
- [Cou97] J. P. Couderc, *Analyse quantitative des composantes temps-échelle de l'EGC à haute-résolution moyenne pour l'évaluation du risque de tachycardies ventriculaires et de la mort subite après un infarctus du myocarde*, thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1997.
- [Cra99] J. C. Craig. *Grating orientation as a measure of tactile spatial acuity*. Somatosens. Mot. Res., vol. 16, pp. 197-206, 1999.
- [CRG00] D. F. Collins, K. M. Refshauge, S. C. Gandevia. *Sensory integration in the perception of movements at the human metacarpophalangeal joint*. J. Physiol., vol. 529, pp. 505-515, 2000.
- [Cro03a] S. Crochemore, *A new reference frame for tactile perceptions : Sensotact*, The 5th Rose Mary Pangborn Meeting, Boston MA, USA, 2003.
- [Cro03b] S. Crochemore, *From the definition of the consumers' expectations to the instrumental validation : how to objectivize perceptions in conception products?*, First Sino-French Workshop on Sensory Evaluation and Intelligent Techniques, Shanghai, P.R. China, 2003, pp. 17-19.
- [CS01] C. J. Cascio, K. Sathian. *Temporal cues contribute to tactile perception of roughness*. J. of Neuroscience, vol. 21, pp. 5289-5296, 2001.
- [CSKS02] A. Caclin, S. Soto-Faraco, A. Kingstone, C. Spence, *Tactile "capture" of audition*, Percept. Psychophys., vol. 64, no. 4, pp. 616-630, 2002.
- [CT00] C. Carello, M. T. Turvey. *Rotational invariants and dynamic touch*. In M. Heller (Ed.), *Touch, representation and blindness*, Oxford : Oxford University Press, pp. 27-66, 2000.
- [DCK04] A. Drif, J. Citérin, A. Kheddar, *A multi-level haptic display design*. International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2004, Sendai, Japon, pp. 3595-3600, 2004.
- [DFZ05] K. Drewing, M. Fritschi, R. Zopf, M. Ernst, M. Buss. *First Evaluation of A Novel Tactile Display Exerting Shear Force via Lateral Displacement*, ACM Trans. on Applied Perception, vol. 2, issue 2, pp. 118-131, 2005.
- [DHAA02] P. Dupont, V. Hayward, B. Armstrong, and F. Altpeter, "Single state elasto-plastic friction models," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 47, no. 5, pp. 787-792, 2002.
- [DJDH04] T. Debus, T. Jang, P. Dupont, and R. Howe, *Multi-Channel Vibrotactile Display for Teleoperated Assembly*, International J. of Control, Automation, and Systems, vol. 2, no. 3, pp. 390-397, 2004.
- [DP98] K. Van Den Doel, D. Pai, *The sounds of physical shapes*. Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol. 7, no. 4, pp. 382-395, 1998.
- [DPA06] <http://www.dpamicrophones.com/>
- [DRS03] K. Dandekar, B. I. Raju, M. A. Srinivasan, *3-D finite element models of human and monkey fingertips to investigate the mechanics of tactile sense*, J. Biomech. Eng., vol. 125, pp. 682-691, 2003.

## Références bibliographiques

---

- [DWW05] R. G. Dong , D. W. Welcome, J. Z. Wu, *Frequency weightings based on biodynamics of fingers-hand-arm system*, Ind. Health, vol. 43, pp. 516-526, 2005.
- [DWW05b] R. G. Dong, J. Z. Wu, D. E. Welcome. *Recent Advances in Biodynamics of Human Hand-Arm System*, Ind. Health 2005, vol. 43, pp. 449-471, 2005.
- [EB02] M. O. Ernst, M. S. Banks. *Humans Integrate Visual and Haptic Information in a Statistically Optimal Fashion*, Nature, vol. 415, pp. 429-433, 2002.
- [Edi04] B. B. Edin. *Quantitative Analyses of Dynamic Strain Sensitivity in Human Skin Mechanoreceptors*, J. Neurophysiol. vol. 92, pp. 3233-3243, 2004.
- [EKP92] E. A. Essock, W. K. Krebs, J. R. Prather, *An anisotropy of human tactile sensitivity and its relation to the visual oblique effect*, Exp. Brain Res., vol. 91, no. 3, pp. 520-524, 1992.
- [EKP97] E. A. Essock, W. K. Krebs, J. R. Prather. *Superior sensitivity for tactile stimuli oriented proximally-distally on the finger : implications for mixed class 1 and class 2 anisotropies*, J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform., vol. 23, pp. 515-527, 1997.
- [Elm97] F. J. Elmer, *Non linear dynamics of dry friction*, J. Phys. A : Math. Gen., vol. 30, pp. 6057-6063, 1997.
- [EST84] J. A. Ejsmont, U. Sandberg, and S. Taryma, *Influence of tread pattern on tire/road noise*, in Trans. of the Soc. of Automotive Engineers, Warrendale, 1984.
- [FBD04] M. Fritschi, M. Buss, K. Drewing, R. Zopf, M. O. Ernst, *Tactile Feedback Systems*, IROS, 2004.
- [FGOW51] E. K. Franke, H. E. von Gierke, H. L., Oestreicher, W. W. von Wittern, *The propagation of surface waves over the human body*, USAF Technical Report 6464-voir dans JASA, Aero Medical Laboratory, 1951.
- [FC91] J. L. Florens, C. Cadoz. *The Physical Model : Modeling and Instrumental Universe*. In G. De Poli, A. Piccialli, and C. Roads, Representations of Musical Signals, MIT Press, pp. 227-268, 1991.
- [FO01] K. Fujita and H. Ohmori, *A New Softness Display Interface by Dynamic Fingertip Contact Area Control*, in proc. 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, pp.78-82, 2001.
- [FT06] Y. Fang, X. Tan, *A Dynamic JKR Model with Application to Vibrational Release in Micromanipulation*, in proc. of IROS, 2006.
- [Fun93] Y. C. Fung, *Biomechanics : Mechanical Properties of Living Tissues*, second ed. New York : Springer-Verlag, 1993.
- [GA01] E. Gamzu, E. Ahissar. *Importance of Temporal Cues for Tactile Spatial-Frequency Discrimination*. The J. of Neuroscience, vol. 21, no. 18, pp. 7416-7427, 2001.
- [Ga88] W. W. Gaver. *Everyday Listening and Auditory Icons*. PhD thesis, Univeristy of California in San Diego, 1988.
- [Gag99] M. J. Gagen, *Novel acoustic sources from squeezed cavities in car tires*, J. of Acoustical. Society of America, vol. 106, no. 2, 1999.
- [GBS98] H. C. Guler, N. Berme, and S. R. Simon. *A viscoelastic sphere model for the representation of plantar soft tissue during simulation*. J. of Biomechanics, vol. 31, pp. 847-853, 1998.
- [GC02] G. O. Gibson, J. C. Craig. *Relative roles of spatial and intensive cues in the discrimination of spatial tactile stimuli*, in Percept. Psychophys., vol. 64, no. 7, pp. 1061-79, 2002.
- [GC05] G. O. Gibson, J. C. Craig, *Tactile spatial sensitivity and anisotropy*, Percept Psychophys., vol. 67, no. 6, pp. 1061-1079, 2005.

- [GDB02] M. P. Gontier De Biran (Maine de Biran), *Mémoires sur la décomposition de la pensée* tome II, 1802.
- [GH95] E. Gentaz, Y. Hatwell, *The haptic "oblique effect" in children's and adults, perception of orientation*. Perception, vol. 24, pp. 631-646, 1995.
- [GH96] E. Gentaz, Y. Hatwell, *Role of gravitational cues in the haptic perception of orientation*. Perception & Psychophysics, vol. 58, pp. 1278-1292, 1996.
- [GH97] E. Gentaz, Y. Hatwell, *The haptic oblique effect in the perception of rod orientation by blind adults*, Perception and Psychophysics, vol. 60, pp. 157-167, 1997.
- [Gib62] J. J. Gibson. *The senses considered as perceptual systems*, in Observations on Active Touch, Psychological Rev., pp. 477-491, 1962.
- [Gir02] F. Giraud, *Modélisation causale et commande d'un actionneur piézo-électrique onde progressive*, Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de puissance de Lille, 2002.
- [Gol99] E. B. Goldstein. *Sensation and Perception*. Pacific Grove, 1999.
- [Goo98] A. Goodwin, *Neural Aspects of Tactile Sensation*. Elsevier Science, 1998, ch. Extracting the Shape of an Object from the Responses of Peripheral Nerve Fibers, pp. 55-87, 1998.
- [Gra95] A. Graps, *An Introduction to Wavelets*, Computational Science and Eng., IEEE [see also Computing in Science & Eng.], vol. 2, no. 2, 1995.
- [Gre04] B. G. Green, *Temperature Perception and Nociception*, J. of Neurobiology, vol. 61, no. 1, pp. 13-29, 2004.
- [GS03a] S. Guest, C. Spence. *What role does multisensory integration play in the visuotactile perception of texture?* International J. of Psychophysiology, vol. 50, pp. 63-80, 2003.
- [GS03b] S. Guest, C. Spence, *Tactile dominance in speeded discrimination of textures*. Exp. Brain Res., vol. 150, pp. 201-207, 2003.
- [GS04] N. Gitis, R. Sivamani, *Tribometry of Skin*. Soc. of Tribologists and Lubrication Engineers Tribology Trans., vol. 47, pp. 1-9, 2004.
- [GT05a] G. J. Gerling, G. W. Thomas, *Two Dimensional Finite Element Modeling to Identify Physiological Bases for Tactile Gap Discrimination*, Human Factors and Ergonomics Soc. Annual Meeting, Orlando, 2005.
- [GT05b] G. J. Gerling, GW Thomas, *The Effect of Fingertip Microstructures on Tactile Edge Perception*, IEEE VR - World Haptics Symposium, Pisa, 2005.
- [GT05c] G. J. Gerling, G.W. Thomas, *Fingerprint lines do not affect SA-I mechanoreceptor edge sensation*, IEEE Trans. on Biomedical Eng., 2005.
- [GVL79] W. R. Gould, C. J. Vierck, M. M. Luck, *Cues supporting recognition of the orientation or direction of movement of tactile stimuli*, in Sensory Function of the Skin of Humans, in proc. of the second international Symposium on the skin senses, New York, pp. 63-73, 1979.
- [HBKY00] M. Hollins, S. Bensmaia, K. Karlof, F. Young. *Individual differences in perceptual space for tactile textures : evidence from multidimensional scaling*, Percept. Psychophys. vol. 62, pp. 1534-1544, 2000.
- [HBR98] M. Hollins, S. Bensmaia, R. Risner. *The duplex theory of tactile texture perception*, in proc. of the 14<sup>th</sup> Annual Meeting of the International Soc. for Psychophysics, pp. 115-120, 1998.

- [HBW01] M. Hollins, S. Bensmaïa, S. Washburn. *Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures*. Somatosens. Mot. Res., vol. 18, pp. 253–262, 2001.
- [HCL05] J. S. Hseo, J. H. Chung, J. J. Lee, *Application of Optical Fiber Sensor for the Tactile Sensor System*, IEEE/ICST, New Zealand, 2005.
- [Hel82] M. A. Heller, *Visual and Tactual Texture Perception : Intersensory cooperation*, Perception and Psychophysics, vol. 31, no. 4, pp. 339-344, 1982.
- [HH97] A. Z. Hajian, R. D. Howe, *Identification of the mechanical impedance at the human finger tip*. ASME J. of Biomechanical Eng., vol. 119, no. 1, pp. 109-114, 1997.
- [HI05] A. Haans, W.A. Ijsselsteijn, *Mediated Social Touch : A Review of Current Research and Future Directions*, Virtual Reality, 2005.
- [HKA00] J. F. Hamet , P. Klein, F. Anfosso-Lédée, D. Duhamel, A. Fadavi, B. Beguet, *Road profile texture and tire noise*, IVème Symposium international "Surf 2000", Nantes, France, 2000.
- [HO74] K. A. Holbrook, G. F. Odland, *Regional Differences in the Thickness of the Human Stratum Corneum - an Ultrastructural Analysis,* J. Invest. Dermatol., vol. 62, pp. 415-422, 1974.
- [HSG00] Y. Hatwell, A. Streri, E. Gentaz, Éditeurs, *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*. Paris : Presses Universitaires de France. Amsterdam, NL : John Benjamins Publishers, 2000.
- [Hug06] B. Hughes, *Haptic Exploration and the perception of texture orientations*, Haptics-e, Vol. 4, No. 2, April 21, 2006.
- [HWN04] J. D. Hwang, M. D. Williams, G. Niemeyer, *Toward Event-Based Haptics : Rendering Contact Using Open-Loop Force Pulses*, IEEE HAPTICS'04, 2004.
- [INN05] T. Igarashi, K. Nishino, S. K. Nayar, *The Appearance of Human Skin*, Technical Report : CUCS-024-05, Columbia University, New York, NY 10027, USA, 2005.
- [IS06] T. Iwamoto, H. Shinoda, *Two-dimensional Scanning Tactile Display using Ultrasound Radiation Pressure*, IEEE VR/10th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Arlington, 2006.
- [JB04] R. S. Johansson, I. Birznieks, *First Spikes in Tactile Afferents code complex Spatial Fingertip Events*, Nature Neuroscience, vol. 7, n°2, 2004.
- [JH92] K. O. Johnson, S. S. Hsiao, *Neural mechanisms of tactual form and texture perception*. Annu. Rev. Neurosci., vol. 15, pp. 227-250, 1992.
- [Jia05] X. Jiang, *On orientation and anisotropy estimation for online fingerprint authentication*, IEEE Trans. on signal processing , vol. 53, no. 10, 2005.
- [JL81] K. O. Johnson, G. D. Lamb. *Neural mechanisms of spatial tactile discrimination : Neural patterns evoked by braille-like dot patterns in the monkey*. J. of Physiology, vol. 310, pp. 117-144, 1981.
- [JL83] R. S. Johansson, R. H. LaMotte, *Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface*, Somatosensory Research, vol. 1, pp. 21-31, 1983.
- [JLL82] R. S. Johansson, U. Landström, R. Lundström, *Responses of mechanoreceptive afferent units in the glabrous skin of the human hand to sinusoidal skin displacements*, Brain research, vol. 244, pp. 17-25, 1982.
- [Joh01] K. O. Johnson, *The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors*, Current Opinion in Neurobiology, vol. 11, no. 4, pp. 455-461, 2001.
- [Joh87] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, 1987.

- [Jon03] L. Jones. <http://bioinstrumentation.mit.edu/jones/pages/Actual/mealani/index.htm>. Voir la section *Human Sensitivity and Sensory Illusions*, 2003.
- [Jon00] L. Jones. *Kinesthetic Sensing*. Machine Haptics, MIT Press, 2000.
- [Jou91] J. Jouhaneau, *Microphones*, E5160, Techniques de l'Ingénieur, 1991.
- [Jou99] J. Jouhaneau, *Notions élémentaires d'acoustique – Electroacoustique*, 2ème édition, Eyrolles, ISBN : 2-7430-0307-3, 1999.
- [JV83] R. S. Johansson, A. B. Vallbo, *Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand*. Trends in Neuroscience, vol. 6, no. 1, pp. 27-32, 1983.
- [JVBH94] K. O. Johnson, R. W. Van Boven, S. S. Hsiao, *The Perception of Two Points is Not the Spatial Resolution Threshold*. Touch, Temperature, and Pain in Health and Disease : Mechanisms and Assessments, Progress in Pain Research and Management, vol. 3, pp. 389-404, 1994.
- [JYV00] K. O. Johnson, T. Yoshioka, F. Vega-Bermudez, Tactile functions of mechanoreceptive afferents innervating the hand. *J. Clin. Neurophysiol.*, vol. 17, pp. 539-558, 2000.
- [JZB03] D. L. Jindrich, Y. Zhou, T. Becker, J.T. Dennerlein. *Non-linear viscoelastic models predict fingertip pulp force-displacement characteristics during voluntary tapping*, *J. Biomech.*, vol. 34, no. 4, pp. 497-503, 2003.
- [Ka25] D. Katz. *The world of touch*, (translated by L. E. Krueger, Original work published in 1925). Hillsdale, Lawrence Erlbaum Associates, 1925.
- [Ka36] D. Katz, *A sense of touch : The technique of percussion, palpation, and massage*. British J. of Physical Medicine, pp. 146-148, 1936.
- [Kaa95] J. H. Kaas. *The reorganization of sensory and motor maps in adult mammals*. In M. S. Gazzaniga (Editor), *The Cognitive Neurosciences*. Cambridge, MIT Press, pp. 51-71, 1995.
- [Kac66] M. Kac, *Can one hear the shape of a drum?*, *American Mathematical Monthly*, vol. 73, pp. 1-23.
- [Kal96] J. F. Kalaska, *Parietal Cortex Area 5 and Visuomotor Behaviour*, *Can. J. Physiol. Pharmacol.* vol. 74, 1996.
- [KSG05] S. Kerzhero, A. Streri, E. Gentaz, *Reference frame and haptic discrimination of orientations in infants*. *Neuroreport*. vol. 16, pp. 1833-1837, 2005.
- [KBB00] W. Kropp, F.-X. Bécot, S. Barrelet, *On the sound radiation from tyres*, *Acustica-Acta Acustica*, vol. 86, pp. 769-779, 2000.
- [Kir03] S. J. Kirkpatrick, *Optical assessment of tissue mechanics : acousto-optical elastography of skin*, in proc. of SPIE Optical Technologies in Biophysics and Medicine, vol. 5068, pp. 74-84, 2003.
- [KK06] Y. Kim, T. Kesavadas, *Material Property Recognition by Active Tapping for Fingertip Digitizing*, IEEE VR/10th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Arlington, 2006.
- [Kle00] P. Klein, *Horn effect characterisation for tire-noise radiation*, in proc. of Internoise, Nice, 2000.
- [Kle98] P. Klein, *Effet dièdre, étude du modèle de Kropp*, Rapport INRETS MMA9807, 1998.
- [KLHG03] R. L. Klatzky, S. J. Lederman, C. Hamilton, M. Grindley, R.H. Swendsen. *Feeling textures through a probe : Effects of probe and surface geometry and exploratory factors*, *Perception and Psychophysics*, vol. 65, no. 4, pp. 613-631, 2003.

- [KMYT05] M. Konyo, T. Maeno, A. Yoshida, S. Tadokoro, *Roughness Sense Display Representing Temporal Frequency Changes of Tactile Information in Response to Hand Movements*, in proc. IEEE Worldhaptics, 2005.
- [Kol94] E. Kolaczyk, *Wavelet methods for the inversion of certain homogeneous linear operators in the presence of noisy data*, Ph. D. dissertation. Department of Statistics, Stanford University, Stanford, 1994.
- [KPK00] R. L. Klatzky; D. K. Päi; E. P. Krotkov; *Perception of Material from Contact Sounds*, Presence : Teleoperators & Virtual Environments, MIT Press, vol. 9, no. 4, pp. 399-410, 2000.
- [KPNC04] K. J. Kuchenbecker, W. R. Provancher, G. Niemeyer, M. R. Cutkosky. *Haptic Display of Contact Location*, In proc. HAPTICS 2004, pp. 40-47, 2004.
- [Kro92] W. Kropp, *Ein Model zur Beschreibung des Rollgeräusches eines unprofilierten Guertltreifens auf rauher Strassenoberfläche*, PhD thesis, Institut für Technische Akustik, Berlin, Germany, 1992.
- [Kui01] A. Kuijpers, *Further analysis of the Sperenberg data Towards a better understanding of the processes influencing tyre/road noise*, report n° M+P.MVM.99.3.1, 2001.
- [KV70] M. Knibestol, A.B. Vallbo, *Single unit analysis of mechanoreceptor activity from the human glabrous skin*, Acta Physiol. Scand., vol. 80, pp. 178 –195, 1970.
- [KWB90] K. A. Kaczmarek, J. G. Webster, P. Bach-y-Rita and W. J. Tompkins, *Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution*, IEEE Trans. Biomed. Eng., 1990.
- [LA81] S. J. Lederman, S. G. Abbott. *Texture perception : Studies of intersensory organization using a discrepancy paradigm and visual versus tactual psychophysics*. J. of Exp. Psychology : Human Perception & Performance, vol. 7, no. 4, pp. 902-915, 1981.
- [LB66] J. G. Linvill, J. C. Bliss, *A direct translation reading aid for the blind*, in proc. of the Institute of Electrical Engineers, 1966.
- [Led74] S. J. Lederman, *Tactile roughness of grooved surfaces : The touching process and effects of macro-and microsurface structure*, Perception and Psychophysics, vol. 16, pp. 385-395, 1974.
- [Led79] S. J. Lederman, *Auditory texture perception*, Perception, vol. 8, pp. 93-103. 1979.
- [Led82] S. J. Lederman, J. M. Loomis, D. A. Williams, *The role of vibration in the tactual perception of roughness*. Percept. Psychophys, vol. 32, pp. 109-116, 1982.
- [Led83] S.J. Lederman. *Tactual roughness perception : Spatial and temporal determinants*. Canadian J. of Psychology, vol. 37, pp. 498-511, 1983.
- [Les04] A. Lesne, *Déterminisme et aléatoire dans les systèmes complexes : un faux débat? Colloque de Cerisy, Déterminismes et Complexités : du Physique à l'Éthique*, 2004.
- [LH03] V. Levesque, V. Hayward, *Experimental Evidence of Lateral Skin Strain During Tactile Exploration*, Eurohaptics 2003, Dublin, Ireland, 2003.
- [Lev78] S. Levin, G. Pearsall, R. Rudermann, *Von Frey's method of measuring pressure sensibility in the hand : An engineering analysis of the Semmes-Weinstein pressure aesthesiometer*. J. Hand Surg., vol. 3, pp. 211-216, 1978.
- [LHKH04] S. J. Lederman, R. D. Howe, R. L. Klatzky, C. Hamilton, *Force variability during surface contact with bare finger or rigid probe*. In proc. HAPTICS'04, pp. 154-160, 2004.
- [LK87] S. J. Lederman, R. L. Klatzky. *Hand movements : a window into haptic object recognition*. Cognitive Psychology, vol. 19, no. 3, pp. 342-368, 1987.
- [LL84] J. M. Loomis, S. J. Lederman. *What utility is there in distinguishing between active and passive touch*. Annual meeting of the Psychonomic Soc., San Antonio Texas, 1984.



## Références bibliographiques

---

- [LL86] J. Loomis, S. J. Lederman. Tactual perception. In : Boff K, Kaufman L, J. Thomas (Eds.) Handbook of Perception and Human Performance, New York : Wiley, pp. 31-41, 1986.
- [LN99] M. H. Lee, H. R. Nicholls, *Tactile sensing for mechatronics - a state of the art survey*, In Mechatronics, Elsevier, vol. 9, pp. 1-33, 1999.
- [Loo79] J. M. Loomis, *An investigation of tactile hyperacuity*, Sens Processes, vol. 3, no. 4, pp. 289-302, 1979.
- [LP06] D. Lemire, G. Pau. *FAQ sur les ondelettes* (<http://www.ondelette.com/>).
- [LS91] R. H. LaMotte, M.A. Srinivasan, *Surface microgeometry : Tactile perception and neural encoding*. In : Information processing in the somatosensory system, edited by O. Franzen and J. Westman. London, MacMillan, 1991, pp. 49-58.
- [LT01] R. W. Lindeman, J. N. Templeman, *Vibrotactile feedback for handling virtual contact in immersive virtual environments*, in Usability, Evaluation and Interface Design : Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality, M. J. Smith, G. Salvendy, D. Harris, R. J. Koubek, (Eds.), pp. 21-25, 2001.
- [LT72] S. J. Lederman, M. M. Taylor, *Fingertip force, surface geometry and the perception of roughness by active touch*. Perception and Psychophysics, vol. 12, no. 5, pp. 401-408, 1972.
- [LTJ86] S. J. Lederman, G. Thorne, B. Jones, *Perception of texture by vision and touch : Multidimensionality and intersensory integration*. J. of Exp. Psychology : Human Perception & Performance, vol. 12, no. 2, pp. 169-180, 1986.
- [LW86] R. H. LaMotte, J. Whitehouse, *Tactile detection of a dot on a smooth surface : peripheral neural events*, J. of Neurophysiology, vol. 56, no. 4, pp. 1109-1128, 1986.
- [LS91] R. H. LaMotte, M. A. Srinivasan. *Surface microgeometry : Neural encoding and perception*. Information Processing in the Somatosensory System. Wenner-Gren Intl. Symposium Series. O. Franzen and J. Westman, Macmillan Press, 1991.
- [LWB98] K. K. Liu, D. R. Williams, B. J. Briscoe, *The large deformation of a single micro-elastomeric sphere*, J. Phys. D : Appl. Phys., vol. 31, pp. 294-303, 1998.
- [LZ03] J. Lin, M. J. Zuo, *Gearbox fault diagnosis using adaptative wavelet filter*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 17, no. 6, pp. 1259-1269, 2003
- [MA04] S. Mascaro, H. Asada, *Measurement of Finger Posture and Three-Axis Fingertip Touch Force Using Fingernail Sensors*, IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 20, no. 1, pp 26-35, 2004.
- [Mac00] K. E. MacLean, *Designing with Haptic Feedback*, in proc. of IEEE Robotics and Automation (ICRA'2000), San Francisco, pp. 783-788, 2000.
- [Mac93] P. Mac Leod, *La gourmandise. Délices d'un péché*. Autrement, Coll. Mutations/Mangeurs, vol. 140, Paris, 1993.
- [Mah94] R. M. Mahoney, *Towards a control theory model of human target-directed movements*, 1994 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 1994.
- [Mal99] S. Mallat, *a Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 2nd edition, 1999.
- [Mar04] J. Marozeau, *Effet de la fréquence fondamentale sur le timbre*, thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2004.
- [Mar90] R. D. Martin. *Primate origins and evolution : a phylogenetic reconstruction*. Princeton : Princeton University Press, pp. 502-503, 1990.

- [Mat02] M. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi, *Wavelets : A New Tool for Signal Analysis*. Chapter about the Wavelet Toolbox in Matlab®'s help, 2002.
- [MBC00] E. M. Meftah, L. Belingard, C. E. Chapman. *Relative effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch*. Exp. Brain Res., vol. 132, pp. 351-361, 2000.
- [MF98] T.E. Milner, D.W. Franklin, *Characterization of Multijoint Finger Stiffness : Dependence on Finger Posture and Force Direction*, IEEE Trans. on Biomedical Eng., vol. 45, no. 11, 1998.
- [MKY98] T. Maeno, K. Kobayashi, N. Yamazaki. *Relationship between the structure of human finger tissue and the location of tactile receptors*. JSME International J., vol. 41, no. 1, 94-100, 1998.
- [MMO99] T. Miyaoka, T. Mano, M. J. Ohka. *Mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile sensation*. J. of the Acoustical Soc. Of the Am., vol. 105, no. 4, pp. 2485-2492, 1999.
- [MR02] D. Motlote Rasetshwane, *Identification of Transient Speech Using Wavelet Transforms*, Master's thesis, university of Pittsburgh, 2002.
- [MSTF00] G. Moy, U. Singh, E. Tan, R. Fearing, *Human psychophysics for teletaction system design*. Haptics-e, vol. 1, no. 3, 2000.
- [MS05] Y. Makino, H. Shinoda, *Selective Stimulation to Superficial Mechanoreceptors by Temporal Control of Suction Pressure*, First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 229-234, 2005.
- [NHT06] M. Nakatani, R. Howe, S. Tachi, *The Fishbone Tactile Illusion*, Eurohaptics Paris, 2006.
- [NII00] N. Nakazawa, R. Ikeura, H. Inooka, *Characteristics of human fingertips in the shearing direction*. Biol. Cybern. vol. 82, pp. 207-214, 2000.
- [NMY98] T. Nara, T. Maeda, Y. Yanagida, S. Tachi. *A Tactile Display Using Elastic Waves in a 'Tapered Plate*. International Conference on Artificial Reality and Tele-existence, pp. 109-116, 1998.
- [NTM01] T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higushi, S. Ando, S. Tachi, *An application of SAW to a tactile display in virtual reality*, IEEE Ultrasonic symposium, 2000.
- [NTMb01] T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higushi, S. Ando, S. Tachi, *Surface Acoustic Wave Tactile Display*, Computer Graphics and Applications, vol. 21, pp.56-63, 2001.
- [OAD98] H. Olsson, K. J. Åström, C. C. De Wit, M. Gäfwert, and P. Lischinsky, *Friction models and friction compensation*, Eur. J. Contr., vol. 4, no. 3, pp. 176-195, 1998.
- [Pas05] [http://www.cim.mcgill.ca/~jay/index\\_files/research\\_files/actuators.htm](http://www.cim.mcgill.ca/~jay/index_files/research_files/actuators.htm)
- [Paw97] D. T. V. Pawluk, *A viscoelastic model of the human fingerpad and a holistic model of human touch*. Ph.D. Dissertation, Harvard University, 1997.
- [PB72] A. C. Park, C. B. Baddiel. *Rheology of stratum corneum. I. A molecular interpretation of the stress-strain curve*. J. Soc. Cosmet. Chem., vol. 23, pp. 3-12, 1972.
- [PCS02] M. Pare, H. Carnahan, A.M. Smith, *Magnitude Estimation of Tangential Force Applied to the Fingerpad*. Exp. Brain Research, vol. 142, pp. 342-348, 2002.
- [Pee98] C. Peel, *Systematic design and development of an artificial skin* PhD dissertation, Queensland university, Australia, 1998.
- [Pel05] G. Pellerin, *Acoustique architecturale, théorie et principes*, cours du CNAM, 2005.
- [PFH97] W. J. Peine, K. C. Foucher, R. D. Howe, *Finger Speed During Single Digit Palpation*. Human Factors, 1997.

- [PH03] J. Pasquero, V. Hayward, *STReSS : A Practical Tactile Display System with One Millimeter Spatial Resolution and 700 Hz Refresh Rate*, EuroHaptics, Dublin, 2003.
- [PH99] D. T. Pawluk, R. D. Howe, *Dynamic Lumped Element Response of the Human Fingerpad*, J. Biomech Eng., vol. 121, no. 2, pp. 178-183, 1999.
- [PH99b] D. T. Pawluk, R. D. Howe. *Dynamic contact of the human fingerpad against a flat surface*. J. of Biomechanical Eng., vol. 121, pp. 605–611, 1999.
- [Phe96] S. Pheasant, *Bodyspace - anthropometry, ergonomics and the design of work*, 2<sup>nd</sup> Edition, ISBN 0748403264, 1996.
- [PJ81] J. R. Philips, K. O. Johnson. *Tactile Spatial Resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition*, J. Neurophysiol., vol. 46, pp. 1177-1191, 1981.
- [PJ81a] J. R. Philips, K. O. Johnson. *Tactile Spatial Resolution. II. Neural representation of bars, edges, and gratings in monkey primary afferents*. J Neurophysiol., vol. 46, pp. 1192-1203, 1981.
- [PJ81b] J. R. Philips, K. O. Johnson, *Tactile Spatial Resolution III. A continuum mechanics model of skin predicting mechanoreceptor response to bar edges and gratings*. J Neurophysiol., vol. 46, pp. 1204-1225, 1981.
- [PMD91a] J. M. Pereira, J. M. Mansour, B. R. Davis, *Dynamic measurement of the viscoelastic properties of skin*. J. of Biomechanics, vol. 24, no. 2, pp. 157-162, 1991.
- [PMD91b] J. M. Pereira, J. M. Mansour, B. R. Davis. *The effects of layer properties on shear disturbance propagation in skin*, J. of Biomechanical Eng., vol. 113, no. 1, pp. 30-35, 1991.
- [POL06] [http://www.polytec.com/eur/\\_files/LM\\_Vibrometry\\_Tutorial.pdf](http://www.polytec.com/eur/_files/LM_Vibrometry_Tutorial.pdf)
- [PSR02] M. Paré, A.M. Smith, F.L. Rice, *Distribution and Terminal Arborizations of Cutaneous Mechanoreceptors in the Glabrous Finger Pads of the Monkey*. J Comp.Neurol., vol. 445, no. 4, pp. 347-359, 2002.
- [PT01] B. N. J. Persson, E. Tosatti, *The effect of surface roughness on the adhesion of elastic solids*, J. of chemical physics, vol. 115, no. 12, 2001.
- [Qui98] A. Quinquis. *Temps-frequence*, Cours de l'ENSIETA, 1998.
- [RDS94] F. L. Roby, , K. Dandekar, M. A. Srinivasan. *Study of Fingertip Deformation Under Indentations by Circular and Rectangular Indentors*, report to the MIT Summer Research Program. MIT. Cambridge, 1994.
- [REV 50] G. Revesz, *Psychology and art of the blind*, London, Longmans Green, 1950.
- [RH67] I. Rock, C. S. Harris, *Vision and touch*, Scientific American, vol. 216, pp. 96-104, 1967.
- [RMC04] C. Roques-Carmes, C. Millot, S. Crochemore, *Correlation between tactile evaluations and instrumental data associated with modeling using the concept of contact mechanics*, in proc. of the International Workshop on Materials and Sensations, MS2004, Pau, France, 2004.
- [RMS99] T. J. Royston, H. A. Mansy, R. H. Sandler, *Excitation and propagation of surface waves on a viscoelastic half-space with application to medical diagnosis*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 106, no. 6, 1999.
- [Rob02] G. Roblès de la Torre, *Comparing the Role of Lateral Force During Active and Passive Touch: Lateral Force and its Correlates are Inherently Ambiguous Cues for Shape Perception under Passive Touch Conditions*, Eurohaptics Conference, Edinburgh, pp. 159-164, 2002.
- [RP00] J. L. Richmond, D. K. Pai. *Active Measurement of Contact Sounds*, in proc. of the 2000 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, 2000.

## Références bibliographiques

---

- [RRG05] V. Raimbault, O. Richoux, B. Gazengel, *Caractérisation du rayonnement acoustique d'une plaque en champ proche par Velocimétrie Laser Doppler*, 17<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, 2005.
- [RS99] A. R. Roddy, J. D. Stosz, *Fingerprint feature processing techniques and poroscopy*. In L. C. Jain, U. Halici, I. Hayashi, and S. B. Lee, editors, *Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition*. CRC Press, Boca Raton, 1999.
- [RSA00] B. Richardson, M. Symmons, R. Accardi. *The TDS: A New Device for Comparing Active and Passive-Guided Touch*. In *IEEE Trans. on Rehabilitation and Eng.*, vol. 8, pp. 414-417, 2000.
- [RSGS03] B. I. Raju, K. Swindells, S. Gonzalez, M. A. Srinivasan. *Quantitative Ultrasonic Methods for Characterization of Skin Lesions In Vivo*. *Ultrasound in Medicine and Biology*, vol. 29, no. 6, pp. 825-838, 2003.
- [RV63] I. Rock, J. Victor, *Vision and touch : an experimentally induced conflict between the two senses*, *Science*, vol. 143, pp. 594-596, 1963.
- [SAM05] Ö. T. Sari, G. G. Adams, S. Müftü, *Nano-Scale Effects in the Sliding and Rolling of a Cylinder on a Substrate*, *J. of Applied Mechanics*, vol. 72, no. 5, pp. 633-640, 2005.
- [SC02] I. R. Summers, C. M. Chanter. *A Broadband Tactile Array on the Fingertip*, *J. of the Acoustical Soc. of America*, vol. 112, no. 5, pp. 2118-2126, 2002.
- [SC86] C. E. Sherrick, R. W. Cholewiak, *Cutaneous Sensitivity*, In K. R. Boff & L. Kaufman & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance*, John-Wiley, New York, vol. 1, 1986.
- [SCDL02] A. M. Smith, C. E. Chapman, M. Deslandes, J.-S. Langlais, M.-P. Thibodeau, *Role of friction and tangential force variation in the subjective scaling of tactile roughness*. *Exp. Brain Research*, vol. 144, pp. 211-223, 2002.
- [SD96] M.A. Srinivasan, K. Dandekar. *An investigation of the mechanics of tactile sense using two-dimensional models of the primate fingertip*. *J. Biomech. Eng.*, vol. 118, pp. 48-55, 1996.
- [SE02] U. Sandberg, J. A. Ejsmont, *Tyre/Road Noise Reference Book*. Informex, Ejsmont & Sandberg Handelsbolag Harg, SE-59040 Kisa, Sweden, 2002.
- [SF98] U. Singh and R. S. Fearing, *Tactile After-Images from Static Contact*, in *proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, vol. 64, pp. 163-170, 1998.
- [SGH02] A. M. Smith, G. Gosselin, B. Houde, *Deployment of fingertip forces in tactile exploration*, *exp. brain research*, 2002.
- [SHM06] H. Shirado, Y. Nonomura, T. Maeno, *Realization of Human skin-like texture by emulating surface shape pattern and elastic structure*, in *proc. of HAPTICS 2006*, Arlington, Virginia, 2006.
- [SM95] M. A. Srinivasan and R. H. LaMotte. *Tactual Discrimination of Softness*, *J. of Neurophysiology*, vol. 73, no. 1, pp. 88-101, 1995.
- [SMM98] E. R. Serina, E. Mockenstrum, C. D. Mote Jr., D. Rempel, *A Structural Model of the Forced Compression of the Fingertip Pulp*, *J. Biomech.*, vol. 31, pp. 639-646, 1998.
- [SP95] J. C. Stevens, M. Q. Patterson, *Dimensions of spatial acuity in the touch sense : changes over the life span*, *Somatosens. Mot. Res.*, vol. 12, pp. 29-47, 1995.
- [Sri89] M. A. Srinivasan. *Surface deflection of primate fingertip under line load*. *J. Biomechanics*, vol. 22, pp. 343-349, 1989.
- [SRW05] M. A. Symmons, B. L. Richardson, D. B. Wuillemin, G. H. VanDoorn. *Active versus passive touch in three dimensions*. *WorldHaptics Conference*, Pise, 2005.

## Références bibliographiques

---

- [SSM98] M. Shinohara, Y. Shimizu, A. Mochizuki, *Three-Dimensional Tactile Display for the Blind*, IEEE Trans. on Rehabilitation Eng., vol. 6, no. 3, pp. 249-256, 1998.
- [SSS05] J. Sarkar, A. Sharma, V. Shenoy, *Adhesion and Debonding of Soft Elastic Films : Crack Patterns, Metastable Pathways, and Forces*, Langmuir, vol. 21, pp. 1457-1469, 2005.
- [STC05] I. Sarakoglou, N. Tsagarakis, D.G. Caldwell. *A portable fingertip tactile feedback array - transmission system reliability and modelling*, Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005.
- [Ste57] S. S. Stevens, *On The Psychophysical Law*, Psychological Review, vol. 64, no. 3, pp. 153-181, 1957.
- [SVC04] M. Salada, P. Vishton, J.E. Colgate, E. Frankel, *Two experiments on the perception of slip at the fingertip*, 12<sup>th</sup> International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 146-153, 2004.
- [SVC05] M. Salada, J. E. Colgate, P. Vishton, E. Frankel, *An experiment on tracking surface features with the sensation of slip*, in proc. IEEE/Worlhaptics, pp. 132-137, 2005.
- [SWL90] M. A. Srinivasan, J. M. Whitehouse, R. H. LaMotte, *Tactile detection of slip : Surface microgeometry and peripheral neural codes*, J. Neurophysiology, vol. 63, no. 6, pp. 1323-1332, 1990.
- [TMK06] M. Tada, M. Mochimaru, T. Kanade. *How does a fingertip slip? — Contact mechanics of a fingertip under tangential loading*, Eurohaptics, Paris, 2006.
- [TNYM06] M. Tada, N. Nagai, H. Yoshida, T. Maeno. *Iterative FE analysis for non-invasive material modeling of a fingertip with layered structure*, Eurohaptics 2006.
- [TATK06] H. Z. Tan, B. D. Adelstein, R. Traylor, M. Kocsis, E. D. Hirtleman, *Discrimination of Real and Virtual High-Definition Textured Surfaces*, in proc. IEEE HAPTICS'06, 2006.
- [TBBD05] M. Tournalias, M.-A. Bueno, L. Bigué, B. Durand, M. Renner, *Contactless Optical Extensometer for Textile Materials*, Exp. Mechanics., vol. 45, pp. 420-426, 2005.
- [TDT05] V. Tannan, R.G. Dennis, M. Tommerdahl. *Stimulus-dependent effects on tactile spatial acuity*, Behavioral and Brain Functions, vol. 1, p. 18, 2005.
- [TH05] N. G. Tsagarakis, T. Horne, D. G. Caldwell, *Slip Aestheasis : A Portable 2D Slip/Skin Stretch Display for the Fingertip*, in proc. IEEE/Worlhaptics, pp. 214-219, 2005.
- [THV96] P. M. Taylor, A. Hosseini-Sianaki, C. J. Varley, *An Electrorheological Fluid-Based Tactile Array for Virtual Environments*, in proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, April 1996.
- [Til01] A. Tilley, *The measure of man and woman : human factors in design*, ISBN 0-4710-9955-4, 2001.
- [TL75] M. M. Taylor, S. J. Lederman. *Tactile roughness of grooved surfaces : A model and the effect of friction*, Perception and Psychophysics, vol. 17, pp. 23-36, 1975.
- [TMM02] N. Tatara, M. Mori, T. Maeno, *Method for Eliciting Tactile Sensation using Vibrating Stimuli in Tangential Direction : Effect of Frequency, Amplitude and Wavelength of Vibrating Stimuli on Roughness Perception*, in proc. of the 33rd International Symposium on Robotics, 2002.
- [Tru98] F. Truchetet. *Ondelettes pour le signal numérique*. Hermès, collection Traitement du Signal édition, 1998.
- [TSEC94] H. Tan, M. Srinivasan, B. Eberman, B. Chang. *Human factors for the design of force-reflecting haptic interfaces*. In Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Chicago, in proc. of the ASME Winter Annual Meeting., pp. 353-359, 1994.

- [Van89] C. L. Van Doren, *A model of spatiotemporal tactile sensitivity linking psychophysics to tissue mechanics*, J. Acoust. Soc. Am., vol. 85, no. 5, pp. 2065-2080, 1989.
- [VBJ99] F. Vega-Bermudez, K.O. Johnson, *Surround suppression in the responses of primate SA1 and RA mechanoreceptive afferents mapped with a probe array*. J. Neurophysiol. vol. 81, pp. 2711-2719, 1999.
- [VH01] S. Venema, B. Hannaford, *A Probabilistic Representation of Human Workspace for Use in the Design of Human Interface Mechanisms*, IEEE Trans. Mechatronics, vol. 6, pp. 286-294, 2001.
- [VJ04] F. Vega-Bermudez, K. O. Johnson, *Fingertip skin conformance accounts, in part, for differences in tactile spatial acuity in young subjects, but not for the decline in spatial acuity with aging*. Perception & Psychophysics, vol. 66, no. 1, pp. 60-67, 2004.
- [VPW06] R. Velazquez, E. Pissaloux, M. Wiertelwski, *A Compact Tactile Display for the Blind with Shape Memory Alloys*, 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006.
- [VJ84] A. B. Vallbo, R. S. Johansson, *Properties of Cutaneous Mechanoreceptors in the Human Hand*, Human Neurobiology, vol. 3, no. 1, pp. 3-14, 1984.
- [VBJ94] R. W. Van Boven, K. O. Johnson, *The limit of tactile spatial resolution in humans : Grating orientation discrimination at the lip, tongue and finger*, Neurology, vol. 44, pp.2361-2366, 1994.
- [VPV87] C. L. Van Doren, D. G. Pelli, R. T. Verillo, *A device for measuring tactile spatiotemporal sensitivity*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 81, no. 6, pp. 1906-1916, 1987.
- [WDR02] J. Z. Wu, R. G. Dong, S. Rakheja, A.W. Schopper, *Simulation of mechanical responses of fingertip to dynamic loading*. Med Eng Physics vol. 24, pp. 253-264, 2002.
- [WDS03] J. Z. Wu, R. G. Dong, A. W. Schopper, W. P. Smutz, *Analysis of skin deformation profiles during sinusoidal vibration of fingerpad*. Ann. Biomed. Eng., vol. 31, pp. 867-878, 2003.
- [Web46] E. H. Weber, *De Tactu and Der Tastsinn und das Gemeingefuhl*, In H. E. Ross and D. J.Murray (eds) E. H. Weber on the Tactile Senses, Hove : Erlbaum (UK), Taylor & Francis, in R. Wagner (ed.), Handwörterbuch der Physiologie, vol. 3, pp. 481-588, originally published in 1846.
- [Wei68] S. Weinstein, *Intensive and extensive tactile sensitivity as a function of body-part, sex and laterality*. In : The Skin Senses, edited by Springfield, C.C. Thomas, pp. 195-218, 1968.
- [WF95] T. Watanabe, S. A. Fukui, *A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration*, IEEE Conference on robotics and automation, pp. 1134-1139, 1995.
- [WG00] H. E. Wheat, A. W. Goodwin, *Tactile Discrimination of Gaps by Slowly Adapting Afferents : Effects of Population Parameters and Anisotropy in the Fingerpad*, J. Neurophysiol., vol. 84, pp. 1430-1444, 2000.
- [WHS04] Q. Wang, V. Hayward, A.M. Smith, *A New Technique For The Controlled Stimulation Of The Skin*, in proc. of the Canadian Medical and Biological Eng. Soc. Conference, CMBEC, Quebec City, Canada, 2004.
- [WH06a] Q. Wang, V. Hayward, *In Vivo Biomechanics of the Fingerpad Skin Under Local Tangential Traction*, J. of Biomechanics, 2006.
- [WH06b] Q. Wang, V. Hayward, *Compact, Portable, Modular, High-performance, Distributed Tactile Display Device Based on Lateral Skin Deformation*, IEEE VR/10th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Arlington, 2006.
- [WLH02] C. R. Wagner, S. J. Lederman, R. D. Howe. *A tactile shape display using RC servomotors*, in proc. of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2002.

## Références bibliographiques

---

- [WPFH97] P. S. Wellman, W. J. Peine, G. Favalora, R. D. Howe, *Mechanical Design and Control of a High-Bandwidth Shape Memory Alloy Tactile Display*, in A. Casals and A. T. de Almeida, eds., Exp. Robotics V. Lecture notes in control and information sciences, Springer-Verlag, Berlin, vol. 232, pp. 56-66, 1997.
- [WRS03] S. Wan, B. I. Raju, M. A. Srinivasan, *Robust deconvolution of high frequency ultrasound images using wavelets and higher order spectral analysis*, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 50, no. 7, pp. 1286-1295, 2003.
- [WSW99] A. C. Wright, H. K. Song, F. W. Wehrli, *In Vivo MR Micro Imaging With Conventional Radiofrequency Coils Cooled to 77°K*, Magnetic Resonance in Medicine, vol. 43, pp. 163-169, 2000.
- [Yak05] A. S. Yakovlev, *Window Fourier and Wavelet transforms Properties and Applications of Wavelets*, in JASS, 2005
- [YGDS01] T. Yoshioka, B. Gibb, A. K. Dorsch, S. S. Hsiao, K.O. Johnson. *Neural Coding Mechanisms Underlying Perceived Roughness of Finely Textured Surfaces*, J. of Neuroscience, vol. 21, no. 17, pp. 6905-6916, 2001.
- [YIT01] A. Yamamoto, T. Ishii, M. Takasaki, H. Yasui, T. Higuchi, *Tactile Interface using Ultra-Thin Electrostatic Actuator*, in proc. of the 32<sup>nd</sup> International Symposium on Robotics, 2001.
- [You04] P. Young, *Helmholtz's Equation in Spherical Polar Coordinates*, Classes 116B, University of California, Santa Cruz, 2004.
- [ZGS03] M. Zampini, S. Guest, C. Spence, *The Role of Auditory Cues in Modulating the Perception of Electric Toothbrushes*, Dent. Res., vol. 82, no. 11, pp. 929-932, 2003.
- [ZVHM04] H. Zahouani, R. Vargiolu, P. Humbert, A. Mavon, *Sonde tribo acoustique*, brevet français 2.867.276, extension PCT WO 2005/085805, 2004.
- [ZVLM04] H. Zahouani, R. Vargiolu, A. Lebot, A. Mavon, *Acoustic tribology of human skin*, World Tribology Congress III, ASME, 2005.

## Références personnelles

- [BGMS06] M. Biet, F. Giraud, F. Martinot, B. Semail, *A Piezoelectric Tactile Display Using Travelling Lamb Wave*, in proc. of Eurohaptics 2006, Paris, France, 2006.
- [MPC04] F. Martinot, P. Plénacoste, C. Chaillou, *The Digitracker, A Three Degrees of Freedom Pointing Device*. in proc. of the Eurographics Symposium on Virtual Environments, 2004.
- [MPC04b] F. Martinot, P. Plénacoste, C. Chaillou, *Interface isotonique destinée à la commande d'un objet, réel ou virtuel*, brevet français n°0314114, 2003, extension PCT WO 2004/03086, 2004.
- [MPC05] F. Martinot, P. Plénacoste, C. Chaillou, *Lateral Touch and Frictional Vibration of the Human Fingerprint*, rapport de recherche INRIA, RR-5640, 2005.
- [MPC05a] F. Martinot, P. Plénacoste, C. Chaillou, *Sounds and Vibrations of Human Fingerprints*, in proc. of the International Conference on Sensing Technologies IEEE/ICST'2005, Palmerston North, New Zealand, 2005.
- [MPC05b] F. Martinot, P. Plénacoste, C. Chaillou, *A Fractal and Event-Based Theory of Tactile Perception*, in proc. ENACTIVE 2005, Genoa, Italy, November 2005.
- [MPC05d] F. Martinot, P. Plénacoste, C. Chaillou, *Stimulateurs Tactiles, de l'Analyse au Design*, dans les proc. de GTAS 2005, Lille, France, Juin 2005.

## Références bibliographiques

---

[MPC06] F. Martinot, P. Plénacoste, C. Chaillou, *Mechanical Responses of the Fingerpad and Distal Phalanx to Friction of a Grooved Surface : Effect of the Contact Angle*, in proc. of Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (part of IEEE-VR), Alexandria, Virginia, USA, 2006.

[MPC06b] F. Martinot, *The Influence of Surface Commensurability on Roughness Perception With a Bare Finger*, in proc. of Eurohaptics 2006, Paris, France, 2006.

[ZGLM06] D. Zheng, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, F. Martinot, *A Force Feedback Device Actuated by Piezo-Electric Travelling Wave Ultrasonic Motors*, in proc. of ACTUATOR 2006, Bremen, Germany, 2006.





## Résumé

**F. MARTINOT, Caractérisation du Rôle de la Dynamique du Toucher dans la Perception de Textures, Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 2006.**

La connaissance des biomécanismes du toucher latéral est un prérequis à la conception d'interfaces homme-machine visant à simuler l'exploration haptique de la texture. Dans le domaine de recherche, l'influence de la dynamique du frottement d'usage sur la perception de la rugosité n'est pas encore clairement établie. D'abord, l'action n'est pas suffisamment caractérisée. Ensuite, la description des sources vibratoires au contact reste méconnue. Enfin, le rôle frictionnel et tactile des crêtes de l'empreinte digitale joué dans le jugement de rugosité reste à définir.

Grâce à des techniques de mesure et de traitement du signal, nous avons analysé le comportement dynamique in vivo des membres, de la pulpe et des dermatoglyphes du doigt. Notre travail fait état d'un guidage du mouvement du doigt de nature aléatoire. Nos campagnes de mesures mettent en évidence l'absence de relation consistante entre le relief de texture et les phénomènes vibratoires au contact. Celle-ci s'explique par la complexité de la tribologie du toucher. Pour finir, nous montrons la nécessité d'emboîtement entre états de surfaces commensurables pour percevoir la texture fine. Le motif d'empreinte justifie la régulation du mouvement volontaire visant à la perception de la microtexture : nous devons explorer si la forme de la texture de notre peau s'adapte à celle du matériau touché pour quantifier l'intensité de sa rugosité. Même si les phénomènes macroscopiques expliquent principalement la perception, nos travaux suggèrent qu'il est important de considérer la micromécanique du toucher, surtout dans le cas de la texture fine. De fait, ceci nous conduit à apporter de nouvelles recommandations de conception pour les afficheurs tactiles.

**Mots-clés :** instrumentation, vibroacoustique, haptique, toucher latéral, texture.

## Abstract

**F. MARTINOT, Characterization of the Dynamic Influence of Touch in Texture Perception, Doctoral Dissertation of the Science and Technology University of Lille, 2006.**

The biomechanical knowledge of lateral touch is essential for the design of man-machine interfaces allowing to simulate the haptic exploration of texture. In the research field, the influence of the friction dynamics used to perceive still remains unclear. First, the action is not sufficiently characterized. Then, there is no existing description of vibratory sources at contact. To finish the frictional and tactile role of fingerprint ridges in roughness estimates is an open research question.

Using measurement and signal processing techniques, we analyzed the in vivo mechanical behavior of limbs, pulp and dermatoglyphs of the finger. We found a random strategy in directed movement. Measurement campaigns also allowed to conclude on an absence of consistent relationships between the texture relief and vibratory phenomena at contact. This can be explained by the tribologic complexity of touch. To finish, we showed the importance of the interlocking between surface states to perceive the fine texture. The fingerprint pattern justifies the control of the voluntary movement to perceive the microtexture : we have to explore if the shape of the skin texture conforms to the relief of the haptic texture to quantify its roughness intensity. Even if macroscopic phenomena mainly explain perception, we suggest that it is important to consider the micromechanics of touch. This particularly applies in the case of fine texture. Consequently, this leads us to bring new design guidelines for tactile displays.

**Keywords :** instrumentation, vibroacoustics, haptics, lateral touch, texture.

