

---

École doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

# Conception et contrôle d'actionneurs électro-actifs dédiés à la stimulation tactile

## THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 13 décembre 2007

pour l'obtention du

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

(spécialité Génie Électrique)

par

Mélanie BIET

### Composition du jury

*Président :* Pr. Yves Perriard

*Directeur de thèse :* Pr. Betty Lemaire-Semail

*Rapporteurs :* Pr. Vincent Hayward

Pr. François Costa

*Examineurs :* Dr. Jean-François Rouchon

Dr. Frédéric Giraud

Pr. Christophe Chaillou

Mis en page avec la classe thloria.

## Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement de trois années de travail au sein du L2EP. Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier particulièrement Betty Semail, ma directrice de thèse, et Frédéric Giraud, pour leur disponibilité, leur écoute et leurs conseils tout au long de cette thèse.

Je remercie également Vincent Hayward et François Costa pour leurs rapports sur cette thèse, ainsi que les autres membres du Jury, Yves Perriard, Jean-François Rouchon et Christophe Chaillou.

Je remercie chaleureusement François Martinot, François Pigache et Géry Casiez pour les échanges riches et nombreux, pour m'avoir apporté de nouvelles compétences et avoir partagé à un moment ou un autre l'évolution de mes travaux.

J'ai par ailleurs beaucoup apprécié le support technique et la sympathie des équipes de l'atelier électronique de Polytech'Lille et du P2, Thierry Flamen, Daniel Montignies, Olivier Ferla et de l'atelier mécanique de Polytech'Lille et de l'ENSAM, Thomas Dienne, Yohann Dondt, Michel Leleu.

Pour finir, je remercie mes parents et grands-parents pour m'avoir toujours soutenue malgré les difficultés et sans qui je n'aurais jamais pu réussir mes études.





*Je dédie cette thèse  
à ma famille.*



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
---------------------	----------

## **Chapitre 1**

### **Contexte des dispositifs haptiques d'interaction**

1.1	Introduction . . . . .	5
1.2	Les propriétés du toucher . . . . .	7
1.2.1	Physiologie Sensorielle : Somesthésie . . . . .	7
1.2.2	Comportement doigt/surface . . . . .	12
1.2.3	La psychophysique de la rugosité . . . . .	20
1.2.4	Comment obtenir des illusions tactiles ? . . . . .	25
1.3	Des stimulateurs tactiles adaptés à la physique du toucher . . . . .	29
1.3.1	Simulation de la forme . . . . .	30
1.3.2	Simulation de la souplesse/mollesse . . . . .	34
1.3.3	Simulation de textures . . . . .	36
1.4	Conclusion du chapitre . . . . .	47

## **Chapitre 2**

### **Caractérisation de la stimulation vibrotactile Haute Fréquence**

2.1	Introduction . . . . .	51
2.2	Perception réglable de la rugosité des surfaces . . . . .	52
2.2.1	Contexte : expérience de Watanabe et al. . . . .	52
2.2.2	Motivations pour une caractérisation expérimentale des dispositifs capables d'atténuer la rugosité . . . . .	54
2.2.3	Principe . . . . .	54
2.2.4	Mise en oeuvre expérimentale . . . . .	55
2.2.5	Evaluation . . . . .	59
2.3	Stimulation globale par modification spatio-temporelle des efforts de cisaillement sur la pulpe du doigt . . . . .	67

2.3.1	Dispositif expérimental de génération des stimuli . . . . .	68
2.3.2	Etude qualitative de la sensation . . . . .	72
2.4	Conclusion . . . . .	75

<p><b>Chapitre 3</b>  <b>Conception du dispositif tactile</b></p>
-----------------------------------------------------------------------

3.1	Etude préliminaire : choix d'un modèle d'interaction . . . . .	78
3.1.1	Lubrification active . . . . .	78
3.1.2	Effet "squeeze film" . . . . .	86
3.2	Détermination et spécification du cahier des charges . . . . .	96
3.2.1	Contraintes ergonomiques . . . . .	96
3.2.2	Contraintes d'encombrement . . . . .	97
3.2.3	Conditions pour l'obtention de l'effet glissant . . . . .	97
3.2.4	Contrainte sur la tension d'alimentation . . . . .	98
3.2.5	Contrainte sur la tenue mécanique . . . . .	98
3.3	Dimensionnement et réalisation du dispositif tactile . . . . .	98
3.3.1	Etude analytique . . . . .	99
3.3.2	Etude numérique . . . . .	109
3.3.3	Réalisation du monomorphe . . . . .	113
3.4	Evaluations expérimentales . . . . .	114
3.4.1	Mesure de l'amplitude de vibration . . . . .	114
3.4.2	Analyse qualitative du caractère glissant . . . . .	115
3.5	Conclusion . . . . .	116

<p><b>Chapitre 4</b>  <b>Evaluation de la plaque tactile</b></p>
----------------------------------------------------------------------

4.1	Evaluation des dispositifs haptiques . . . . .	120
4.1.1	Evaluation de dispositifs à indentation normale . . . . .	121
4.1.2	Evaluation des dispositifs à vibration . . . . .	121
4.1.3	Évaluation de dispositifs de cisaillement . . . . .	123
4.1.4	Evaluation des dispositifs qui modifient le coefficient de frottement . . . . .	124
4.1.5	Evaluation de stimulateurs de forme . . . . .	125
4.2	Évaluation des performances du dispositif dans le cadre de la simulation de périodes spatiales . . . . .	126
4.2.1	Problématique . . . . .	126
4.2.2	Seuils différentiels de la période spatiale obtenus sur des échantillons réels en condition de toucher actif . . . . .	127

---

4.2.3	Discrimination de la période spatiale simulée . . . . .	130
4.3	Conclusion . . . . .	141
	<b>Conclusion</b>	<b>143</b>
	<b>Glossaire</b>	<b>149</b>
	<b>Annexes</b>	<b>151</b>
	<b>Annexe A Condition d'obtention de l'effet glissant sur le stator d'un moteur piézoélectrique</b>	<b>151</b>
	<b>Annexe B Valeur numérique des matériaux</b>	<b>155</b>
	<b>Annexe C Réalisation du monomorphe</b>	<b>157</b>
C.1	Dessin de définition de la plaque . . . . .	157
C.2	Schéma d'ensemble . . . . .	158
C.3	Connections . . . . .	158
	<b>Annexe D Expérience de détermination du seuil différentiel</b>	<b>161</b>
D.1	Le seuil différentiel . . . . .	161
D.2	Le rapport de Weber . . . . .	163
D.3	Analyse des résultats . . . . .	163
	<b>Bibliographie</b>	<b>165</b>



# Table des figures

1.1	Influences du système kinesthésique et cutané (adapté d'après [LTSC02]). . . . .	7
1.2	Les mécanorécepteurs cutanés [hta]. . . . .	9
1.3	Seuil de discrimination spatiale. La longueur de la barre indique, pour chaque région du corps, la plus petite distance entre deux stimulus simultanés pour qu'il soient détectés comme séparés (adapté d'après [RO01]). . . . .	11
1.4	Seuil de détection psychophysique de la fréquence sur une gamme de 0.4 à 500 Hz relativement à l'amplitude du stimulus (adapté d'après [BGVC88]). . . . .	12
1.5	Relations entre la psychophysique et la neurophysiologie. . . . .	13
1.6	Déformation de la surface de la pulpe du doigt suite à une indentation normale (d'après [MTL]).	17
1.7	Schématisation de la coupe transverse de la pulpe du doigt et des empreintes digitales soumises aux différents phénomènes de contact dynamique. . . . .	18
1.8	Mécanismes potentiellement impliqués dans l'émergence de sources de bruit au contact (d'après [MABC06]). . . . .	19
1.9	Mesures acoustiques et vibrométriques supportant l'hypothèse d'un rôle frictionnel des rainures d'empreinte (d'après [Mar06b]). . . . .	22
1.10	Intensité de la rugosité perçue en fonction de l'angle relatif en degrés et des stimuli présentés.(d'après [Mar06a]). . . . .	24
1.11	Dispositif permettant de créer l'illusion de trous et de bosses (d'après [GRDLT]). . . . .	25
1.12	Schéma de principe et gros-plan du dispositif d'étude de la perception du glissement(d'après [SVCF04]). . . . .	26
1.13	Illusion de courbure (d'après [GTB02]). . . . .	27
1.14	Démonstration manuelle de "l'illusion du peigne" (d'après [HCH00]). Pour réaliser l'expérience, il suffit d'un peigne et d'un baton. En caressant doucement les dents avec un mouvement de va-et-vient, la peau est cisailée localement. . . . .	28

1.15	Un exemple de motif qui permet d'induire l'illusion d'une forme concave. Le motif dessiné en 3 dimensions à droite a été gravé sur une plaque d'aluminium [NHT06]. . . . .	28
1.16	(a) Vue transversale des doigts sur un objet physique ; (b) Déformation de la pulpe des doigts similaire à celle observée avec un objet réel. Pour cela, il suffit de faire tourner la plaque autour d'un point situé au sommet de l'os de la phalange distale (cercles en pointillés), et de garder la plaque tangente à la forme virtuelle au point de contact virtuel (d'après [DH05]). . . . .	29
1.17	Le dispositif à 2 degrés de liberté de simulation du glissement et sa vue éclatée, monté sur un PHANToM (d'après [IMVO05]). . . . .	30
1.18	Concept du dispositif haptique "encounter-type" pour 3 doigts et le premier prototype (d'après [YMS <sup>+</sup> 04]). . . . .	32
1.19	Le Morpheotron. Une plaque libre de bouger dans le plan horizontal (a) pivote de manière contrôlée autour d'un point localisé à l'intérieur du doigt (b) (d'après [DH05]). . . . .	32
1.20	Dispositif de localisation du contact sur un Phantom <sup>®</sup> (d'après [PCKN05]). . . . .	33
1.21	Détail de l'interface haptique de stimulation du bout du doigt et le dispositif expérimental où le retour d'effort est superposé avec le retour tactile (d'après [SFSB07]). . . . .	33
1.22	Interface tactile reproduisant la souplesse (d'après [FO01]). . . . .	34
1.23	(a) Schéma de principe du dispositif, (b) dispositif expérimental (d'après [YYYH07]). . . . .	35
1.24	(a) Le système haptique. (b) Dispositif pneumatique faisant varier l'aire de contact et (c) sa vue schématique (d'après [SSTB07]). . . . .	35
1.25	(a) Le schéma du 1er dispositif et sa réalisation, (b) Le schéma du dispositif d'immersion et sa réalisation [BSSR02]). . . . .	36
1.26	Technologie électromagnétique : (a) Un module de l'afficheur tactile de Shinohara. Le picot est actionné par des petits moteurs pas à pas (diamètre de 4.2 mm). Le mouvement de translation est assuré par un guidage par vis [SSM98], (b) Dispositif en sandwich. L'afficheur est constitué d'une matrice de 6×6 picots espacés de 2 mm [WLH02], (c) Le FEELEX : dispositif avec une résolution spatiale de 8 mm. Le mouvement de translation est assuré par un système bielle-manivelle [IYNK01]. . . . .	38
1.27	Alliages à mémoire de forme : (a) Un module de l'actionneur de Taylor [TMC97], (b1)(b2) Structure du dispositif et photo du dispositif de Velázquez [VPW06]. . . . .	38
1.28	Technologie pneumatique : (a) Stimulateur à microvalves [AYS98], (b) Buses à expulsion d'air déformant une matrice en silicone [MWF00]. . . . .	39



---

1.29	Technologie piézoélectrique : (a) Système combiné utilisant un empilement de cristaux piézoélectriques [FDZ <sup>+</sup> 04] (b) Transducteur à ultrasons [IS06]. . . . .	39
1.30	L'Optacon [httb]. . . . .	40
1.31	(a1) (a2) Afficheur tactile piézoélectrique à large bande passante (20-400 Hz) [SCSB01], (b) le VITAL du CEA-List [BKHSJ05], (c) Schéma général de la matrice 4×4 avec des actionneurs magnétostatiques [TDT <sup>+</sup> 06]. . . . .	41
1.32	(a) Stimulateur tactile constitué de 88 éléments piézoélectriques alignés [DPV87], (b) Dispositif "Slip Aesthesis" [THC05]. . . . .	42
1.33	(a) Dispositif d'étirement de la peau dans la direction latérale [TMM02], (b) Afficheur de forces de cisaillement [DFZ <sup>+</sup> 05]. . . . .	43
1.34	(a) Stimulation latérale de la peau avec impédance mécanique contrôlable [WHS04], (b) Design modulaire du STRESS, la surface active est d'environ 1 cm <sup>2</sup> [WH06]. . . . .	43
1.35	(a1) Dispositif tactile pour de petits écrans sensitifs [PM03], (a2) Téléphone tactile [KBL06], (b) Actionneur pour écrans plats sensitifs [Imm]. . . . .	45
1.36	(a) Poutre excitée par 2 transducteurs de Langevin [WF95], (b) Plaque fuselée excitée par des pots vibrants magnétiques [NMYT98]. . . . .	46
1.37	(a) Schéma de principe et (b) réalisation du dispositif tactile à onde de Rayleigh [TFK <sup>+</sup> 06]. . . . .	47
1.38	(a) Principe de la stimulation tactile. La stimulation fonctionne uniquement lorsque le doigt bouge. (b)Le dispositif électrostatique avec son curseur. [YNYH06]. . . . .	47
2.1	Dépendance de la sensation tactile en fonction de l'amplitude de vibration et de la rugosité de la surface [WF95]. . . . .	53
2.2	Mouvement dirigé du bout du doigt de l'utilisateur au regard de la sensation obtenue. . . . .	55
2.3	Résultat de l'analyse modale effectuée sous ANSYS : à 41 kHz le disque à un mode 4 radial. A droite : la réalisation du dispositif de caractérisation. . . . .	56
2.4	(a) Résultats d'ensemble et (b) sur un rayon des mesures effectuées au vibromètre LASER sous 20 V. . . . .	57
2.5	Profil d'ondulation et de rugosité (état de surface) de la surface texturée. . . . .	57
2.6	(a) Impression à l'encre des empreintes digitales. 1) Compression normale de la pulpe, 2)compression tangentielle [Mar06a]. (b) Agrandissement du revêtement rainuré. . . . .	58
2.7	Hypothèses initiales sur la déformation, l'intensité et la fréquence des vibrations ainsi que sur les forces de cisaillement pour deux orientations relatives doigt-texture perçue. . . . .	59

2.8	(a) Transducteur de Langevin sur lequel est collé un disque en aluminium. Le disque est recouvert par une surface finement rainurée. (b) Posture du sujet pendant l'expérience. . . . .	61
2.9	Fréquence des réponses en fonction de l'amplitude de vibration du disque, dans le cas où les empreintes sont parallèles aux rainures d'empreintes. . . . .	65
2.10	Fréquence des réponses en fonction de l'amplitude de vibration du disque, dans le cas où les empreintes sont orthogonales aux rainures d'empreintes. . . . .	65
2.11	Intensité moyenne de la rugosité perçue en fonction de l'amplitude de vibration du disque. . . . .	66
2.12	(a) Moteur piézoélectrique complet ouvert. (b) La surface d'exploration est constituée de la partie supérieure du stator. . . . .	69
2.13	a) Principe de modulation de l'effet de lubrification, b) sa représentation par GIC. . . . .	70
2.14	GIC du stator du Shinsei USR60 dans le cas d'une onde stationnaire unique. . . . .	71
2.15	GIC de la structure de contrôle. . . . .	72
2.16	(a) Le dispositif test. (b) Les échantillons utilisés pour l'expérience de reconnaissance de la période spatiale. . . . .	73
3.1	Schéma mécanique équivalent. . . . .	80
3.2	Schéma simplifié des empreintes digitales (plaque vibrante non représentée). . . . .	80
3.3	Déformation en cisaillement d'une crête épidermique. . . . .	82
3.4	Evolution du coefficient de frottement variable $\mu(t)$ en fonction du temps pour une amplitude d'onde $w > W_0$ et pour une fréquence $f > f_c$ . . . . .	83
3.5	Graphique amplitude-fréquence délimitant les zones d'obtention de la lubrification active et de l'effet obtenu par Watanabe [WF95]. . . . .	85
3.6	Schéma représentatif de 2 surfaces en contact soumises à des vibrations rapides. . . . .	86
3.7	La variation sinusoïdale de l'épaisseur du film, $h(t)$ , entraîne une variation non-harmonique de la pression (d'après [Wie00]). . . . .	87
3.8	Approximation du profil du bout du doigt lorsque les empreintes digitales sont prises en compte. . . . .	88
3.9	"Squeeze number" en fonction de la fréquence de vibration de la plaque pour $h_r = 1.6\mu\text{m}$ et $h_{vib} = 3\mu\text{m}$ . . . . .	92
3.10	Épaisseur du film à un instant donné et profil spatial de la pression moyenne temporelle sous le doigt ( $h_r = 1.6\mu\text{m}$ , $h_{vib} = 3\mu\text{m}$ ) . . . . .	94
3.11	Le coefficient de frottement relatif en fonction de l'amplitude de vibration pour $F_f = 0.5\text{ N}$ , pour les quatre valeurs de $h_r$ (Tab. 3.2) et pour $f = 40\text{ kHz}$ . . . . .	95

---

3.12	Une section d'une longueur égale à une demi longueur d'onde du monomorphe est modélisée comme une poutre simplement supportée. . . . .	99
3.13	Poutre d'une demi longueur d'onde qui se fléchit lorsque les céramiques piézoélectriques se contractent. . . . .	100
3.14	Déflexion dynamique en fonction de la demi longueur d'onde ( $\lambda/2$ ) pour un ratio des épaisseurs $\beta = 2$ et pour une amplitude de tension d'alimentation de 15 V. . . . .	108
3.15	Fréquence de résonance en fonction de la demi-longueur d'onde. . . . .	108
3.16	Analyse modale sur une demi-longueur d'onde de 16 mm et de largeur $b$ . Les bords latéraux de la poutre sont simplement supportés. . . . .	109
3.17	Fréquence de résonance en fonction de la demi-longueur d'onde : comparaison entre l'étude analytique et l'étude numérique. . . . .	111
3.18	Modèle éléments finis du monomorphe. . . . .	111
3.19	Résultat de l'analyse modale : déformée du mode $(x; y)=(8;0)$ à la fréquence de résonance $f=35.6$ kHz (ANSYS software®) . . . . .	112
3.20	Résultats de l'analyse harmonique : déplacement vertical d'un point de la surface situé sur un ventre de l'onde (ANSYS software®). . . . .	113
3.21	Vue de dessus et de dessous du dispositif. . . . .	114
3.22	Mesures effectuées au vibromètre Laser du mode de flexion $(x; y)=(8; 0)$ . . . . .	115
3.23	Dispositif expérimental d'évaluation. . . . .	116
3.24	Intensité moyenne du caractère glissant estimée en fonction de l'amplitude de vibration de la plaque. . . . .	117
4.1	Les 7 objets de références utilisées dans l'article de Makino et les résultats de l'expérience pour trois types de stimuli (d'après [MS05]). . . . .	122
4.2	(a) Vue de côté du dispositif vibrotactile, (b) Vue de dessus du stimulateur tactile (d'après [KKSK06]). . . . .	123
4.3	(a) Lames du STReSS vues de dessus et le motif Brailles simulé, (b) résultats de l'identification d'une liste de lettres sans signification en fonction du taux de texture superposé (d'après [LPH07]).	123
4.4	(a) Les huit directions étalon (flèches oranges) et (b) un exemple de directions de comparaison (flèches grises). (c) Seuils de discrimination de la direction représentés pour les huit directions étalon (d'après [DFZ <sup>+</sup> 05]). . . . .	124

4.5	(a) Les deux textures réelles en acier inoxydable à comparer, (b) Le dispositif à retour de force à 3 ddl utilisé pour simuler les textures (d'après [TAT <sup>+</sup> 06]). . . . .	125
4.6	Schéma du dispositif utilisé pour présenter les surfaces aux sujets. A et C sont les échantillons standard et B est l'échantillon de comparaison. Le grossissement au dessus montre le profil de la texture rainurée (d'après [MGDS84]). . . . .	128
4.7	Exemples de stimuli. Les plaques mesurent 10 cm×3 cm×1.4 cm. . . . .	130
4.8	Résultats de l'expérience de Nefs et al. (d'après [NKK01]). . . . .	130
4.9	Matériel utilisé pour l'expérience : l'ordinateur portable gère l'expérience, il est en interaction avec l'utilisateur, la plaque tactile et son capteur de position puis l'ordinateur qui commande la plaque. . . . .	132
4.10	Exemples de textures virtuelles simulées sur la plaque tactile. Ici les zones en bleu sont celles qui ont le plus grand coefficient de frottement. En (a) on observe une période spatiale plus grande qu'en (b). . . . .	133
4.11	Interface du test : sur cet exemple, la période spatiale associée au rectangle n°1 est simulée sur la plaque, ce qui se traduit par une coloration bleue du rectangle correspondant. La consigne demandée aux sujets est : "Indiquez l'échantillon de plus grande période spatiale en tapant 1 ou 2".	134
4.12	Mise en place expérimentale. a) Posture du sujet portant un casque. b) Position du doigt sur la plaque tactile. . . . .	134
4.13	Description d'une session. . . . .	135
4.14	Représentation des rapports de Weber pour la discrimination de la période spatiale pour chaque participant. Les résultats moyens sur tous les participants sont aussi représentés. . . . .	137
4.15	Temps moyen d'exploration sur l'ensemble des sujets. Les barres d'erreurs représentent 95% de l'intervalle de confiance. . . . .	138
A.1	Coefficient de frottement relatif en fonction de l'amplitude de vibration pour $F_f = 0.5$ N et pour $h_r = 0.2 \mu\text{m}$ et $h_r = 0.6 \mu\text{m}$ . . . . .	153
C.1	Dessin de définition de la plaque. . . . .	157
C.2	Schéma d'ensemble du monomorphe. . . . .	158
C.3	Première solution. . . . .	159
C.4	Deuxième solution. . . . .	159

---

D.1	Présentation graphique des résultats de discrimination. L'erreur constante n'est pas montrée car elle est pratiquement nulle dans cet exemple. . . . .	163
-----	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----



# Liste des tableaux

1.1	Résumé des propriétés des mécanorécepteurs cutanés. . . . .	9
1.2	Statistiques descriptives de la cinématique du toucher latéral (d'après [Mar06a]). . . . .	16
2.1	Résumé des propriétés et des effets du dispositif de Watanabe et al. . . . .	53
2.2	Valeurs des paramètres géométriques. . . . .	58
2.3	Amplitude de vibration du disque mesurée au vibromètre LASER. . . . .	62
2.4	Résultats de l'expérience préliminaire . . . . .	64
2.5	Résultats d'évaluation : pourcentage des réponses. . . . .	74
3.1	Paramètres de l'étude. . . . .	84
3.2	Liste des paramètres . . . . .	93
3.3	Paramètres du dimensionnement . . . . .	106
3.4	Résultats de l'analyse modale sur les différentes longueurs d'onde. . . . .	110
3.5	Statistiques descriptives du caractère glissant perçu. . . . .	116
4.1	Résultats de l'étude des seuils différentiels. . . . .	137
A.1	Paramètres du moteur piézoélectrique . . . . .	151





# Introduction

Ce travail effectué au sein du L2EP (Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance de Lille) s'inscrit dans le cadre du projet Alcove (agir et collaborer sur des objets virtuels complexes) de l'INRIA. Il est également partie intégrante du projet STIMTAC (Stimulateur Tactiles) supporté par l'IRCICA<sup>1</sup>. Son objectif est le développement d'un nouveau périphérique tactile pour des applications en réalité virtuelle. Plus précisément, sa finalité est de proposer un périphérique intégrable dans un environnement de travail qui pourrait augmenter notre immersion dans un environnement virtuel en stimulant la pulpe du doigt.

Nous utilisons aujourd'hui principalement les retours d'information visuel et auditif lorsque nous travaillons dans un environnement virtuel (EV). Et si la représentation visuelle des objets sur un écran d'ordinateur nous est devenue familière avec les images de synthèse, leur représentation physique permettant de solliciter le sens du toucher (problème de l'haptique) n'en est qu'à ses débuts. Cependant, grâce à des technologies issues de la simulation et de la téléopération, il est aujourd'hui possible d'entrer en contact physique avec des objets du monde virtuel n'existant que dans la mémoire des ordinateurs [VSP<sup>+</sup>03].

Néanmoins, la réalisation d'interactions haptiques révèle encore certaines difficultés. En particulier, il reste à résoudre des problèmes ambitieux concernant la conception des actionneurs qui constituent les interfaces, le calcul en temps réel ou la modélisation des interactions... De plus, nous connaissons assez mal le toucher comparativement aux sens de la vue et de l'ouïe. On peut alors se demander s'il est vraiment nécessaire de rajouter le sens du toucher dans les Interfaces Hommes Machines (IHM) puisque au demeurant, le retour visuel est bien suffisant pour travailler sur notre ordinateur personnel.

Cette remarque alimente l'hypothèse selon laquelle les informations visuelles primeraient sur

---

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

les informations haptiques. La vision joue un rôle cognitif si dominant que celui, plus discret, du toucher est souvent sous-estimé. Des études ont toutefois montré le rôle fondamental de cette modalité sensorielle dans le développement des compétences telle l'habileté par exemple, au cours des cycles de la vie [HSG00]. Et comme l'explique Robles-De-La-Torre, être privé du sens du toucher, a des conséquences catastrophiques sur la dextérité, la marche et bien d'autres facultés chez l'individu [RDLT06]. De plus, on ne peut compenser une telle incapacité sensorielle en ayant recours à d'autres sens.

Qu'en est-il en EV ? Lorsque nous utilisons des périphériques, nous disposons de toutes les informations touchant notre corps, cependant nous devons à la fois contrôler notre corps et imaginer comment notre action changera l'EV au travers de notre interface. Donc, les périphériques qui ne procurent pas d'informations haptiques significatives sur l'état de l'EV, privent les utilisateurs d'informations décisives pour apprendre et accomplir un grand nombre de tâches avec précision et rapidité. Ainsi, pour interagir avec les environnements virtuels, le toucher a et aura une dimension de plus en plus importante en proportion de la complexité de la tâche ou des objets à manipuler. De plus, dans les environnements virtuels collaboratifs, il pourrait également, comme dans le cas réel, renforcer les expériences partagées entre les hommes.

La conception de dispositifs haptiques à retour de force consitue encore un thème de recherche, bien qu'un certain nombre de solutions soient actuellement proposées dans le commerce. La technologie dédiée au retour d'effort est ainsi arrivée à un stade de relative "maturité", car la performance des matériels et des logiciels développés a atteint un niveau compatible avec les exigences (notamment "temps réel") des applications industrielles. Le retour d'effort est par exemple utilisé pour des applications telles que le prototypage virtuel. Cette technique consiste à utiliser des maquettes numériques interactives avec retour de force pour tester le montage et le démontage de pièces aéronautiques ou automobiles. Ainsi, il est possible de faire les mêmes tests que dans la réalité mais dans des délais beaucoup plus courts et à un coût fortement réduit [Wan02] [dSZ99].

Malgré tout, la pénétration de cette technologie chez les industriels et dans le marché du grand public tarde à venir, à de rares exceptions près (retour vibro-tactile dans les jeux vidéos). Cette situation est certainement due à un déficit double dans la conception des interfaces haptiques en termes d'ergonomie des périphériques et de "réalisme perceptif " des sensations simulées. Certes, les interfaces à retour d'effort améliorent les performances motrices ; mais le manque d'information cutanée, transmise à la peau et plus précisément à la pulpe des doigts, dégrade

---

le réalisme des objets virtuels en interaction. En effet, l'ajout du retour cutané via un afficheur tactile provoquerait d'abord l'impression d'intervenir à l'intérieur des mondes virtuels, avec un minimum d'abstraction, plutôt que de diriger ce qui s'y produit de l'extérieur. Des applications plus spécifiques pourraient également être traitées telles que le DAO de textures destinées à un environnement industriel (mobilier, intérieur de voiture...), la simulation de tissus textiles avec une perspective ouverte sur le monde de la vente par correspondance ; la reproduction de tissus vivants constitue également un challenge important pour le monde médical. Sans oublier évidemment l'aspect compensation sensorielle, en particulier visuelle, que peut apporter la stimulation tactile dans la reconnaissance des objets d'un EV. Donc, pour que les environnements synthétiques générés par la machine se comportent de manière tangible, il est indispensable de concevoir des afficheurs tactiles pour procurer à l'utilisateur immersion et performance.

Au large champ d'applications ouverts par la stimulation tactile, répond actuellement un nombre important de recherches, qui technologiquement, s'orientent différemment. L'objectif de notre premier chapitre est donc d'analyser ces différentes directions, en regard des sensations qu'elles peuvent procurer, et compte tenu des connaissances dont nous disposons sur le toucher de texture. Ainsi, nous commençons par rappeler les caractéristiques physiologiques, cognitives, ergonomiques et biomécaniques liées au toucher, avant de proposer une classification des techniques de reconstitution tactile connues à ce jour. Cette classification a été effectuée selon le critère du mode d'interaction procuré par les dispositifs, fonction des différentes échelles du toucher.

Dans le second chapitre, nous proposons deux expériences sensorielles, destinées à mettre en évidence l'effet de vibration haute fréquence sur la perception tactile que l'on peut avoir d'une texture. La première expérience met en lumière la privation sensorielle, plus précisément l'atténuation de la sensation de rugosité, générée par les vibrations sur une surface texturée. La variation du coefficient de frottement est alors introduite.

La seconde expérience exploite cette notion et propose une modulation de l'amplitude vibratoire, en fonction de la position du doigt, pour la simulation de surfaces texturées programmables.

Les évaluations psychophysiques entreprises à la fin du chapitre deux montrent clairement l'intérêt d'exploiter ce phénomène vibratoire pour la "création" de textures. Le troisième chapitre vise donc à reproduire cet effet, en respectant les contraintes ergonomiques du toucher actif.

Cependant, avant de passer à la phase de conception du dispositif tactile, une analyse du phénomène d'interaction est proposée. Deux interprétations sont envisagées pour expliquer la

variation du frottement par vibrations : le phénomène de "lubrification active" d'une part, l'effet "squeeze film" d'autre part. Ne pouvant réellement conclure sur l'existence du premier, nous nous sommes orientés vers le second pour interpréter les phénomènes constatés au second chapitre. Dès lors, nous avons été en mesure de dimensionner un nouveau dispositif tactile, constitué d'une plaque en Cuivre Béryllium sous laquelle est collée une matrice de céramiques piézo-électriques.

Le quatrième et dernier chapitre a pour objectif l'évaluation sensorielle du dispositif créé. En particulier, une expérience visant à déterminer les seuils différentiels ("Just Noticeable Difference", JND) des périodes spatiales simulées est effectuée de manière à tester les performances de ce dispositif pour la reproduction de textures fines. Les résultats sont comparés à ceux obtenus sur des textures réelles. Leurs proximités nous engagent à conclure sur l'efficacité du dispositif proposé à reproduire des textures fines.

# Chapitre 1

## Contexte des dispositifs haptiques d'interaction

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1.2</b>	<b>Les propriétés du toucher</b>	<b>7</b>
1.2.1	Physiologie Sensorielle : Somesthésie	7
1.2.2	Comportement doigt/surface	12
1.2.3	La psychophysique de la rugosité	20
1.2.4	Comment obtenir des illusions tactiles?	25
<b>1.3</b>	<b>Des stimulateurs tactiles adaptés à la physique du toucher</b>	<b>29</b>
1.3.1	Simulation de la forme	30
1.3.2	Simulation de la souplesse/mollesse	34
1.3.3	Simulation de textures	36
<b>1.4</b>	<b>Conclusion du chapitre</b>	<b>47</b>

---

### 1.1 Introduction

Pour connaître et comprendre son environnement, l'Homme dispose en principe de ses 5 sens qui captent les informations issues du monde extérieur selon différents canaux : chimiques pour l'odorat et le goût, optique pour la vue, acoustique pour l'ouïe et mécanique pour le toucher. Le toucher fournit donc des informations par contact de la peau avec la surface des corps solides et

accessoirement par exposition aux fluides comme l'eau ou l'air. Par exemple, nous ressentons la forme et la texture des objets grâce à des déformations petites ou grandes de la pulpe du doigt, mais aussi grâce à des vibrations localisées ou distribuées à la surface de la peau. Toutes ces interactions stimulent des mécano-récepteurs spécifiques de l'épiderme qui codent l'information tactile avant de la transmettre au cerveau par impulsions neuronales.

Le toucher a un fonctionnement bien particulier. D'abord, il ne permet une exploration de l'environnement que successive, et non simultanée comme pour la vision : pour explorer un objet, on procède pas à pas, par petites surfaces élémentaires. Ensuite, le mouvement produit pour explorer la surface d'un objet modifie lui-même la sensation perçue : dans le toucher, perception et action sont donc mêlées l'une à l'autre (bidirectionnalité). Enfin, la peau est l'organe le plus important du corps humain, au moins par son étendue, et aussi parce que le réseau nerveux de l'épiderme y est très dense. C'est donc un secteur d'échange particulier d'informations avec notre environnement, contribuant à contrôler notre corps, à percevoir notre environnement.

Ces remarques montrent combien le toucher est un sens dont le fonctionnement - de la stimulation à la perception - est complexe. Si les sens de la vue et de l'ouïe sont relativement bien compris, l'analyse du toucher reste encore incomplète. Dans notre démarche de conception d'un stimulateur tactile, nous devons chercher à mieux le comprendre pour mieux pouvoir le simuler. C'est pourquoi, une partie de ce premier chapitre traite des recherches concernant les propriétés de la peau, de ses caractéristiques biomécaniques, perceptuelles et cognitives.

Le stimulateur à concevoir est une interface dite à "retour haptique", c'est-à-dire qu'elle permet d'interagir physiquement avec un des objets d'un monde virtuel. Les interfaces à retour haptique restituent les sensations dues aux forces de contact, à la dureté ou au poids, ainsi que les sensations cutanées qui sont elles liées à la perception d'un état de surface ou du glissement. On définit le système kinesthésique comme le système qui fait intervenir les muscles, les tendons et les articulations des doigts et le système cutané comme l'ensemble des afférents nerveux reliés aux mécanorécepteurs de la peau. [LTSC02] montre que les systèmes cutanés et kinesthésiques n'ont pas la même influence suivant la tâche accomplie, ce qui est illustré par la Fig. 1.1. Or, puisque les dispositifs haptiques sont dédiés à un tâche particulière, ils utilisent des technologies appropriées au système, kinesthésique ou cutané, privilégié pour cette tâche. Après nous être intéressés aux propriétés du toucher, la deuxième partie de ce chapitre présentera donc un état de l'art des dispositifs tactiles, classés selon la tâche qu'ils permettent d'accomplir et détaille la réponse technologique mise en oeuvre.

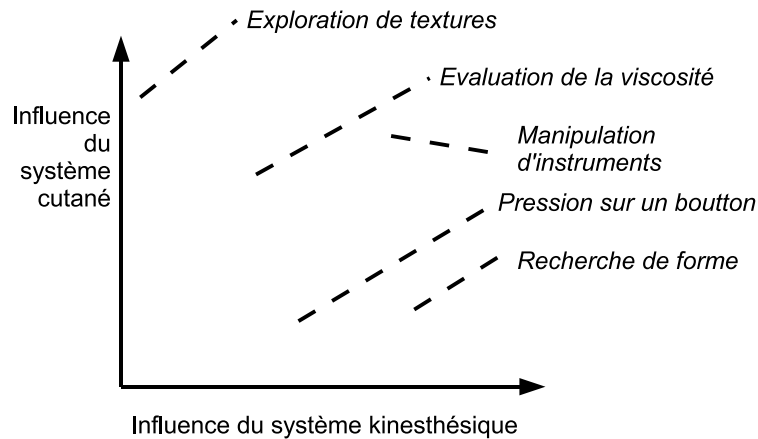


FIG. 1.1 – Influences du système kinesthésique et cutané (adapté d'après [LTSC02]).

## 1.2 Les propriétés du toucher

### 1.2.1 Physiologie Sensorielle : Somesthésie

Le système somesthésique ou système sensoriel somatique, du grec "sôma", corps et "aïsthêsis", sensibilité, regroupe les mécanismes nerveux chargés de recueillir les sensations somatiques (les sensations du corps). C'est le sens qui nous renseigne :

- sur l'état de notre corps,
- sur notre environnement par l'intermédiaire de notre corps.

La somesthésie fait partie intégrante des différentes modalités sensorielles de perception au même titre que l'audition, la vision, la gustation, l'olfaction.

Afin de pouvoir stimuler la pulpe du doigt de façon efficace, il est indispensable de savoir quelles sont les mécanismes qui nous permettent de détecter des variations physico-chimiques du milieu extérieur et du milieu environnant. Ainsi, dans cette partie, nous allons répondre aux questions suivantes :

- Quelle population neurologique est-elle responsable de telle ou telle sensation ?
- Comment l'information est-elle codée ?

#### a. La somesthésie : sensibilités tactile, kinesthésique, thermique et douloureuse

Le toucher fournit des informations qui nous permettent d'identifier des objets, de percevoir une texture, de détecter des propriétés mécaniques, ou de ressentir du plaisir ou de la douleur. Ainsi le toucher implique deux principales modalités somesthésiques : les sensibilités tactile et

kinesthésique. Ces deux systèmes influent de manière plus ou moins prononcée dans la médiation du ressenti haptique en fonction de la nature de la tâche effectuée. La sensibilité tactile, aussi appelée sensibilité cutanée, intervient lors de situations d'identification ou de discrimination (la taille et la forme des objets) et pour évaluer des phénomènes à petite échelle (la texture des objets, leur mouvement au contact de la peau). La sensibilité kinesthésique ou proprioception est une sensibilité profonde et se rapporte à un ressenti de phénomène physique atteignant l'intérieur du corps. Elle intervient lors des tâches de manipulation et de communication, pour percevoir la position et les mouvements des membres et du corps. Il faut ajouter à ces deux sensibilités principales la nociception pour la perception de la douleur et la thermoception pour la perception de la température. Ces deux modalités doivent être traitées séparément à cause de la haute sélectivité des neurones [Gre04] (bande passante plus sélective) bien qu'il y ait des interactions possibles avec les autres sous-systèmes de la somesthésie.

Le codage de ces informations somesthésiques s'effectue grâce à une population de récepteurs sensoriels périphériques qui peuvent être classés selon le type de stimulus. On distinguera donc les mécanorécepteurs qui enregistrent toute déformation mécanique (vibration, étirement, pression), situés par exemple dans la peau, dans les muscles, les thermorécepteurs qui permettent de ressentir la température ainsi que les nocicepteurs pour la douleur.

## b. La sensibilité tactile

**Les mécanorécepteurs cutanés :** Ce sont des récepteurs qui informent le système nerveux central sur les sensations de toucher, de vibration et de tension cutanée : ils sont sensibles aux déformations mécaniques de la peau induite par le contact des objets. Ils sont à l'origine de la sensibilité tactile discriminative et permettent l'exploration et l'analyse du milieu extérieur. Ils présentent une sensibilité élevée. Il en existe 4 types principaux, deux dans l'épiderme et deux dans le derme et l'hypoderme (Fig.1.2). Une description complète de ces mécanorécepteurs n'est pas abordée ici, cependant il est important de comprendre leurs réponses spécifiques à différents types de stimuli pour construire un dispositif tactile le plus approprié possible. On s'appuiera donc sur les résultats des travaux de Johnson et al. [JH92] [Joh01], mais aussi sur les travaux de l'équipe de Johansson [JV83] [VJ84] qui constituent des références sur le sujet.

Chaque type de récepteur présente des caractéristiques fonctionnelles différentes c'est-à-dire que chaque type transmet des informations différentes sur les objets. Les deux premiers types de récepteurs (Corpuscules de Meissner et Disques de Merkel) permettent de reconnaître 2 stimu-



lations différentes et rapprochées, et de les distinguer l'une de l'autre. Ils permettent également de détecter avec finesse la texture des objets. Les deux autres types (Corpuscules de Pacini et Corpuscules de Ruffini) permettent de sentir de façon globale le contact avec un objet et de détecter son déplacement sur de grandes régions de la peau.

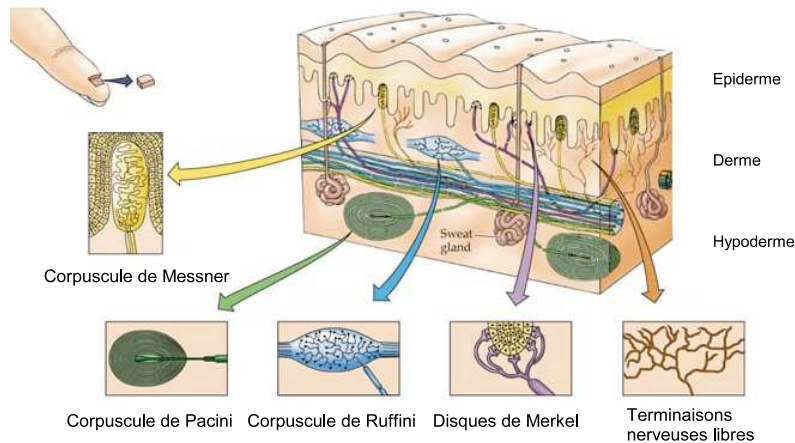


FIG. 1.2 – Les mécanorécepteurs cutanés [htta].

Mécano-récepteur	Adaptation	Type de réponse	Champs récepteurs	Principales fonctions
Corpuscules de Meissner	Rapide RA I	transitoire	petite taille de quelques millimètres, bien délimité	Réponse à des dépressions minimales de la peau, des mouvements légers de surface des vibrations lentes
Corpuscules de Pacini	Rapide RA II	transitoire	larges, de limites floues pouvant couvrir un doigt entier voire la moitié de la paume de la main	Discrimination de stimuli mobiles, des vibrations rapides 10- 15% des récepteurs cutanés de la main
Disques de Merkel	Lente SA I	statique	petite taille de quelques millimètres, bien délimité	Discrimination statique de formes, de bords et des textures.
Corpuscules de Ruffini	Lente SA II	statique	larges, de limites floues pouvant couvrir un doigt entier	Sensibles aux étirements persistants que produisent les mouvements des doigts et des membres

TAB. 1.1 – Résumé des propriétés des mécanorécepteurs cutanés.

Les 4 types de récepteurs cutanés encodent différents aspects de la déformation des tissus (un résumé des propriétés des mécanorécepteurs est proposé dans le tableau 1.1). Ils peuvent être classés selon 2 caractéristiques : leurs propriétés dynamiques en sortie de l'unité tactile, c'est-à-

dire leur temps d'adaptation nécessaire pour recevoir une autre information ("Rapidly Adapting" [RA] et "Slowly Adapting" [SA]), et la taille de leur champ récepteur (de type I pour des champs récepteurs de petite taille aux limites bien définies et de type II pour des champs récepteurs de grande dimension aux frontières mal localisées). Il est aussi possible de classer les mécanorécepteurs suivant le type de stimulus auquel ils répondent le mieux. Il est généralement accepté que :

- les SA I (disques de Merkel) répondent plus particulièrement aux indentations normales de la peau,
- les SA II (corpuscules de Ruffini) réagissent mieux aux étirements latéraux,
- les RA I (corpuscules de Meissner) sont plus sensibles aux vibrations à basse fréquence (5-50 Hz),
- les RA II (corpuscules de Pacini) répondent mieux aux vibrations à haute fréquence (50-1000 Hz).

**Acuité spatiale aux stimuli tactiles :** La sensibilité tactile augmente avec la densité des fibres nerveuses qui innervent une surface de peau donnée. Par exemple, la face et les extrémités (doigts : 2500 récepteurs/cm<sup>2</sup> en moyenne) sont très richement innervées. Cette disparité dans la densité de récepteurs en fonction des régions cutanées entraîne de grandes différences pour les seuils de discrimination spatiale, ou acuité spatiale, en fonction des territoires étudiés. Ainsi, l'acuité spatiale, quantifiée grâce à la limite de distinction entre deux pointes, est très variable en fonction de la localisation du stimulus (Fig. 1.3) : les seuils les plus bas sont situés à l'extrémité de la langue et au bout des doigts (1-3 mm) [BJ94] [SC86] ; le dos est la région où la discrimination spatiale est la plus élevée (50-100 mm).

Plus particulièrement sur le bout du doigt, il a été montré, en statique, qu'on ne peut pas distinguer des rainures si leur période spatiale reste inférieure à 1 mm [PJ81]. Dans le cas dynamique, c'est-à-dire s'il y a mouvement de la peau, Philips et Johnson [PJ81] concluent sur une largeur de rainure de 0.2 mm. Une étude de Loomis sur l'hyperacuité spatiale a permis de montrer en outre que la localisation d'un point (diamètre de 0.7 mm et hauteur de 1.3 mm) dans une tâche d'effleurement peut être déterminée avec une précision spatiale de 170  $\mu m$  [Loo79].

**Aspects temporels de la sensation :** On notera d'autre part que l'efficacité d'une stimulation sensorielle dépend de son intensité et de sa durée. Le seuil intensif de perception d'un

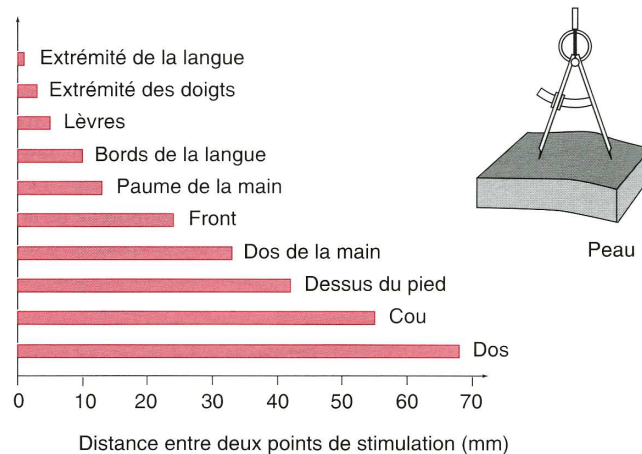


FIG. 1.3 – Seuil de discrimination spatiale. La longueur de la barre indique, pour chaque région du corps, la plus petite distance entre deux stimulus simultanés pour qu’il soient détectés comme séparés (adapté d’après [RO01]).

stimulus est d’autant plus bas que la durée de la stimulation est longue. Mais l’intensité sensorielle du stimulus est perçue de façon subjective : la perception s’atténue avec le temps.

D’autre part, il existe un intervalle de temps minimum entre deux stimulations pour qu’elles soient ressenties distinctement par un sujet : c’est l’acuité temporelle. Ainsi, deux stimuli localisés au même point du bout du doigt doivent être espacés dans le temps de 5.5 ms pour être perçus comme deux excitations distinctes. Deux stimuli localisés à deux points différents du bout du doigt doivent être espacés dans le temps de 20 ms pour percevoir l’ordre d’excitation [Con01].

**Sensibilité aux vibrations continues :** Les connaissances de la sensibilité cutanée fréquentielle dérivent d’un certain nombre d’approches. L’approche la plus directe est une étude du seuil de détection humain. Cette méthode consiste à mesurer la sensibilité absolue aux vibrations en fonction de la fréquence temporelle. Le seuil de détection humain obtenu pour la détection des vibrations d’un simple indenteur est une fonction en ” U ” de la fréquence (Fig.1.4) : Il est d’environ 28 dB pour un signal crête à crête d’amplitude  $1\mu\text{m}$  de 0.4 à 3 Hz, puis il décroît de -5 dB/octave entre 3 à 30 Hz puis de -12 dB/octave entre 30 et 250 Hz [BGVC88]. On remarquera que la sensibilité est maximale dans la région de 250 Hz (seuil 0.0001 mm). Ce travail a aussi permis d’établir que la perception des vibrations dépend aussi bien de la fréquence que de l’amplitude d’excitation. En particulier, dans les régions où le seuil de détection est très bas, une amplitude plus basse est requise.

Une deuxième source de connaissance provient d'études neurophysiologiques sur les différentes catégories de mécanorécepteurs de l'humain et du singe. Le travail de Freeman et Johnson [FJ82a] [FJ82b] nous apprend que les fibres SA ont une fréquence centrée autour de 20 Hz, que les fibres RA ont une fréquence centrée autour de 40 Hz. De plus, d'autres résultats [MH69] ont indiqué que les corpuscules de Pacini ont une fréquence centrée autour de 250 Hz. Ainsi, les changements de pente obtenus dans l'étude psychophysique sont assez cohérents avec les réponses neurophysiologiques.

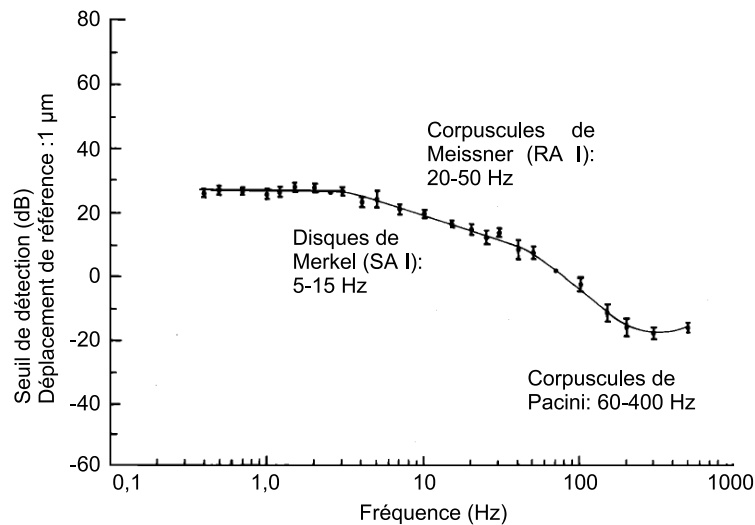


FIG. 1.4 – Seuil de détection psychophysique de la fréquence sur une gamme de 0.4 à 500 Hz relativement à l'amplitude du stimulus (adapté d'après [BGVC88]).

### 1.2.2 Comportement doigt/surface

Nous avons présenté dans la partie précédente les investigations qui ont été menées sur les mécanismes neurophysiologiques pour des tâches de détection ou de discrimination. Mais s'il est vrai que la réponse des récepteurs influe sur la perception des stimuli, il est aussi important de considérer la façon même dont ce stimulus est créé et comment il parvient à ces mécanorécepteurs.

Dans une première partie nous regarderons donc comment se traduit, d'un point de vue subjectif, l'information émanant d'un stimulus sur le comportement des individus lorsqu'ils touchent une surface. La psychologie cognitive dans le domaine de la perception cutanée nous renseignera d'abord sur la façon dont la gestuelle influe sur la sensation tactile, puisque le geste influence de manière significative les capacités perceptives chez l'adulte et l'enfant [HSG00]. Ensuite, connaissant la gestuelle associée à l'exploration de textures fines, nous présenterons les résultats

ergonomiques liés à ce type de tâches. Cette première partie fera par conséquent référence à des expériences psychophysiques dont le but est de déterminer les relations quantitatives qui existent entre un stimulus physique et la perception que nous en avons (Fig. 1.5).

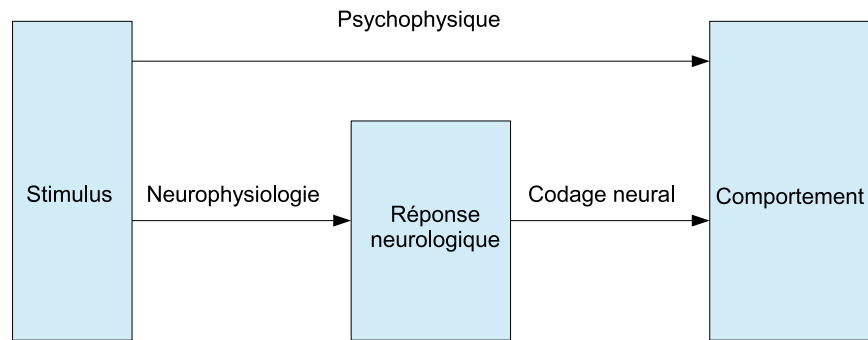


FIG. 1.5 – Relations entre la psychophysique et la neurophysiologie.

Dans une deuxième partie, on s'attachera à décrire le comportement entre le doigt et la surface explorée d'un point de vue mécanique.

#### a. Psychologie cognitive et ergonomie

**Les procédures exploratoires :** Partant de l'hypothèse qu'un mouvement exploratoire est dédié à la recherche d'informations haptiques privilégiées, Lederman et Klatzky ont montré qu'il existe des invariants en fonction de la propriété physique explorée [LK87]. Quatre procédures d'exploration ont été relevées dans le cadre du toucher surfacique :

1. le frottement latéral pour la texture,
2. le contact normal pour la dureté,
3. le contact statique pour la température,
4. le suivi des contours pour la forme globale et la forme exacte.

Certaines procédures sont particulièrement spécialisées comme le frottement latéral et le contact normal puisqu'elles ne captent qu'une seule propriété. Le contact statique est optimal pour la température et, dans une moindre mesure, il donne des informations sur la forme, la taille, la texture et la dureté. Le suivi des contours est pertinent pour le codage de la forme mais il permet aussi de prélever des données relatives à la texture et à la dureté. Ces procédures se déploient en deux temps [LK93]. D'abord s'expriment des procédures non spécialisées qui impliquent l'ensemble de la main et apparaissent ensuite les procédures spécialisées (le frottement latéral, le contact normal).

**Le toucher actif et le toucher passif :** Deux types de perception sont distingués. La perception passive résulte de la stimulation d'une partie de la peau alors que le segment corporel qui la porte est totalement immobile. Dans ce cas, comme seule la couche superficielle de la peau est soumise à des déformations mécaniques, le traitement perceptif ne concerne que les informations cutanées liées au stimulus appliqué sur le doigt. Le toucher passif réfère donc à la sensibilité cutanée induite par la pression, la température ou la douleur quand les objets arrivent en contact direct avec la peau.

La perception active (tactilo-kinesthésique) résulte de la stimulation de la peau qui fait suite à des mouvements actifs d'exploration de la main entrant en contact avec des objets. C'est ce qui se produit quand, par exemple, la main et les doigts suivent le contour d'un objet pour en apprécier la forme. Dans ce cas, il s'ajoute à la déformation mécanique de la peau celle des muscles, des articulations et des tendons qui sont la conséquence des mouvements d'exploration. Le toucher actif implique alors des processus beaucoup plus complexes. Il dénote un contrôle personnel du lieu et de l'endroit où l'on atteint et reçoit l'information haptique [SRWV05]. C'est donc une exploration totalement libre et régulée par le système cognitif. On comprend mieux ici comment action et perception peuvent être liées ; d'ailleurs, la littérature amène raisonnablement à faire l'hypothèse de meilleures performances en conditions actives, pour la reconnaissance de textures fines [RDLT02] [EG01] et rigides [SL95].

**Apport de la motricité pour l'exploration de textures :** Selon [Led83], le mouvement aurait plutôt une fonction de navigation, un contrôle précis de la force ou de la vitesse d'exploration n'étant pas déterminant dans les mécanismes perceptifs. Hypothèse confirmée par une étude plus récente de Lederman, Howe, Klatzky et Hamilton [LHKH04] qui met en lumière l'absence totale de contrôle de la force lors de l'exploration d'une surface à vitesse gardée constante.

A l'inverse, dans un contexte de localisation de cible tactile, les travaux de Smith, Gosselin et Houde [SGH02] révèlent 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.

**Ergonomie et toucher :** Si les procédures exploratoires décrites par [LK87] permettent la classification du geste du toucher, elles sont insuffisantes à la définition d'un espace de travail

ergonomique de stimulateur tactile. Elles devront donc être complétées par une étude psychophysique permettant une caractérisation cinématique dans le cas du toucher latéral, puisque c'est la procédure optimale pour la discrimination de textures.

Constatant lui aussi les contradictions énoncées dans l'apport de la motricité pour l'exploration de textures, Martinot a recherché dans sa thèse le rôle du mouvement pour la discrimination de texture dans le cadre d'un modèle d'interaction bureautique [Mar06a]. Les expériences qu'il a menées montrent d'une part la variabilité des paramètres force et vitesse en fonction des sujets et d'autre part la faible amplitude des mouvements. Ceci l'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 (par exemple le phénomène de stick-slip). De plus, l'aspect chaotique des trajectoires exploratoires du doigt ne permet pas de conclure sur une orientation privilégiée résultant de facteurs d'anisotropie d'origine biomécanique, neurophysiologique ou encore cognitive.

Plus précisément, Martinot a enregistré dans sa thèse les mouvements et les forces du doigt en utilisant un dispositif à 3 degrés de liberté à jauges de contraintes [Mar06a]. En situation d'interaction, dispositif de mesure caché et dans le cas de textures fines, la forme, l'amplitude des déplacements, la force moyenne, ainsi que la vitesse moyenne ont été examinées. Les statistiques ont été effectuées sur 5 variables : l'amplitude du mouvement de gauche à droite (Amplitude X), l'amplitude du mouvement de haut en bas (Amplitude Y), la force normale moyenne, la force maximale ainsi que la vitesse moyenne.

Il constate alors qu'aucune direction de mouvement n'est privilégiée (Tab. 1.2). L'amplitude mesurée suivant X et suivant Y ne permet pas de conclure sur une direction d'exploration favorite moyenne dans le plan tangentiel. De plus, les sujets travaillent sur des "surfaces intérieures" (moyenne égale à 26,18 cm<sup>2</sup> et au 95ème centile<sup>2</sup> égale à 76.17 cm<sup>2</sup>) comparativement à l'aire totale mise à leur disposition (412,90 cm<sup>2</sup>).

Bien qu'une force maximale 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 constamment à évaluer l'élasticité de la surface explorée, ce qu'ils feraient par un appui normal important.

Ainsi, les valeurs moyennes de cette étude sont tout à fait comparables aux valeurs moyennes rapportées dans [SGH02], comprises entre 0.49 N et 0.64 N.

En ce qui concerne les vitesses d'exploration, une vitesse moyenne de 8.72 cm.s<sup>-1</sup> a été mesurée.

---

<sup>2</sup>Le Xème centile sépare les X% inférieurs des données.

Cependant, l'examen des profils de distribution en vitesse suggère des valeurs instantanées plus importantes comprises entre 10 et 20  $\text{cm.s}^{-1}$ .

	<b>Amplitude X(mm)</b>	<b>Amplitude Y(mm)</b>	<b>Force Moy.(N)</b>	<b>Force Max.(N)</b>	<b>Vitesse Moy.(cm/s)</b>
Moyenne	57.79	45.31	0.63	1.21	8.72
Minimum	7.74	11.68	0.18	0.31	0.31
Maximum	137.0	93.68	2.06	5.48	18.04
5 <sup>eme</sup> centile	22.86	18.26	0.19	0.37	4.05
95 <sup>eme</sup> centile	97.27	84.38	1.62	2.97	14.48
Écart type	23.67	19.60	0.43	0.93	3.38

TAB. 1.2 – Statistiques descriptives de la cinématique du toucher latéral (d'après [Mar06a]).

Ces travaux nous permettent donc de connaître les données nécessaires pour définir un espace de travail adapté aux conditions de toucher latéral ainsi que la résistance des capteurs/actionneurs à sélectionner pour ces interfaces tactiles.

Dans cette première partie, nous avons décrit les procédures exploratoires dédiées à la recherche d'informations haptiques. Dans le cas du toucher de textures fines, le frottement latéral du doigt est privilégié et nous amène à travailler de préférence en conditions de toucher actif. Ceci étant dit, nous nous sommes attardés sur la caractérisation du toucher latéral dans le but de déduire un espace de travail ergonomique pour la stimulation tactile en condition de toucher actif. Ainsi, le comportement du doigt sur la surface, du point de vue de la psychologie cognitive et de l'étude ergonomique, apporte quelques éléments au cahier des charges en nous renseignant sur les dimensions, la résistance ou le taux de rafraîchissement à préférer pour notre stimulateur tactile.

D'autre part, concevoir un stimulateur tactile nécessite une connaissance de phénomènes mécaniques qui interviennent lors de l'interaction entre le doigt et la surface. En effet, connaître les mécanismes qui permettent de procurer des sensations tactiles s'avère une étape indispensable pour stimuler à notre tour, mais avec un dispositif tactile, le doigt d'un utilisateur.

## b. Biomécanique du toucher

La pulpe du bout du doigt est au premier plan pour le ressenti tactile puisqu'elle est mécaniquement liée à notre environnement physique. A l'intérieur de la pulpe du doigt se trouvent



les mécano-récepteurs du système nerveux sensoriel que nous avons décrit précédemment. Ces derniers fournissent des informations tactiles cruciales sur les objets en contact avec notre doigt pour pouvoir les manipuler avec adresse.

La pulpe du doigt peut aussi jouer un rôle mécanique, par exemple, celui d'atténuateur en diminuant les forces maximales rencontrées lors de l'activité dynamique du doigt, comme le font les talons des chaussures de sport pendant la course à pied [HH97]. Ainsi, nous exposerons d'une part quelques propriétés mécaniques du bout du doigt. D'autre part, nous présenterons les mécanismes d'interaction doigt/surface induits par le mouvement du doigt, puisque le toucher actif est recommandé pour l'exploration de textures fines.

**Propriétés mécaniques du bout du doigt :** Comprendre les caractéristiques contrainte - déplacement de la pulpe du doigt est une étape nécessaire pour cerner les déterminants de l'interaction tribologique, et ainsi relier ces grandeurs aux perceptions.

Les études biomécaniques apportent principalement des modélisations statiques et dynamiques des déformées de la pulpe du doigt consécutives à des indentations normales. L'examen de la

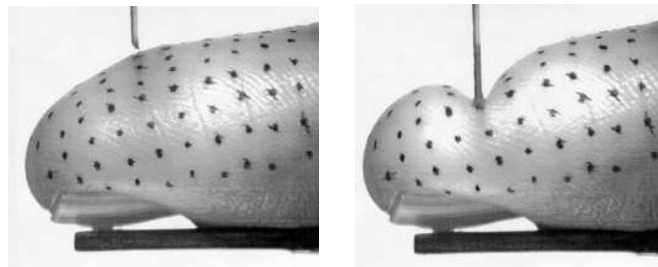


FIG. 1.6 – Déformation de la surface de la pulpe du doigt suite à une indentation normale (d'après [MTL]).

réponse dynamique de la pulpe du doigt soumise à des indenteurs de toute forme et de toute taille (Fig. 1.6) [GS95] [SMR97] [PH99] a montré que la pulpe du doigt est caractérisée par une raideur non linéaire et une relaxation importante au court du temps. La peau se comporte donc localement comme un corps viscoélastique. 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]. Elle est composée de deux parties : (1) d'une fonction qui est la réponse instantanée en force à un échelon de position et (2) d'une fonction de relaxation traduisant le comportement visco-élastique à un changement infinitésimal de position dans le temps. L'avantage d'une telle formulation est qu'elle nécessite peu de paramètres caractéristiques bien que le bout du doigt ait une structure complexe. Par ailleurs, ce modèle, testé dans des

conditions de forces d'impact (chocs), a aussi fait ses preuves [JZBD03].

Ces résultats testés expérimentalement pourraient être éventuellement une piste pour prédire la stimulation des mécanorécepteurs situés à l'intérieur de la pulpe du doigt en réponse à une stimulation tactile, pour par exemple ouvrir le champ à de nouvelles stimulations.

**Le mouvement doigt/surface - Mécanismes d'interactions multiples :** Les représentations du glissement lors de l'établissement du contact normal ou de l'établissement du frottement en toucher latéral sont généralement macroscopiques. Ces modèles traduisent la transition de la phase d'adhérence à la phase de glissement avec frottement de Coulomb dans l'établissement du contact normal [BFSB04] et dans l'amorce du geste de toucher latéral [NTM<sup>+</sup>01][TMK06]. Les hypothèses considérées sont globales, puisque Tada et al. supposent une distribution gaussienne des pressions à l'interface de contact, négligeant ainsi la géométrie de l'empreinte digitale [TMK06], ou que Nara et al. calculent la "fréquence" de stick-slip (voir Fig.1.7) en l'appliquant à l'ensemble de la pulpe [NTM<sup>+</sup>01]. On le voit bien, la spécificité de la peau (aspects micro-mécaniques) n'est pas encore intégrée aux modèles de frottement et glissement entre un doigt et une surface. On se fiera donc d'avantage aux mesures expérimentales qu'aux prédictions des modèles.

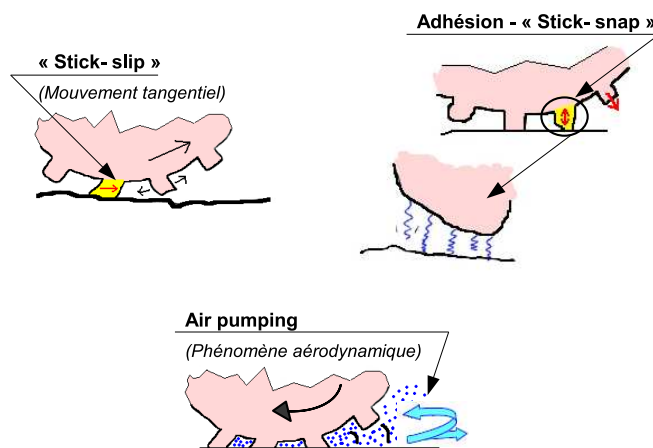


FIG. 1.7 – Schématisation de la coupe transverse de la pulpe du doigt et des empreintes digitales soumises aux différents phénomènes de contact dynamique.

L'une des manières de mesurer les phénomènes d'interaction, sans perturber le geste de l'utilisateur ni la sensation perçue, est de relever le bruit produit lors du toucher latéral (mesure non invasive). En effet, si nous considérons le système (pulpe du doigt - texture) comme deux structures déformables, il résulte que l'apport d'énergie fourni par les excitateurs se dissipe sous

forme d'un rayonnement acoustique et de chaleur. Ainsi, dans sa thèse, Martinot a étudié les variations temporelles des pressions dans l'air, images des contraintes mécaniques sur la pulpe lors du frottement de différentes textures. Il identifie ensuite les différents phénomènes de l'interaction en s'inspirant de la littérature sur l'analyse du bruit de pneumatiques en roulement [MPC05], puisque, malgré les différences d'échelles, ces deux mécanismes d'interactions sont très proches. On distinguera donc des mécanismes vibratoires continus (excitation harmonique de la bande de roulement par la texture), des mécanismes transitoires (chocs, adhérence-glissement ou "stick-slip", adhérence-décollement ou "stick-snap") et des mécanismes aérodynamiques dépendant de la vitesse et de la porosité des textures (air pumping) [Kui01](Fig. 1.8). Les mécanismes

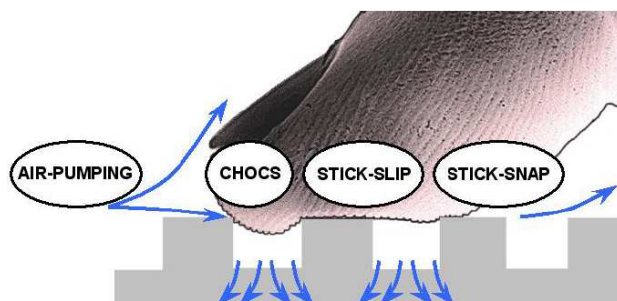


FIG. 1.8 – Mécanismes potentiellement impliqués dans l'émergence de sources de bruit au contact (d'après [MABC06]).

vibratoires continus sont en relation directe avec la périodicité de la texture, et la forme des réponses fait apparaître des résonances à une ou plusieurs harmoniques de l'excitation. Quant aux forces impulsionnelles, elles dissipent de l'énergie de manière transitoire en résonnant avec un maximum d'amplitude. D'autres phénomènes transitoires peuvent intervenir comme le stick-slip de l'empreinte digitale (mouvements saccadés avec une succession de blocage de la peau et de glissements) ou le stick-snap qui est dû aux forces d'adhérence et aux oscillations de décollement (Fig. 1.7). À ceci s'ajoute les effets aérodynamiques liés à une aspiration d'air, une compression dans la zone de contact et à une expiration (Fig. 1.7).

Ainsi, nous avons vu que le doigt se comporte comme un corps viscoélastique et qu'il peut être modélisé avec une formulation quasi-linéaire. De plus, lorsque le doigt se déplace sur une surface, il subit des mécanismes d'interaction multiples tels que des chocs, de l'air pumping, le stick-slip ou le stick-snap.

### 1.2.3 La psychophysique de la rugosité

#### a. Texture et rugosité

Avant de parler de rugosité, il est important de distinguer conceptuellement et technologiquement la texture perçue des propriétés physiques qui ont engendré ces sensations. La texture évoque les propriétés physiques des objets. Les propriétés haptiques accessibles sur les surfaces texturées se déclinent en grandeurs tribologiques (rugosité) et géométriques (forme, courbure,...) selon l'échelle à laquelle s'effectue l'exploration du relief, en grandeurs rhéologiques (élasticité, dureté, relaxation,...) et aussi en grandeurs thermiques. Malheureusement, il n'y a pas encore de définition pour distinguer clairement les textures physiques de la texture perçue et les termes "rugueux" ou "dur" sont par exemple autant utilisés pour décrire une sensation qu'une propriété physique. La texture perçue est un concept multidimensionnel qui inclut la rugosité parmi beaucoup d'autres perceptions relatives à la distribution des éléments sur une surface. 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".

#### b. Rugosité et échelle spatiale

On le sait bien, la vue est souvent suffisante pour imaginer la sensation provoquée par des reliefs grossiers, alors que le toucher ne devient essentiel que lorsque la pulpe du doigt est frottée contre une texture pour en apprécier et en exploiter les particularités spatiales non visibles. Pour la perception des textures fines, les mécanismes intervenant lors de ce type de contact dynamique et leurs contributions au jugement de rugosité restent pour le moins assez flous :

D'une part, il existe des arguments forts qui tendent à défendre l'hypothèse d'un codage uniquement spatial : il a été démontré que ni les changements de vitesse du mouvement dirigé en toucher actif [MBC00], ni une préadaptation à des stimuli vibrotactiles [LLW82] n'apportent une perception différente de la rugosité. Ce qui impliquerait qu'il n'y ait pas de codage vibratoire tant en fréquence qu'en amplitude.

D'autre part, malgré ces arguments assez forts, nous avons précédemment vu que le toucher latéral est la procédure optimale de jugement de la rugosité impliquant un mouvement relatif entre la peau et la surface [LK87]. Pour cette raison, on peut alors penser que le mouvement

relatif apporte tout de même une dimension temporelle au code de la rugosité.

Qu'en est-il alors ? Des études plus récentes nous orientent vers un modèle à 3 niveaux de codage qui serait fonction de l'échelle spatiale de la texture.

Pour des textures assez grossières (espacement supérieur à 2 ou 3 mm), il est en général admis que la rugosité est perçue grâce à un code spatial déterministe. En effet, en utilisant des surfaces sur lesquelles étaient inscrits des petits points dont l'espacement variait de 1.5 à 4 mm, Connor et Johnson [CJ92] ont montré que la rugosité perçue est corrélée positivement avec l'augmentation de distance entre motifs (hypothèse spatiale dans l'expérience psychophysique). D'autre part, ces auteurs ont invalidé l'hypothèse temporelle pour les textures dont les éléments sont espacés de plus de 1 mm.

D'autres études suggèrent que l'information vibratoire est utilisée pour la perception de textures très fines dont l'inter espacement entre motifs ou rainures est inférieur à  $200\ \mu\text{m}$  (limite de distinction selon Philips et Johnson) : en utilisant un transducteur à effet Hall fixé sur l'arrière de la pulpe du doigt, Bensmaïa et Hollins ont mis en évidence la présence de vibrations sur la peau en relation avec la période spatiale de la texture [BH03]. Il a donc été fourni des arguments sur la nécessité du mouvement dans les mécanismes perceptifs de la rugosité de texture très fine. Ainsi, l'existence de corrélations plus ou moins directes a été montrée entre des estimations de la rugosité et des grandeurs physiques liées à des paramètres fréquentiels [CS01] [BH03].

Pour l'échelle de texture intermédiaire (comprise entre 1 mm et  $200\ \mu\text{m}$ ), le code de rugosité reposerait sur des formes stochastiques (aléatoire mais corrélée au relief de texture) du code spatial [YGD<sup>+</sup>01].

### **c. Influence de l'angle d'incidence du doigt sur la perception de la rugosité**

Si nous frottons notre doigt contre une texture en maîtrisant la force appliquée et la vitesse, mais en changeant l'angle entre le doigt et la surface, nous pouvons nous attendre à des variations de l'aire de contact et de l'impédance mécanique du bout du doigt.

Partant de cette constatation, Martinot et al. [Mar06b] ont utilisé un vibromètre laser ainsi qu'un accéléromètre pour analyser le mouvement de la pulpe du doigt et de la phalange distale quand la peau est compressée contre une roue crantée en rotation. Ils constatent que plus l'angle d'incidence augmente, plus les vibrations sur l'ongle sont présentes. Ils remarquent en particulier une augmentation très significative de l'intensité vibratoire pour des angles d'incidences compris entre 45 et 60 degrés. En accord avec les résultats de Chia-Yu et Manny [CYM05], cette expé-

rience a permis de montrer que les tissus de la pulpe du doigt sont capables d'amortir les ondes mécaniques pour de petits angles et qu'un moment plus important imposé sur l'articulation induirait la propagation d'ondes mécaniques dans la chaîne osseuse. On préconisera alors, pour une exploration optimale de la texture, de déplacer son doigt avec un angle compris entre  $30^\circ$  et  $45^\circ$ . L'angle d'incidence du bout du doigt est donc un paramètre déterminant de l'interaction tribologique dans le cadre du toucher latéral et par conséquent de sa perception associée : la rugosité.

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

Durant cette expérience, on a bien sûr de fortes augmentations de pression qui se produisent à une cadence temporelle en relation avec la période des dents de la roue crantée. Mais plus encore, on observe un autre phénomène cyclique "bruité" qui se produit selon une deuxième cadence temporelle, plus rapide, en relation avec la période spatiale des rainures d'empreinte (Fig. 1.9).

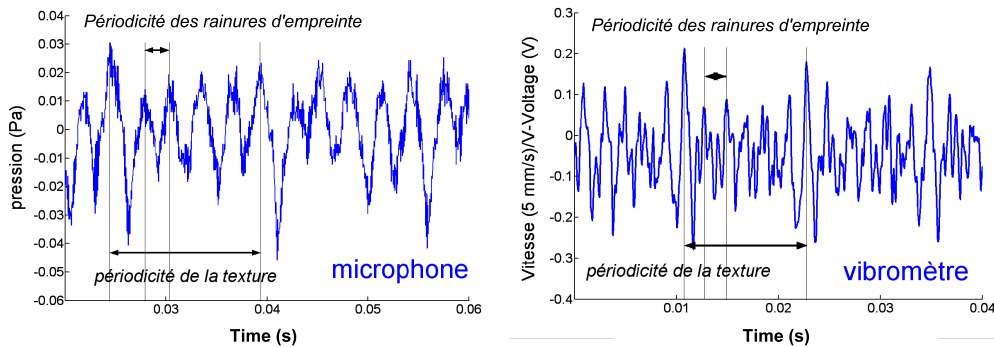


FIG. 1.9 – Mesures acoustiques et vibrométriques supportant l'hypothèse d'un rôle frictionnel des rainures d'empreinte (d'après [Mar06b]).

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. Cependant, l'utilisation d'une texture grossière telle que la roue crantée n'a pas permis de proposer des explications sur le rôle du mouvement dirigé pour les textures plus fines.

#### e. Amélioration de la rugosité perçue - Commensurabilité

Nous avons donné une description des mécanismes de codage de la rugosité en fonction de l'échelle spatiale de la texture. Cette description ne considérait cependant pas vraiment les mé-

canismes de frictions à l'échelle de l'empreinte digitale discutés dans le paragraphe précédent. Les empreintes digitales ont une fonction double : elles aident à la fois à éviter et à percevoir le glissement. Les premiers à avoir considéré leurs contributions pour la perception tactile sont Srinivasan, LaMotte et Whitehouse [LW86] [SWL90]. Ils observent que le frottement tangentiel d'un petit point contre une crête épidermique (ligne de l'empreinte digitale) déclenche une réponse immédiate des fibres RA, validant ainsi l'importance du relief de la crête de l'empreinte pour la perception de la texture fine. Plus tard, Maeno et son équipe [MKY98] ont construit un modèle élément fini du doigt en incorporant les empreintes digitales. Ils montrent que les crêtes d'empreinte permettent d'amplifier les sensations tactiles de la saisie et du glissement en concentrant les contraintes autour 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 disques de Merkel lorsqu'un cran exerce une contrainte statique sur la peau parallèlement aux crêtes épidermiques plutôt que perpendiculairement [GT05]. Les empreintes auraient donc un rôle d'amplificateur directionnel des champs de contraintes pour les textures fines.

Récemment, Martinot [Mar06a] suggéra que la perception de la rugosité en l'absence d'important relief reposerait principalement sur la relation géométrique entre les crêtes épidermiques et le relief de la surface explorée : il montre en particulier, dans des conditions d'emboîtement entre la surface texturée et les crêtes épidermiques (commensurabilité), que la rugosité perçue ne devrait ni dépendre de paramètres spatiaux stochastiques ou déterministes, ni dépendre de paramètres vibratoires, mais d'un facteur d'interaction qui caractérise les forces de cisaillement. L'une des expériences qui a permis d'arriver à cette conclusion consiste à examiner les différences de rugosité en fonction de l'orientation de textures rugueuses périodiques. Les textures sont des plaques gravées avec des motifs crantés. La hauteur des crans est égale à  $70 \mu\text{m}$ . Les largeurs des espacements entre les rainures (GW) 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 (RW), 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 ( $0.10 \text{ mm} < \text{GW} < 0.30 \text{ mm}$  et  $0.20 \text{ mm} < \text{RW} < 0.30 \text{ mm}$ ).

Les résultats (Fig. 1.10) montrent qu'il n'y a aucune différence entre les orientations  $-45^\circ$  et  $45^\circ$  et ceci pour toutes les textures, qu'il y a très peu de contraste entre les intensités perçues quand les crêtes des textures sont perpendiculaires à celles de l'empreinte, et que plus la texture est fine, plus elle est estimée rugueuse.

Ce qu'il faut retenir de ce travail, c'est l'importance de l'emboîtement spatial entre la surface explorée et les empreintes digitales (surfaces commensurables) dans le processus de friction. Ainsi, l'interaction entre les aspérités commensurables avec le relief de l'empreinte digitale maximise un gradient spatial des forces de cisaillement qui permet de percevoir intensément la microtexture lors du mouvement. Ce résultat montre que le mouvement latéral de badigeonnage, utilisé lors de l'exploration de textures fines, s'explique par la recherche d'emboîtement de la texture dans la peau. Le toucher latéral n'est donc pas seulement motivé par le bénéfice d'un élargissement spatial du champs récepteur mais permet aussi une meilleure sensibilité somesthésique. En outre, ces résultats ne donnent pas d'arguments supplémentaires en faveur d'un codage temporel de la rugosité.

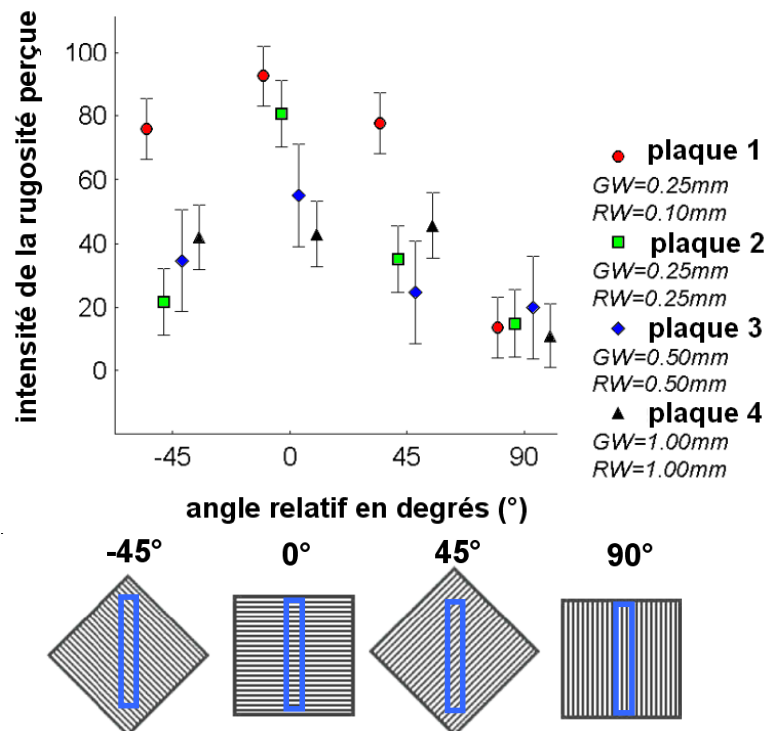


FIG. 1.10 – Intensité de la rugosité perçue en fonction de l'angle relatif en degrés et des stimuli présentés.(d'après [Mar06a]).

En résumé, nous concluons sur le fait que pour simuler une texture rugueuse, il faudra premièrement prendre en compte des phénomènes multiéchelles intervenant dans la perception de la rugosité, puisque la définition de l'échelle spatiale de la texture que nous souhaitons simuler influencera le choix de la technique d'actionnement. D'autre part, il ne faudra pas oublier l'importance de la posture (orientation du doigt) ainsi que de l'orientation du mouvement du doigt



sur la texture.

#### 1.2.4 Comment obtenir des illusions tactiles ?

Nous connaissons tous quelques illusions optiques, plus rarement des illusions tactiles. La raison n'est pas l'absence d'illusions tactiles, mais leur mise en oeuvre, qui nécessite souvent d'avantage de matériels qu'un crayon et un papier.

On peut définir l'illusion comme une perception qui se manifeste à partir d'un stimulus spécifique délivré sous certaines conditions. L'illusion procurera une expérience consciente distincte lorsque les conditions seront changées.

Dans cette partie, on décrira quelques illusions tactiles ainsi que les moyens utilisés pour reproduire ces effets.

##### a. Simuler une forme à partir d'un champ de force

Robles-De-La-Torre et Hayward montrent que nous pouvons obtenir l'illusion de bosses sur un plan par ajout de forces de propulsion/réaction [RDLTH01]. Ils décrivent une expérience ingénieuse qui permet de comparer la perception de bosses réelles et la distribution de forces de propulsion/réaction en utilisant un dispositif robotique (Fig. 1.11). Ainsi pour créer l'impression d'une bosse on appliquera une pression croissante, inverse au mouvement de l'utilisateur, lors de la montée, puis une force dans la direction du mouvement lors de la descente. Les objets virtuels sont représentés indépendamment de la géométrie de l'objet réel par l'intermédiaire d'un poussoir produisant des forces de résistance programmables. Dans l'expérience, le sujet explore



FIG. 1.11 – Dispositif permettant de créer l'illusion de trous et de bosses (d'après [GRDLT]).

une surface. Son doigt suit ainsi la géométrie réelle, ici un trou (en gris) à l'aide du poussoir,

mais ressent en même temps des forces de résistance "contradictoires" qui correspondent à une bosse virtuelle (en pointillés orange). Au final, il perçoit la bosse et non le trou. On peut donc conclure que dans la perception des formes par le toucher, les forces de résistance comptent donc plus que les mouvements des doigts.

### b. Simuler une forme par le glissement

Le glissement peut intervenir, par exemple, quand on explore un objet tout en gardant l'orientation du doigt constante. Pour un objet convexe, si nous considérons la vitesse locale d'une région de contact de la pulpe du doigt, on constate que cette vitesse diminue avec la courbure de l'objet exploré. Ainsi, pour un objet convexe, plus le rayon de courbure de l'objet à simuler est petit, plus la vitesse de contact entre l'objet et la surface diminue. Dans le cas des objets concaves la relation est inversée [Hay07]. Fort de ce constat, on peut donc simuler une concavité par un glissement.

Il est assez facile d'engendrer le glissement. En effet, la méthode traditionnelle consiste à commander la vitesse de rotation d'un objet cylindrique qui provoque le glissement sous la pulpe du doigt. Sur ce principe, on peut citer le dispositif d'étude de la perception du glissement de Salada et de ses collègues [SVCF04] qui est constitué d'un tambour tournant dont la vitesse de rotation est contrôlée (Fig. 1.12). L'utilisateur place sa main sur le sommet du dispositif et son index touche le tambour qui est utilisé pour simuler le contact avec une surface plane.

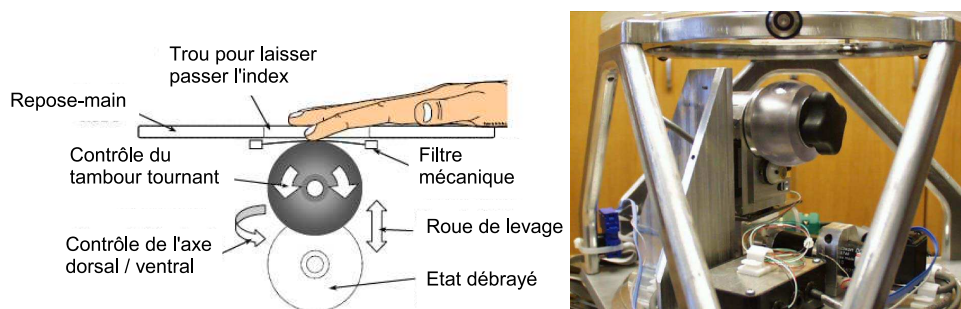


FIG. 1.12 – Schéma de principe et gros-plan du dispositif d'étude de la perception du glissement(d'après [SVCF04]).

### c. Illusions géométriques

Un autre exemple d'illusion haptique est celui de Gosline, Turgay et Brouwer qui proposent de réaliser une illusion de courbures [GTB02]. Ils suggèrent qu'une force de résistance qui augmente

et qui décroît brièvement peut être interprétée comme une région avec une grande courbure. En implémentant cette illusion haptique dans une interface, les tests sur les utilisateurs ont montré que cette méthode peut être effective pour masquer la géométrie de vrais objets en ayant l'impression de sentir une ellipse à la place d'un cercle ou une ligne courbe à la place d'une ligne droite (Fig. 1.13).

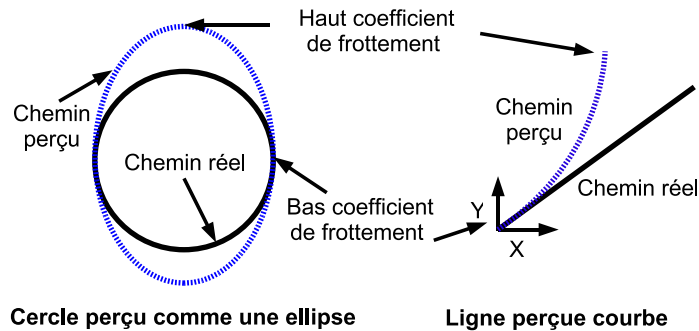


FIG. 1.13 – Illusion de courbure (d'après [GTB02]).

#### d. Obtenir une forme à partir d'une déformation cutanée distribuée

Sous cette appellation, nous recueillons des effets perceptuels qui apparaissent lorsque des motifs de déformation distribués sont créés sur la peau de manière ordonnée et contrôlée. Ces effets tendent à reproduire, sur certains points clés, ce qui se produit naturellement lors de la déformation de la peau.

Hayward et Cruz [HCH00] exposent une expérience qui permet de ressentir un point en relief qui se déplace le long du doigt. Avec un peigne ordinaire en plastique, où les dents sont suffisamment rapprochées pour donner l'impression d'un bord continu durant un contact statique, ils proposent de fléchir légèrement les dents du peigne à l'aide d'un bâton (Fig. 1.14). La sensation qui en résulte n'a rien de commun avec le stimulus, puisque celui-ci se résume à une vague de cisaillement tangentiel qui se propage le long du doigt, alors que ce que l'on perçoit est au contraire un objet mobile qui indente la peau.

Récemment, Nakatani et al. [NHT06] ont décrit un phénomène de la même famille qui est produit en frottant son doigt sur des surfaces divisées en bandes faites de différents matériaux et/ou textures. Le stimulus archétypal consiste en une barre centrale, de quelques millimètres de largeur, surélevée de 0.1 mm, avec des barres similaires projetées sur chaque côté (Fig. 1.15a). Si on déplace son doigt le long de la barre centrale et orthogonalement aux striations, on a l'illu-

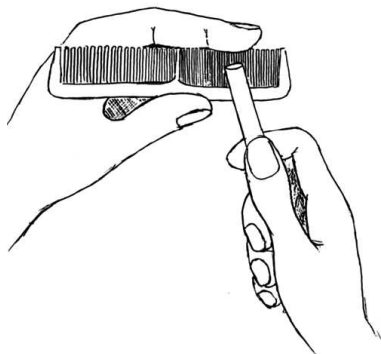


FIG. 1.14 – Démonstration manuelle de "l'illusion du peigne" (d'après [HCH00]). Pour réaliser l'expérience, il suffit d'un peigne et d'un bâton. En caressant doucement les dents avec un mouvement de va-et-vient, la peau est cisailée localement.

sion, sous certaines conditions, d'une bande centrale concave. Les auteurs précisent d'ailleurs que cette sensation est plus facilement perçue pour de petites bandes centrales et pour de faibles périodes spatiales entre les barres latérales. Cette illusion se produit pour une grande variété de

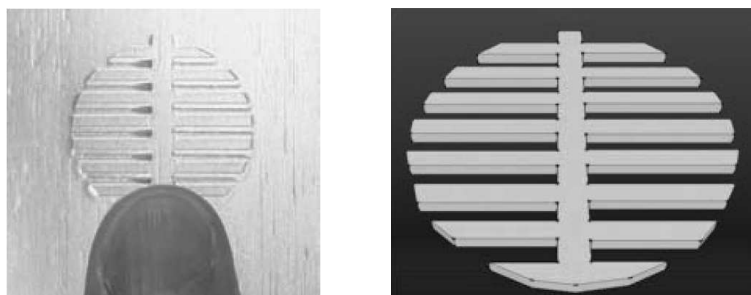


FIG. 1.15 – Un exemple de motif qui permet d'induire l'illusion d'une forme concave. Le motif dessiné en 3 dimensions à droite a été gravé sur une plaque d'aluminium [NHT06].

motifs où la bande centrale est entourée par différentes textures à la place des bandes latérales en relief de chaque côté, incluant des textures dont les éléments ont une taille bien inférieure au millimètre. Le mouvement du bout du doigt sur la bande centrale est obligatoire pour percevoir la sensation. Ces résultats suggèrent que la stimulation vibrotactile aux alentours de la surface de la bande lisse surélevée (c'est-à-dire sur les bords du doigt) est un facteur de création de l'illusion. C'est donc la différence de stimulation entre la zone centrale et les zones latérales qui crée la sensation d'indentation et non pas la différence de hauteur.

En détournant à leur avantage un autre type de déformation ordonnée de la peau, Dostmohamed et Hayward montrent que la courbure et l'information de forme pourrait être perçues, en absence

de signaux proprioceptifs dans la direction normale, par le déplacement de l'aire de contact sur la pulpe du doigt [DH05]. En effet, quand on explore un objet solide avec le bout du doigt, on définit généralement une surface de contact. Et lorsque la trajectoire de cette surface de contact est artificiellement contrôlée, de sorte à ressembler à la trajectoire qui est normalement définie pendant que l'objet réel est exploré, la sensation de forme est créée (Fig. 1.16). Les auteurs

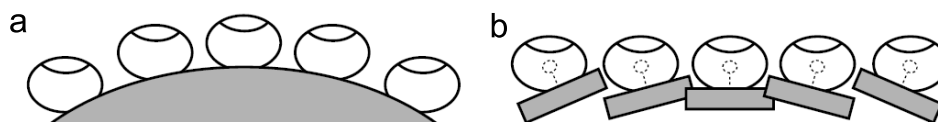


FIG. 1.16 – (a) Vue transversale des doigts sur un objet physique; (b) Déformation de la pulpe des doigts similaire à celle observée avec un objet réel. Pour cela, il suffit de faire tourner la plaque autour d'un point situé au sommet de l'os de la phalange distale (cercles en pointillés), et de garder la plaque tangente à la forme virtuelle au point de contact virtuel (d'après [DH05]).

établissent aussi que les sujets sont capables d'effectuer des discriminations de courbure à des niveaux comparables à ceux accomplis lorsqu'ils utilisent de vrais objets, et que le stimulus simplifié procuré par le dispositif est suffisant pour donner l'illusion de toucher une surface en 3 dimensions.

A la lumière de ces exemples, nous voyons bien qu'il n'est pas question que les dispositifs haptiques reproduisent la réalité dans ses moindres détails. Néanmoins, le but est d'obtenir la meilleure illusion pour leurrer l'utilisateur.

Ainsi, même si tous les mécanismes perceptifs qui produisent la sensation tactile ne sont pas parfaitement analysés, nous pouvons d'ores et déjà utiliser certaines des illusions haptiques connues pour envisager des applications.

### 1.3 Des stimulateurs tactiles adaptés à la physique du toucher

Nous avons vu que la physique du toucher faisait appel à des phénomènes multi échelles. Dès lors, il paraît essentiel de proposer des dispositifs tactiles adaptés à chaque échelle. Autrement dit, ces dispositifs devraient en quelque sorte être pensés comme les miroirs du système perceptuel. Dans cette partie, nous présenterons donc les derniers développements technologiques réalisés dans ce domaine suivant les propriétés haptiques recherchées par les concepteurs (forme,

souplesse, texture). Nous essaierons également de brosser ce que peut être leur devenir.

### 1.3.1 Simulation de la forme

Lorsque nous déplaçons notre doigt sur une surface pour percevoir des formes, on constate qu'il existe un certain nombre d'invariants. Par exemple, le déplacement de l'aire de contact sous notre doigt nous permet de détecter la concavité ou la convexité d'un objet réel (Fig. 1.16). On sait aussi, pour la perception de formes, que les forces de résistances comptent d'avantage que les mouvements du doigt (Fig. 1.11). Ainsi, les concepteurs d'interfaces haptiques cherchent donc à inventer des systèmes qui puissent reproduire ces invariants. Dans cette partie, nous nous attarderons sur quelques-uns de ces dispositifs et nous examinerons les sensations qu'ils peuvent potentiellement transmettre.

#### a. Exploitation du glissement

Le premier type d'interface haptique à retour de forme tentera de reproduire efficacement l'invariant cinématique.

Nous avons vu que le dispositif d'étude du glissement de Salada et al. [SVCF04] permet d'obtenir le glissement dans une direction. Mais, il est évident qu'il serait préférable de commander la perception de glissement dans toutes les directions pour de multiples applications dans les environnements mécaniques virtuels. A ce jour, pour réaliser cette exigence supplémentaire, on préfère en général la méthode qui consiste à utiliser une boule contrainte entre des roues de tractions motorisées (Fig. 1.17). Webster et al. ont mis à profit cette idée pour présenter l'information

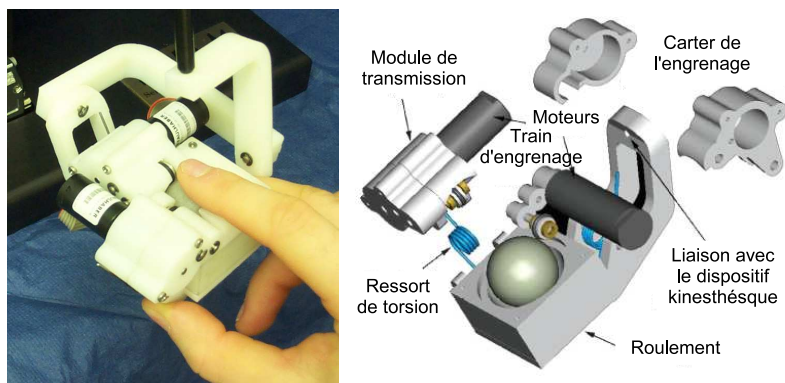


FIG. 1.17 – Le dispositif à 2 degrés de liberté de simulation du glissement et sa vue éclatée, monté sur un PHANToM (d'après [IMVO05]).

de glissement à l'homme dans un dispositif dédié à la téléopération [IMVO05]. Ce dispositif est

conçu de manière à être un accessoire modulable pour un grand nombre de dispositifs haptiques qui peuvent appliquer des forces sur la main (tels que le PHANToM)(Fig. 1.17). A l'aide de ces deux systèmes combinés, ils sont capables de simuler non seulement la forme de l'environnement virtuel, mais aussi la sensation du doigt qui se déplace en glissant au dessus de cette forme. Les résultats expérimentaux ont aussi démontré que les utilisateurs accomplissent la tâche de manipulation d'une feuille de papier virtuelle en appliquant moins de force sur l'interface en utilisant le retour de force combiné avec le retour tactile du glissement plutôt que le retour de force seul.

### **b. Simulation de la forme par orientation du bout du doigt**

On utilisera dans cette partie des invariants statiques et cinématiques pour simuler des formes.

Les invariants statiques sont ceux qui sont relatifs à la surface de contact entre le doigt et l'objet. Les deux premiers invariants statiques concernent la surface de contact, caractérisée par sa taille et sa forme à la fin de l'établissement du contact, tandis que le troisième invariant concerne la façon dont croît l'aire de contact du début à la fin de l'établissement du contact [Hay07].

L'invariant cinématique traduit le fait que le rayon relatif de courbure de la surface explorée influence la vitesse de déplacement de la pulpe du doigt [Hay07]. De ce fait, en exploitant ces invariants statiques et cinématiques, les concepteurs d'interfaces haptiques ont montré qu'on pouvait simuler une forme en orientant le bout du doigt. D'autre part, pour augmenter la réalité de l'interface, il faudra non seulement prendre en compte les invariants précités, mais aussi le nombre de degrés de liberté "actifs" pour simuler des formes complexes et variées.

La première réalisation pratique d'une interface à retour de forme respectant ces principes est probablement celle de Hirota et Hirose. Au lieu de simuler un objet virtuel en renvoyant une force sur le doigt de l'utilisateur, leur dispositif propose de simuler une surface de manière plus réaliste en renvoyant une information de position sur le doigt de l'utilisateur de sorte que ce soit l'utilisateur lui-même qui impose la force sur l'objet [HH93].

Plus récemment, des dispositifs plus élaborés ont été présentés. Le système qui propose le plus grand nombre de degrés de liberté (ddl), dénommé "encounter-type", en compte neuf [YMS<sup>+</sup>04], soit trois par doigt actionné (Fig. 1.18). Par un suivi de la trajectoire de la main, ce dispositif n'entre en contact avec les doigts de l'utilisateur qu'au moment où l'objet virtuel est saisi. Il est destiné à simuler des tâches telles que la saisie et le maintien d'un objet de n'importe quelle

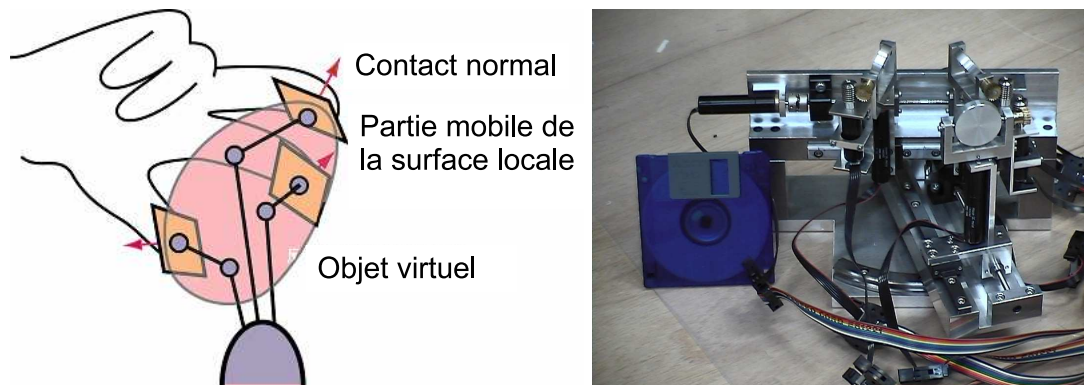


FIG. 1.18 – Concept du dispositif haptique "encounter-type" pour 3 doigts et le premier prototype (d'après [YMS<sup>+</sup>04]).

forme et de la taille d'une main. Sa conception a été menée en tenant compte de considérations anatomiques concernant la mobilité de la main humaine.

Afin de tester leurs hypothèses sur l'illusion haptique de courbure exposées dans le paragraphe précédent (Fig. 1.16), Dostmohamed et Hayward ont construit un dispositif à 2 ddl auto contrôlé, appelé le Morpheotron [DH05]. Le dispositif agit de façon à faire pivoter une plaque plane sous le bout du doigt pendant l'exploration de la surface virtuelle. Leurs expériences psychophysiques

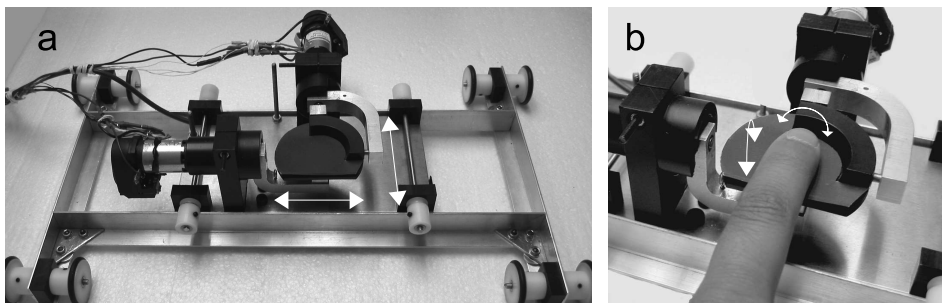


FIG. 1.19 – Le Morpheotron. Une plaque libre de bouger dans le plan horizontal (a) pivote de manière contrôlée autour d'un point localisé à l'intérieur du doigt (b) (d'après [DH05]).

ont montré que les sujets sont capables de discriminer la courbure de différentes formes simulées, de façon similaire à des objets réels.

Comme alternative aux autres dispositifs à retour de forme, Provancher et al. [PCKN05] ont exploré l'idée de reproduire virtuellement le déplacement du centre de contact d'un objet virtuel sur la pulpe du doigt. Pour cela, ils ont utilisé une bille guidée de manière contrôlée sur le bout du doigt. Cette bille est placée dans un dé sur lequel repose le doigt (Fig. 1.20). Les auteurs



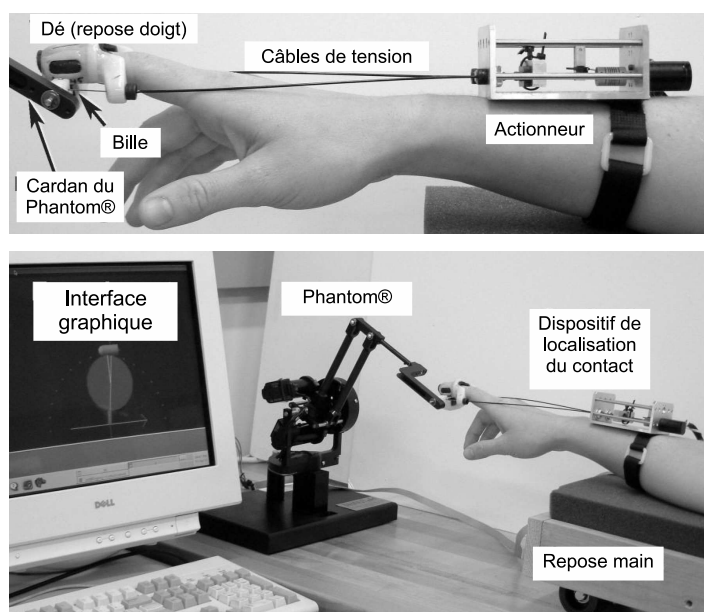


FIG. 1.20 – Dispositif de localisation du contact sur un Phantom® (d’après [PCKN05]).

montrent que cet élément supplémentaire combiné avec le retour de force permet d’obtenir des performances de suivi de contour comparables à celles qui sont réalisées dans des conditions réelles.

Plus récemment, Solazzi et al. [SFSB07] ont présenté un nouveau concept de dispositif haptique à 5 ddl qui combine une interface à retour d’effort avec les données cinématiques délivrées par une plaque plane qui pivote sur le bout du doigt (Fig. 1.21). Le contact peut se produire à

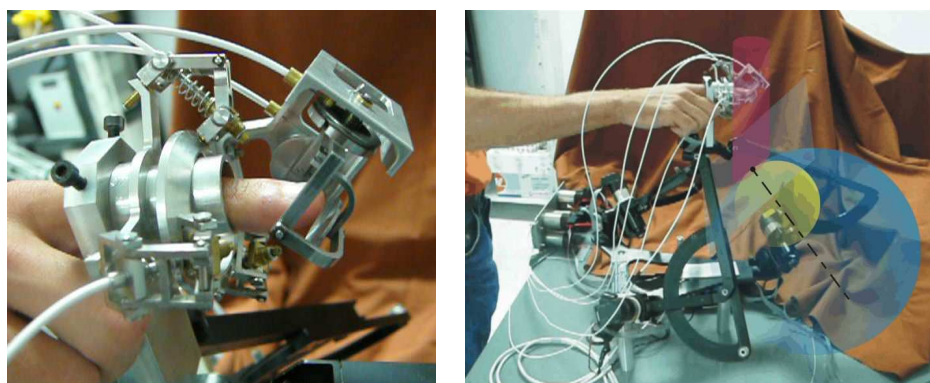


FIG. 1.21 – Détail de l’interface haptique de stimulation du bout du doigt et le dispositif expérimental où le retour d’effort est superposé avec le retour tactile (d’après [SFSB07]).

différents endroits de la pulpe du doigt, bien sûr suivant l’orientation de la surface virtuelle. Les auteurs considèrent que ce dispositif permet d’augmenter les performances dans des tâches d’ex-

ploration de formes, leurs premières expérimentations ont d'ailleurs montré que les utilisateurs parviennent à détecter de très petites courbures, de l'ordre de  $2.35 \text{ m}^{-1}$  [SFBS07].

### 1.3.2 Simulation de la souplesse/mollesse

La souplesse est une dimension de jugement importante lorsque l'on touche un matériau. Pour reproduire cette sensation, Fujita et al. [FO01] ont utilisé des systèmes à retour d'effort. Dans leurs études, la souplesse est simulée sur le bout du doigt de façon à faire ressentir la déformation de la surface de l'objet provoquée par la force d'appui. Le principe peut être décrit de la manière suivante : quand nous touchons un objet déformable avec notre doigt, le bout du doigt s'enfonce dans la matière. Ce phénomène augmente ainsi la surface de la pulpe du doigt au contact. Dans ce cas, il a été montré expérimentalement que l'aire maximale de contact est indépendante de la souplesse de l'objet, dans une tâche où l'utilisateur pince une surface inconnue [FO99]. En effet, il ressort de cette étude que l'utilisateur touche l'objet déformable jusqu'à atteindre une certaine limite de l'aire de contact.

Partant de cette analyse Fujita et al. ont émis l'hypothèse que la souplesse pouvait être simulée en contrôlant le taux de croissance de l'aire de contact en fonction de la force de contact. Ils ont donc développé un dispositif basé sur ce principe (Fig. 1.22) et les expériences psychophysiques menées sur ce dispositif ont confirmé la pertinence de la simulation. Ceci confirme indirectement



FIG. 1.22 – Interface tactile reproduisant la souplesse (d'après [FO01]).

que les informations tactiles sont plus importantes que les informations proprioceptives dans une tâche de perception de la souplesse [SL95].

Partant de l'étude précédente, d'autres dispositifs permettant de simuler la souplesse ont été mis en oeuvre. Yokota et al. [YYYH07] ont par exemple modifié la technique utilisée par Fujita et al. de manière à pouvoir intégrer le dispositif qui simule la souplesse sur un dispositif électro-

statique (Fig. 1.23a). L'interface est équipée d'une plaque avec des électrodes, d'un film curseur en papier conducteur et d'un moteur linéaire (Fig. 1.23b). Le film du curseur est tiré de chaque

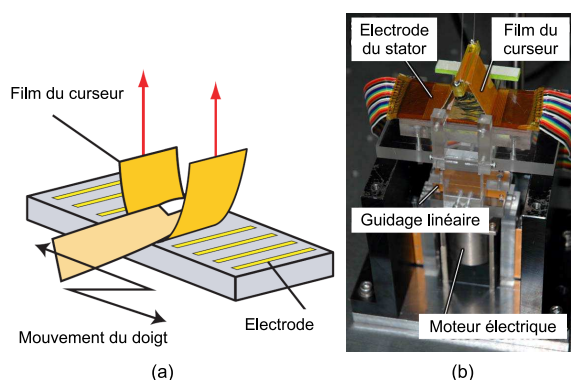


FIG. 1.23 – (a) Schéma de principe du dispositif, (b) dispositif expérimental (d'après [YYYH07]).

côté de façon à s'enrouler autour du doigt et ainsi augmenter la surface de contact de la pulpe du doigt.

Constatant l'incapacité du dispositif de Fujita à simuler les changements dynamiques de l'aire de contact ainsi que sa faible résolution spatiale, Scilingo et al. [SSTB07] proposent un dispositif pneumatique constitué d'un ensemble de cylindres de différents diamètres imbriqués les uns dans les autres et arrangés de façon télescopique (Fig. 1.24). Il est actionné par un jet d'air qui pousse

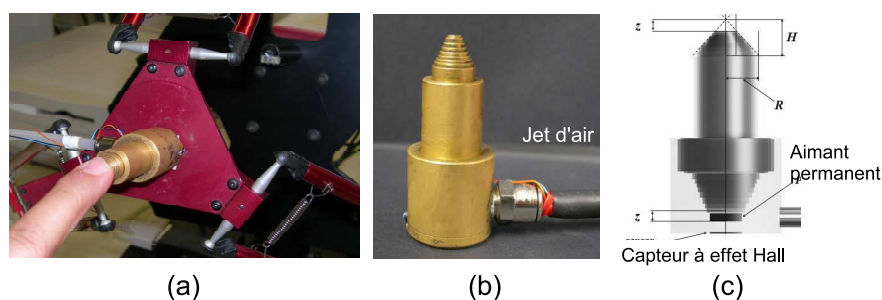


FIG. 1.24 – (a) Le système haptique. (b) Dispositif pneumatique faisant varier l'aire de contact et (c) sa vue schématisée (d'après [SSTB07]).

l'une des extrémités des cylindres. Le doigt de l'utilisateur sonde l'autre extrémité du dispositif. Ce dispositif, couplé à un système à retour d'effort (Fig. 1.24a) afin d'ajouter un retour kinesthésique, permet de modifier l'aire de contact entre le doigt et le dispositif plus rapidement.

Une autre approche pour simuler la souplesse d'un matériau consiste à utiliser les propriétés des fluides magneto-rhéologiques. Ces matériaux présentent une viscosité contrôlable sous

l'action d'un champ magnétique. En utilisant ces propriétés, Bicchi et al. [BSSR02] ont proposé plusieurs prototypes capables d'imiter la rhéologie de tissus biologiques. Deux types de dispositifs ont été mis en oeuvre : le premier dispositif impose que l'utilisateur pince une poche de fluide (Fig. 1.25a) tandis que l'autre impose d'immerger sa main dans un bac rempli du fluide magneto-rhéologique (Fig. 1.25b).

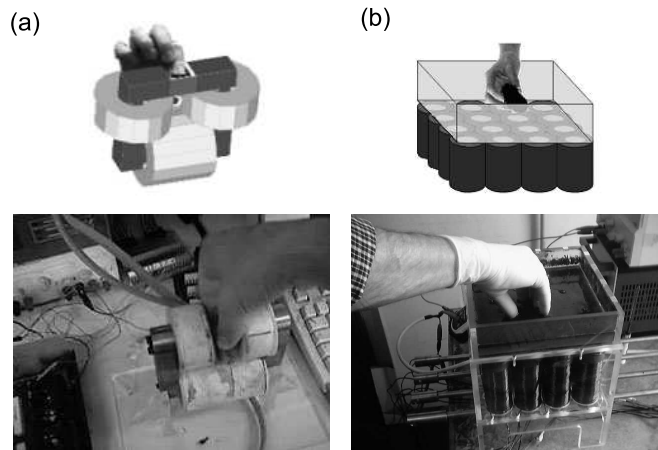


FIG. 1.25 – (a) Le schéma du 1er dispositif et sa réalisation, (b) Le schéma du dispositif d'immersion et sa réalisation [BSSR02]).

### 1.3.3 Simulation de textures

Nous avons vu que la perception tactile est une combinaison complexe de plusieurs sensations suscitées par les forces qui agissent sur notre peau. Reproduire une texture via un environnement virtuel consisterait donc à reproduire ces sensations en générant des forces appropriées. Par conséquent, la stimulation de texture fera appel à diverses technologies d'actionneurs en fonction de l'intégration voulue pour le dispositif (approche discrète ou continue) et du mode d'interaction désiré (indentation normale, étirement latéral, frottement,...). Nous remarquerons toutefois que la complexité du toucher de texture ne permet pas d'obtenir un dispositif tactile "universel" : 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 du doigt.

### a. Approche discrète

**Affichage de forme/contour par indentation normale** Influencées par les techniques d’affichage Braille, deux méthodes de stimulations sur la peau ont longtemps été proposées : l’affichage de forme et l’application de stimuli vibrotactiles. Concevoir un dispositif à affichage de forme s’apparente souvent à une représentation discrète de l’état de surface ou d’une aspérité en 3 dimensions. Cet objectif est en général réalisé au moyen d’un ensemble de picots, indépendants les uns des autres et qui se déplacent dans la direction normale à la surface. Les techniques d’actionnement des picots sont diverses et variées. Ils utilisent le plus souvent des technologies électromagnétiques simples à mettre en oeuvre, comme les moteurs à courant continu et les voice-coils, mais aussi des alliages à mémoire de forme (Fig. 1.27), des valves pneumatiques (Fig. 1.28) ainsi que des céramiques piézoélectriques (Fig. 1.29).

Concernant la technologie électromagnétique, Lee et al. [LAP99] proposent une matrice compacte de  $4 \times 5$  picots. On peut aussi citer l’afficheur de forme de Shinohara et al. [SSM98] qui offre une matrice de  $64 \times 64$  picots espacés de 3 mm (Fig. 1.26a). Dans ce dernier dispositif, les picots sont actionnés par des petits moteurs pas à pas. On trouvera aussi des indenteurs montés sur des moteurs à courant continu comme pour l’afficheur de forme à moteurs à courant continu de Wagner, Lederman et Howe (Fig. 1.26b) [WLH02] ou encore l’afficheur de forme FEELEX (Fig. 1.26c) de l’université de Tsukuba [IYNK01]. La disposition et l’encombrement de ces dispositifs varient suivant l’arrangement des moteurs (empilement sous forme de sandwich, juxtaposition...) et la façon de transformer le mouvement de rotation en translation (système vis-écrou, bielle manivelle...). Bien qu’encombrante, cette technologie permet d’obtenir une large bande passante, un grand déplacement vertical et une réponse statique stable pour un coût relativement faible et une conception assez simple.

Les alliages à mémoire de forme (AMF) offrent plusieurs caractéristiques remarquables pour des applications des micro-actionneurs ou des structures actives : leur dimension compacte, leur rapport poids/puissance développée, une activation propre et silencieuse, et leur haute résistance à des opérations cycliques. Aussi les AMF sont utilisés dans le but d’indenter la peau dans la direction normale. Taylor et al. ont développé un dispositif où sont arrangés 64 éléments réalisés à partir de 8 modules (Fig. 1.27 a). Dans ce cas, les picots peuvent s’agrandir de 5 mm et revenir

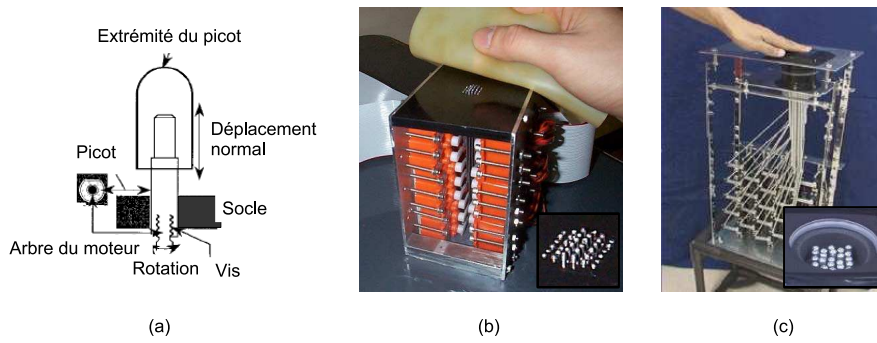


FIG. 1.26 – Technologie électromagnétique : (a) Un module de l'afficheur tactile de Shinohara. Le picot est actionné par des petits moteurs pas à pas (diamètre de 4.2 mm). Le mouvement de translation est assuré par un guidage par vis [SSM98], (b) Dispositif en sandwich. L'afficheur est constitué d'une matrice de  $6 \times 6$  picots espacés de 2 mm [WLH02], (c) Le FEELEX : dispositif avec une résolution spatiale de 8 mm. Le mouvement de translation est assuré par un système bielle-manivelle [IYNK01].

à leur taille initiale lorsqu'ils ne sont pas alimentés. Plus récemment, Velasquez et al. [VPW06] ont conçu un actionneur tactile (taxel) basé sur la technologie des AMF et prototypé comme élément de base d'une surface Braille. Ils ont proposé une intégration séduisante de ces actionneurs sous forme de ressorts antagonistes (Fig. 1.27 b1). Le prototype consiste en une matrice de  $8 \times 8$  picots actionnés par des AMF avec une résolution spatiale de 2.6 mm (Fig. 1.27 b2) et un mouvement normal de 1 mm.

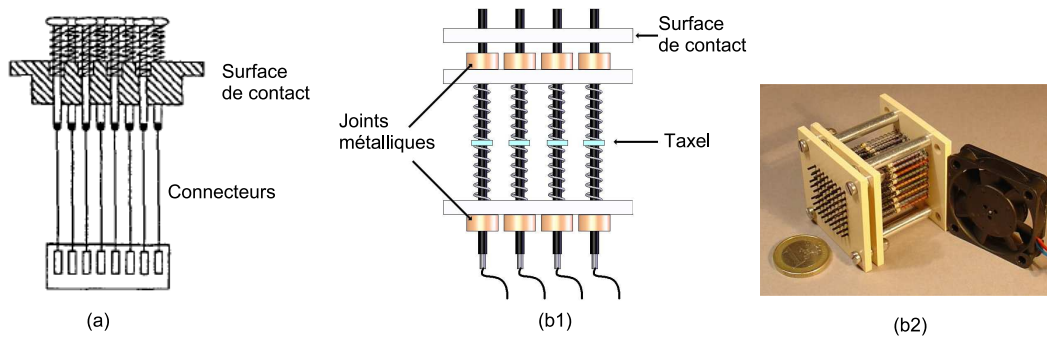


FIG. 1.27 – Alliages à mémoire de forme : (a) Un module de l'actionneur de Taylor [TMC97], (b1)(b2) Structure du dispositif et photo du dispositif de Velázquez [VPW06].

La technologie pneumatique est aussi employée pour indenter la peau dans la direction normale. Les dispositifs existants utilisent une pompe pour expulser de l'air grâce à des microvalves. Asamura et al. proposent par exemple un stimulateur (Fig. 1.28 a) avec des buses de diamètre

2 mm et d'épaisseur 0.5 mm. L'avantage de ce dispositif est de permettre le contrôle de la pression dans les cavités entre le stimulateur et la peau du doigt. Ce dispositif permet de stimuler les mécanorécepteurs superficiels. Moy et al. [MWF00] ont quant à eux développé un prototype de  $5 \times 5$  valves avec 3 bits de résolution, pouvant développer une force maximale de 0.3 N par élément. L'effecteur final est emboîté dans une gomme en silicone (Fig. 1.28 b) évitant les pertes d'air. Le déplacement vertical est effectué grâce au contrôle de la pression.

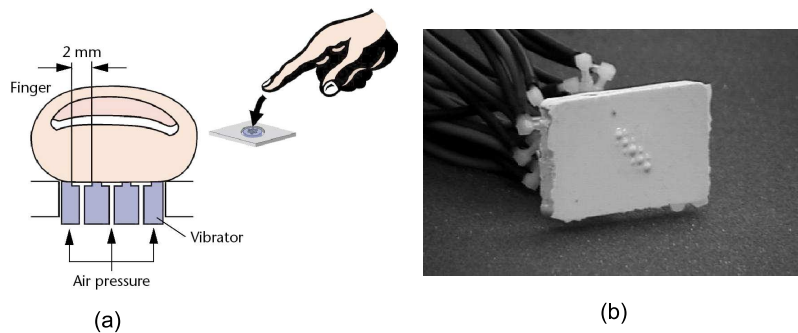


FIG. 1.28 – Technologie pneumatique : (a) Stimulateur à microvalves [AYS98], (b) Buses à expulsion d'air déformant une matrice en silicone [MWF00].

Plus rarement, la technologie piézoélectrique est employée. Un empilement de céramiques piézoélectriques (Fig. 1.29 a) ainsi qu'un système d'amplification du mouvement à deux leviers peut permettre des déplacements de 1.6 mm sur un effecteur final [FDZ<sup>+</sup>04]. D'autre part, des

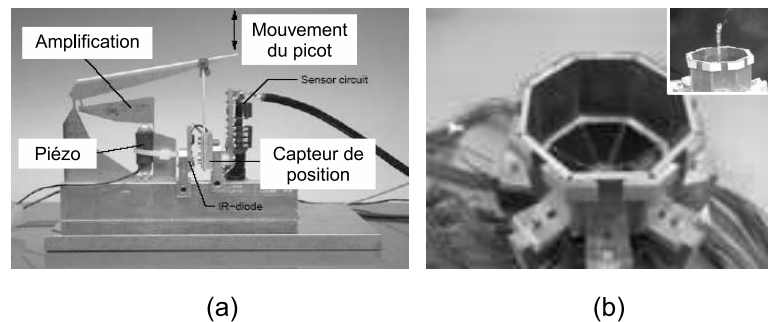


FIG. 1.29 – Technologie piézoélectrique : (a) Système combiné utilisant un empilement de cristaux piézoélectriques [FDZ<sup>+</sup>04] (b) Transducteur à ultrasons [IS06].

chercheurs ont montré qu'avec un arrangement octogonal de matrices de transducteurs piézoélectriques (Fig. 1.29 b), la pression de radiation en surface peut produire une indentation variable sur la peau [IS06].

**Vibration :** Contrairement aux afficheurs à indentation normale où les picots se déplacent avec une grande amplitude et une faible fréquence, les picots des stimulateurs vibrotactiles se meuvent avec une haute fréquence (autour de 200 Hz) et une très petite amplitude. On comprendra bien ici qu'on ne cherchera pas à "reproduire" avec les stimulateurs vibrotactiles les aspérités d'une surface mais plutôt à produire une forme d'excitation appropriée sur les différentes populations de mécanorécepteurs de la peau.

Les stimulateurs vibrotactiles à grande densité de picots sont connus depuis les années 70. L'Optacon, proposé par Linvill et Bliss et commercialisé en 1971 [BKRS70], utilise une superposition de 6 rangées de 24 poutres piézoélectriques en flexion. Cependant dans ces premiers dispositifs, la forme d'onde du stimulus était généralement limitée à un train d'onde dont la fréquence des impulsions était fixée (autour de 250 Hz) ou à une onde sinusoïdale de fréquence fixe (de même autour de 250 Hz). L'affichage des formes était donc réalisé grâce à l'intermittence entre la fonction marche et arrêt. Ainsi, fonctionnant dans cette gamme fréquentielle réduite, ces stimulateurs étaient dédiés à exciter principalement les corpuscules de Pacini.



FIG. 1.30 – L'Optacon [htt].

L'université d'Exeter a également conçu une matrice de cette sorte. Cependant, un arrangement circulaire en 5 couches (Fig. 1.31 a) 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. Le dispositif d'Exeter a donc un avantage considérable par rapport à ses prédécesseurs : sa bande passante comprise entre 25 et 400 Hz lui permet d'avoir une large gamme de stimuli sur chaque contacteur. Ceci permet, par exemple, de cibler différents mécanorécepteurs de la pulpe du doigt.

Un autre type de dispositif comme le VITAL du CEA-List permet d'afficher des informations vibrotactiles de forme grâce à des micro-bobines [BKHSJ05]. La matrice finale contient  $8 \times 8$  éléments et les picots vibrent dans une gamme de fréquence comprise entre 270 Hz et 800 Hz



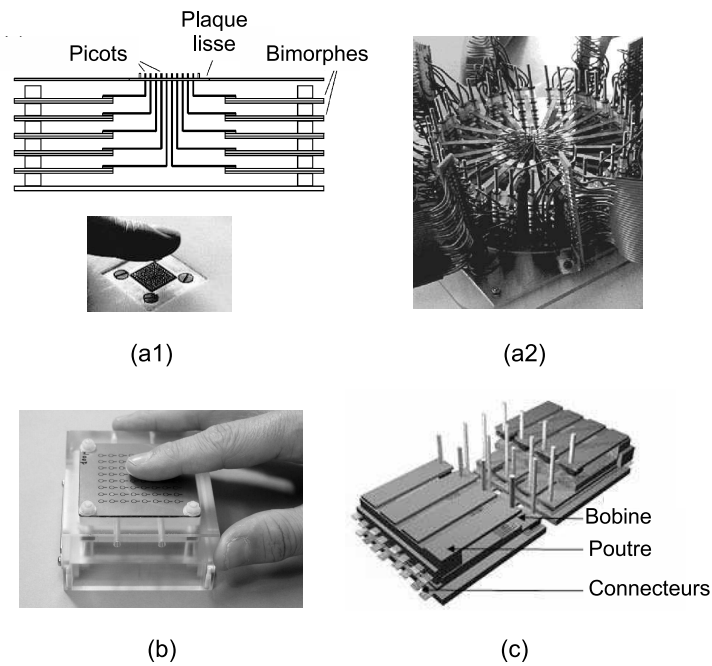


FIG. 1.31 – (a1) (a2) Afficheur tactile piézoélectrique à large bande passante (20-400 Hz) [SCSB01], (b) le VITAL du CEA-List [BKHSJ05], (c) Schéma général de la matrice 4×4 avec des actionneurs magnétostatiques [TDT<sup>+</sup>06].

(Fig. 1.31 b). Pour ce type d'actionneur, l'interaction électromagnétique est principalement due à l'utilisation de micro-bobines et de micro aimants permanents. Cependant, il est encore très difficile de les réaliser en utilisant les méthodes classiques (électroérosion, circuit imprimé pour les bobines) pour cause de coût et de temps de fabrication. Une idée intéressante pour fabriquer un stimulateur vibrotactile serait alors d'utiliser la technologie Silicium [TDT<sup>+</sup>06] pour intégrer les micro-bobines sur la structure (poutre ou membrane) et utiliser les aimants comme partie fixe. Cela peut ouvrir des possibilités d'intégration inférieure au millimètre puisque l'interaction entre structure sera alors négligeable (Fig. 1.31 c).

**Génération de contraintes de cisaillement :** Les deux premiers types de stimulateurs (indentation normale et vibration) travaillent à partir des forces normales à la surface de contact. Toutefois, afin d'engendrer les sensations les plus réalistes possible dans les interfaces homme-machines, il est aussi important de simuler les forces latérales qui agissent sur la peau du doigt : les forces de cisaillement. En effet, nous avons vu que les forces de cisaillement sont particulièrement importantes lorsque nous explorons activement une surface, c'est-à-dire quand il y a un mouvement relatif entre la peau du doigt et la surface. Ainsi, des dispositifs produisant des

forces de cisaillement sur la peau ont été proposés.

La première approche de conception consiste à faire ressentir un glissement variable lié à l'interaction doigt surface. Par exemple, Van Doren et al. [DPV87] proposent un assemblage de 88 plaques piézoélectriques de telle sorte que les éléments (9 éléments représentés sur la fig. 1.32 a) subissent une élongation dans la direction de polarisation et donc une diminution de hauteur. Ce dispositif permet de réaliser différentes sortes d'ondes progressives discrètes qui peuvent varier en fréquence, en longueur d'onde et en amplitude, ce qui le positionne aussi comme dispositif capable de cisailer la peau. C'est aussi le cas du dispositif "Slip Aesthesis" [THC05], un dispositif à deux dimensions qui étire la peau du doigt en utilisant des moteurs miniatures en forme de rouleaux. Dans cette application, les moteurs à courant continu sont utilisés pour cisailer la peau (Fig. 1.32 b).

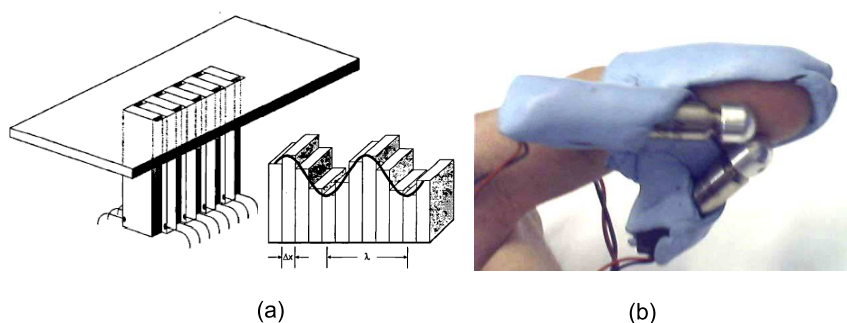


FIG. 1.32 – (a) Stimulateur tactile constitué de 88 éléments piézoélectriques alignés [DPV87], (b) Dispositif "Slip Aesthesis" [THC05].

Une autre méthode pour simuler un glissement variable a été proposée par Tatara et al. [TMM02]. Ces auteurs ont développé un dispositif qui stimule la surface de la pulpe du doigt dans la direction tangentielle (Fig. 1.33 a). Des actionneurs électriques à bobine mobile (voice-coils) ont été utilisés pour étirer des barres de 0.8 mm espacées de 1 mm dans la direction tangentielle avec une amplitude maximale de 100  $\mu$ m. Pour ce dispositif, la perception de la rugosité augmente avec l'amplitude et la fréquence des stimuli.

La seconde approche de conception vise d'avantage à permettre la perception de détails isolés. On peut citer le dispositif proposé par Fritschi et al. [FDZ<sup>+</sup>04] qui sert à étirer la peau du doigt de manière locale dans deux directions avec une matrice de 2×2 picots se déplaçant latéralement (Fig. 1.33 b).

Wang et al. [WHS04] présentent un appareil qui provoque la déformation tangentielle de la pulpe

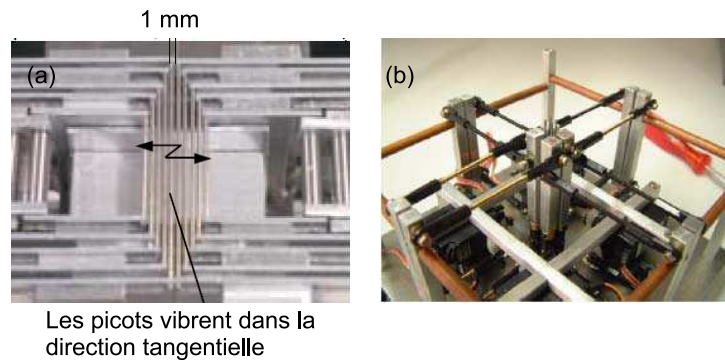


FIG. 1.33 – (a) Dispositif d'étirement de la peau dans la direction latérale [TMM02], (b) Afficheur de forces de cisaillement [DFZ<sup>+</sup>05].

du doigt de manière contrôlée. Cet appareil, au contact de la peau en 2 endroits séparés d'environ 1 mm, étire et compresse la peau au moyen de bimorphes piézoélectriques (Fig. 1.34 a). Parallèlement, cette équipe proposa un nouveau dispositif basé sur ce principe [PH03] [WH06], appelé le STRESS. Ce dispositif, conçu cette fois de façon modulaire, comprend  $6 \times 10$  bimorphes piézoélectriques, a une résolution spatiale de  $1.8 \times 1.2$  millimètres et bénéficie d'une large bande passante (Fig. 1.34 b). Ces derniers dispositifs permettant de cisailier la peau localement (l'affi-

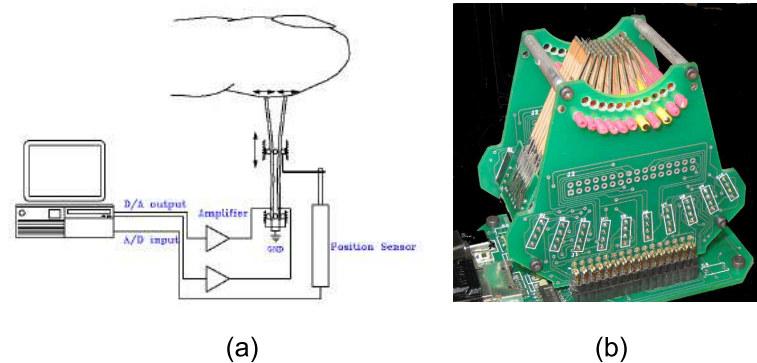


FIG. 1.34 – (a) Stimulation latérale de la peau avec impédance mécanique contrôlable [WHS04], (b) Design modulaire du STRESS, la surface active est d'environ  $1 \text{ cm}^2$  [WH06].

cheur de forces de cisaillement de Fritschi et al. et le STRESS monté sur un pantographe) sont particulièrement intéressants. En effet, d'après les études sur le comportement entre le doigt et la surface, il ressort qu'il est important de pouvoir modifier le coefficient de frottement localement sous la pulpe ou encore de faire en sorte qu'il existe des gradients spatiaux de vitesse relative entre le doigt et la texture. Il est donc cohérent d'utiliser l'étirement local de la peau

pour simuler des textures fines.

Dans cette partie nous avons traité l'approche discrète souvent utilisée pour réaliser un effecteur tactile. Nous avons vu, d'un point de vue technologique, que ces interfaces résultent d'un compromis entre les indentations normales et les efforts latéraux engendrés, de la rapidité avec laquelle ces stimulations peuvent évoluer, de l'encombrement et de la consommation si ces interfaces sont prévues pour être portables ou de bureau.

Concernant la façon d'utiliser ces actionneurs, on constate que deux cas peuvent se produire : soit le motif réalisé par les picots est fixe (indentation normale) et le doigt se déplace sur la surface. On est alors dans le cas d'un toucher "actif". Soit le doigt est posé sur un dispositif dont la surface évolue au court du temps, impliquant un toucher "passif".

A partir de ces deux cas de figure, il est possible d'évaluer le réalisme de ces dispositifs. En effet, d'un point de vue spatial, un espacement minimal de 1 mm entre les effecteurs finaux des afficheurs matriciels a souvent été recommandé. Par conséquent, cette valeur rapportée dans le cas d'une tâche statique [PJ81], n'est valable que pour les dispositifs dédiés à un toucher "passif". Cet interespacement n'est donc pas très pertinent dans le cas du toucher actif, où nous savons que l'acuité spatiale de notre système sensoriel est bien meilleure.

Par ailleurs, pour ces dispositifs discrets, le frottement inhérent d'un picot sur la pulpe du doigt est difficilement compensable. Ceci peut être un handicap à la simulation de textures fines compte tenu du rôle des rainures d'empreinte et de la commensurabilité pour amplifier la sensation due aux singularités de très petites tailles (entre 0.1 et 0.3 mm) [Mar06b].

Ainsi, la capacité de dispositifs proposant une stimulation continue est elle à étudier dans le cadre de la stimulation de textures fines.

## **b. Approche continue**

Les dispositifs qui relèvent de cette appellation présentent une même stimulation sur l'ensemble de la pulpe du doigt. On distinguera cependant deux types d'interface. Les premiers sont des dispositifs assez simples qui ont la possibilité de produire des secousses par à-coup. Les seconds sont des dispositifs qui permettent de changer dynamiquement le coefficient de frottement entre un doigt et une surface. On remarquera en outre que, puisque la stimulation est globale, il sera alors nécessaire de récupérer la position du doigt pour pouvoir reconstituer les caractéristiques spatiales de la surface simulée.

**Création de secousses par à-coup** Ce type de dispositif est en particulier dédié à améliorer le rendu des écrans sensitifs (c'est-à-dire les écrans qui permettent l'acquisition de la position du doigt), pour permettre de toucher ce que l'on voit. Par exemple, il peut s'agir de faire croire à l'utilisateur qu'un bouton s'enfonce réellement, lorsqu'il touche le dessin de ce bouton sur son écran sensitif.

Poupyrev et al. [PM03] ont présenté un dispositif capable de s'incorporer sur l'écran sensitif d'un PDA (Personal Digital Assistant). Ils ont implanté quatre actionneurs entre l'écran plat et la plaque de verre sensitive (Fig. 1.35 a1). Ces actionneurs sont constitués d'un empilement de fines couches de céramiques piézoélectriques qui se fléchissent sous l'action d'un champ électrique. Ainsi quand l'utilisateur pose son doigt sur la plaque en verre, l'actionneur se fléchit brusquement et pousse la plaque contre le doigt de l'utilisateur. Plus tard, un téléphone portable a été équipé de cette technologie (Fig. 1.35 a2) [KBL06] ; il propose 4 types d'applications : clavier numérique affiché à l'écran, sélection du texte, défilement et la fonction "drag and drop". Par ailleurs, il est

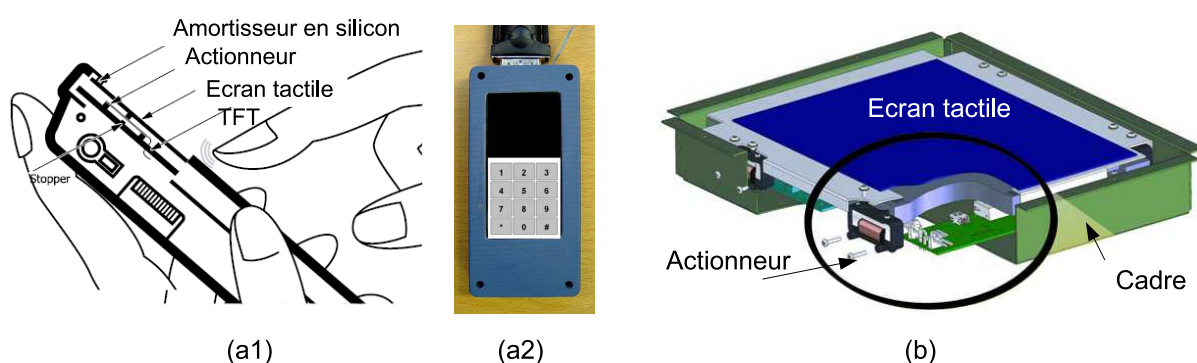


FIG. 1.35 – (a1) Dispositif tactile pour de petits écrans sensitifs [PM03], (a2) Téléphone tactile [KBL06], (b) Actionneur pour écrans plats sensitifs [Imm].

aussi possible de trouver sur le commerce [Imm] des actionneurs dédiés à reproduire cet effet sur de plus grands écrans plats (Fig. 1.35 b). L'effet tactile dû à la vibration de la plaque se décline dans ce cas, suivant la durée, la fréquence, l'amplitude et la forme de l'impulsion envoyée par l'actionneur.

**Création d'un frottement variable** Nous avons vu que la sensation tactile peut être changée par une différence de texture de l'ordre du micromètre. Les méthodes conventionnelles favorisant les matrices à picots ne sont donc pas appropriées pour simuler cette sorte de sensation. La solution envisagée par les chercheurs pour pallier cette impossibilité fonctionnelle serait alors de

créer des dispositifs continus ayant la faculté de créer un frottement variable et contrôlable. Pour ce faire, Watanabe et al. [WF95] ont proposé une méthode pour contrôler la rugosité d'une surface. Ils excitent une poutre à ses extrémités avec deux transducteurs de Langevin (pots vibrants piézoélectriques) (Fig. 1.36 a). De cette façon, ils génèrent, sur la surface de la poutre en question, une onde de surface de quelques micromètres d'amplitude. Au contact du doigt, il se crée un coussin d'air entre le doigt et la poutre, donnant lieu à une sensation glissante. De manière presque analogue, des pots vibrants magnétiques ont été utilisés pour exciter des plaques fuselées (plaques dont la largeur décroît graduellement) (Fig. 1.36 b). Dans cette configuration géométrique précise, les auteurs [NMYT98] remarquent qu'il existe une frontière à partir de laquelle l'amplitude de l'onde surfacique est atténuée. Et puisque la frontière de la zone glissante dépend de la fréquence, il est donc possible de la déplacer pour permettre un ressenti de glissement variable dans la direction tangentielle. Dans la même idée mais sur une surface plus réduite, Winfield et al. ont tout récemment proposé le T-pad [WGEP07].

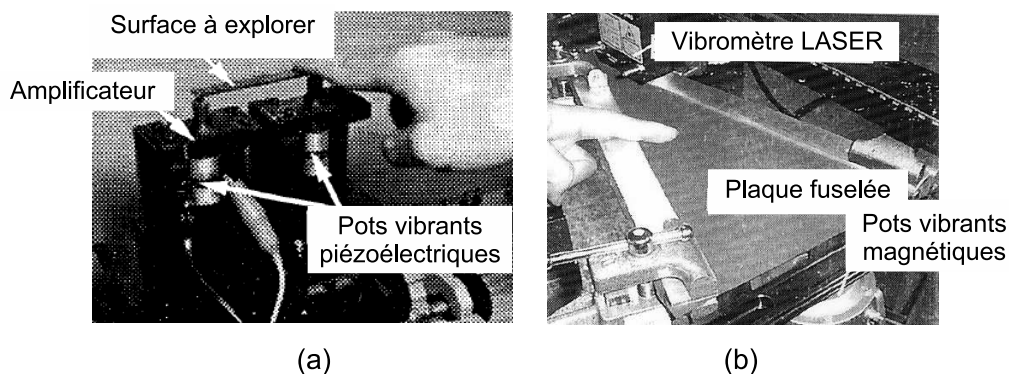


FIG. 1.36 – (a) Poutre excitée par 2 transducteurs de Langevin [WF95], (b) Plaque fuselée excitée par des pots vibrants magnétiques [NMYT98].

Des dispositifs à onde acoustique de surface (SAW) ont été également proposés [TFK<sup>+</sup>06]. Le transducteur à ondes de surface fonctionne de la manière suivante. Un signal est appliqué à des doigts interdigités (IDT) déposés sur un cristal piézo-électrique poli (substrat en niobate de Lithium, LiNbO<sub>3</sub>) (Fig. 1.37 a et b). Cela génère donc à la surface du cristal des déformations ultrasonores dites "ondes de Rayleigh". Une onde stationnaire (fréquence autour de 10 MHz) est générée sur le dispositif en utilisant la superposition de deux ondes progressives. La sensation tactile est obtenue par l'intermédiaire d'un curseur, dont la face en contact avec l'onde de surface est recouverte de petites billes en acier. La sensation tactile est obtenue de la manière suivante : quand un matériau dur comme une bille en acier est posée sur la surface de l'onde, la durée

du contact change en fonction de la fréquence de vibration. Ainsi, le coefficient de frottement moyen semble diminuer lorsque la vibration est très rapide. Si de surcroît, des trains d'ondes à basse fréquence sont envoyés, il est possible de créer un frottement variable sur ce dispositif.

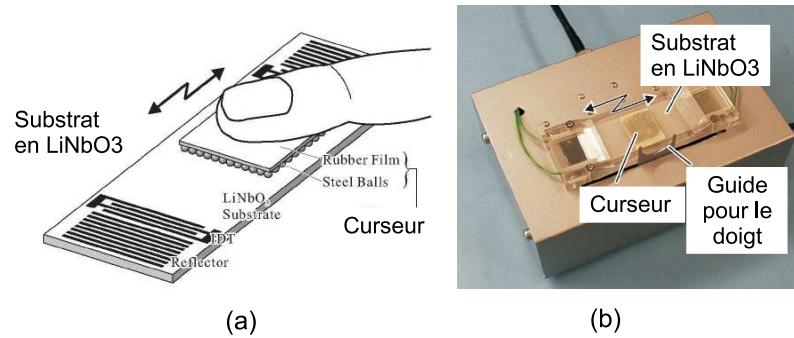


FIG. 1.37 – (a) Schéma de principe et (b) réalisation du dispositif tactile à onde de Rayleigh [TFK<sup>+</sup>06].

Le dernier dispositif utilise la technologie électrostatique pour simuler un frottement variable [YNYH06]. Ce dispositif est constitué d'une plaque qui joue le rôle de stator et d'un curseur qui joue le rôle de rotor (Fig. 1.38 a). Leur interaction génère des forces électrostatiques qui s'op-

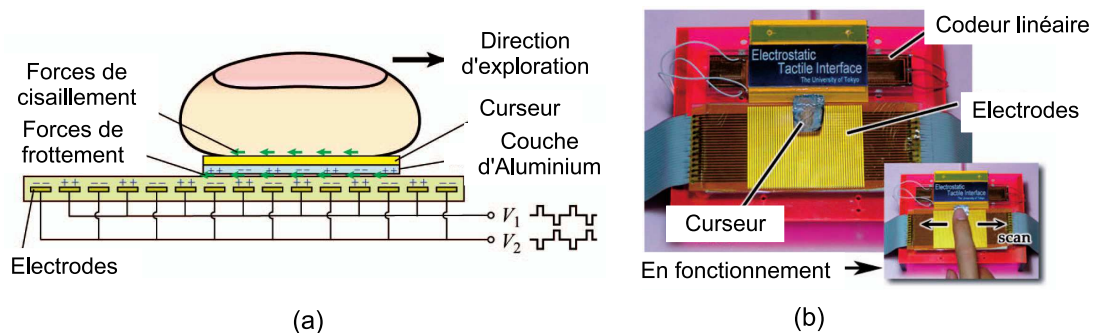


FIG. 1.38 – (a) Principe de la stimulation tactile. La stimulation fonctionne uniquement lorsque le doigt bouge. (b) Le dispositif électrostatique avec son curseur. [YNYH06].

posent au mouvement du doigt (frottement). Ce dispositif fonctionne en appliquant une tension biphasée périodique sur chacune des électrodes (Fig. 1.38 a et b). Les motifs simulés diffèrent conformément à la forme d'onde choisie pour la tension d'alimentation.

## 1.4 Conclusion du chapitre

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons décrit les propriétés du toucher. Nous avons d'abord présenté les investigations qui ont été menées sur les mécanismes neurophysiologiques

pour des tâches de détection et de discrimination. Par la suite, nous avons étudié des expériences psychophysiques dont le but était de déterminer les relations quantitatives qui existent entre un stimulus physique et la sensation que nous en avons. D'une part, nous avons vu que la procédure exploratoire dédiée au toucher de textures fines est celle qui implique le toucher latéral et d'autre part, que la littérature amène raisonnablement à faire l'hypothèse de meilleures performances de reconnaissance en toucher actif. Dans ces conditions, une étude ergonomique a été présentée. Elle nous a renseignés sur quelques éléments à prendre en compte pour la conception d'un dispositif tactile adapté à la stimulation de textures fines.

Puis, nous nous sommes intéressés aux phénomènes mécaniques qui interviennent lors de l'interaction entre le doigt et la surface pour mieux comprendre comment stimuler à notre tour, avec un stimulateur tactile, le doigt d'un utilisateur.

Par ailleurs nous nous sommes attardés sur la psychophysique de la rugosité. Nous avons conclu sur le fait que, pour simuler une texture rugueuse, il faudra prendre en compte les phénomènes multiéchelles intervenant dans la perception de la rugosité et ne pas oublier l'importance de la posture et de l'orientation du mouvement du doigt.

Enfin, nous avons présenté quelques exemples d'illusion haptique utilisés pour la conception de stimulateurs tactiles.

Dans une deuxième partie, nous avons présenté des dispositifs tactiles que nous avons classés en fonction des propriétés haptiques recherchées par les concepteurs. Nous avons vu que la stimulation de la forme pouvait exploiter soit le glissement du doigt, soit l'orientation du bout du doigt. Quant à la mollesse, elle peut être simulée en contrôlant le taux de croissance de l'aire de contact en fonction de la force d'appui.

En outre, nous avons montré que la simulation de textures fait appel à diverses technologies d'actionneurs, qui sont utilisées en fonction de la structure voulue pour le dispositif et du mode d'interaction désiré. Deux approches ont cependant été distinguées : l'approche discrète et l'approche continue.

L'approche discrète permet l'affichage de forme par indentation normale, la stimulation directe des mécanorécepteurs par des dispositifs vibrotactiles ou encore la simulation de contraintes de cisaillement. Quant à l'approche continue, elle permet de s'affranchir des problèmes d'intégration inhérents aux dispositifs discrets, riches spatialement, en proposant une stimulation riche temporellement et qui tient compte de la position du doigt de l'utilisateur.

Les dispositifs continus à frottement variable ont particulièrement retenu notre attention



puisqu'ils offrent la possibilité de simuler des textures très fines, de différentes rugosités. Cependant, avant d'orienter notre choix vers ce type de stimulateur tactile, il nous paraît essentiel de valider le concept avec des expériences psychophysiques qui nous permettront de voir si ce type de phénomène est réglable et facile à mettre en oeuvre. D'autre part, nous pourrions ainsi avoir une indication plus précise sur la plage de sensations qu'il est possible d'obtenir avec un tel dispositif. Ceci fait l'objet du second chapitre.



## Chapitre 2

# Caractérisation de la stimulation vibrotactile Haute Fréquence

### Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>51</b>
<b>2.2</b>	<b>Perception réglable de la rugosité des surfaces</b>	<b>52</b>
2.2.1	Contexte : expérience de Watanabe et al.	52
2.2.2	Motivations pour une caractérisation expérimentale des dispositifs capables d'atténuer la rugosité.	54
2.2.3	Principe	54
2.2.4	Mise en oeuvre expérimentale	55
2.2.5	Evaluation	59
<b>2.3</b>	<b>Stimulation globale par modification spatio-temporelle des efforts de cisaillement sur la pulpe du doigt</b>	<b>67</b>
2.3.1	Dispositif expérimental de génération des stimuli	68
2.3.2	Etude qualitative de la sensation	72
<b>2.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>75</b>

---

## 2.1 Introduction

Dans le but de concevoir une interface tactile capable de simuler des textures fines et laissant libre cours au mouvement d'exploration du doigt, une stimulation continue s'avère certainement

plus appropriée qu'une stimulation discrète. Effectivement, nous avons vu dans le cas du toucher actif de textures que l'acuité spatiale du doigt atteint des niveaux inférieurs au millimètre. Ainsi, connaissant cette spécificité, il paraît encore difficile de concevoir un dispositif discret qui réponde à la fois à cette condition d'espacement entre picots, tout en autorisant un espace de travail suffisant, conformément aux exigences ergonomiques ; choisir ce type de stimulation impliquerait un effort considérable pour d'une part, résoudre les problèmes d'intégration et d'autre part, réaliser une commande indépendante de chaque picot de la surface active de l'interface.

Nous nous sommes donc orientés vers une stimulation vibrotactile à haute fréquence et continue. Cette idée fut amorcée par Watanabe et al. [WF95] qui ont montré l'efficacité de cette technique pour passer d'un état rugueux à un état glissant. Ces auteurs ont donc ouvert la voie à un nouveau type de stimulateurs tactiles, aptes à simuler un état de surface variable de manière continue.

Ainsi, partant de leurs expériences, nous nous sommes attachés à quantifier cet effet en fonction des paramètres physiques qui rentrent en jeu dans la perception de la rugosité et du glissement. Puis, dans le souci de prendre en compte l'aspect spatio-temporel de la perception des textures et la nature transitoire des informations émanant du toucher actif, nous proposons de contrôler les effets bloquant et glissant en fonction du mouvement de l'utilisateur pour simuler des motifs de textures variables.

## **2.2 Perception réglable de la rugosité des surfaces**

### **2.2.1 Contexte : expérience de Watanabe et al.**

Watanabe et al. [WF95] proposent un dispositif test (décrit Fig. 1.36) constitué d'une poutre en acier dont chacune des extrémités est fixée à un transducteur de Langevin vibrant à la fréquence de 77 kHz. Ces actionneurs peuvent induire des vibrations mécaniques maximales d'environ  $2 \mu\text{m}$  d'amplitude à la poutre.

Lorsqu'un utilisateur déplace son doigt sur cette poutre en vibration, il constate que la poutre devient glissante et très douce en comparaison de la poutre au repos. Watanabe et al. changent l'état de surface de la poutre en la polissant à l'aide de papiers de verre de qualités différentes. Ils montrent alors que plus le polissage est grossier - c'est-à-dire plus la rugosité géométrique de la poutre est grande - plus l'amplitude de vibration à imposer à la poutre pour obtenir chez la plupart des personnes une sensation glissante est grande (Fig. 2.1). Ce faisant, Watanabe et al.

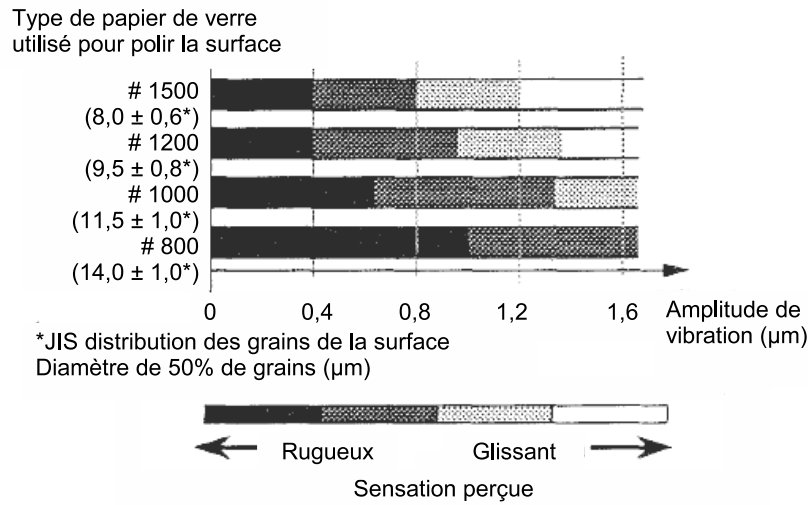


FIG. 2.1 – Dépendance de la sensation tactile en fonction de l'amplitude de vibration et de la rugosité de la surface [WF95].

ont mis à jour la dépendance de l'amplitude de vibration et de l'état de surface de départ de la poutre sur la sensation glissante obtenue.

En outre, ces auteurs ont aussi observé que la fréquence de vibration ne joue aucun rôle sur la sensation perçue, à condition que celle-ci dépasse une valeur seuil, évaluée à environ 20 kHz.

Le tableau 2.1 résume les propriétés et les résultats obtenus par Watanabe et al. sur leur dispositif. Compte tenu des amplitudes de vibration et des fréquences mises en oeuvre, nous pouvons affirmer que ce dispositif permet en quelque sorte d'atténuer le coefficient de frottement perçu de la surface d'exploration sans pour autant exciter directement les mécanorécepteurs à des fréquences contenues dans leur bande passante (voir Fig. 1.4).

Matériel utilisé	Effet mécanique obtenu	Effet tactile	Paramètre influençant la sensation tactile
Transducteurs de Langevin fixés aux extrémités d'une poutre en acier.	Création d'une onde stationnaire de flexion le long de la poutre à 77kHz.	Passage de l'état rugueux à l'état glissant.	L'amplitude de vibration de la poutre et sa rugosité. Un seuil fréquentiel en dessous duquel il n'y a plus d'effet.

TAB. 2.1 – Résumé des propriétés et des effets du dispositif de Watanabe et al.

### 2.2.2 Motivations pour une caractérisation expérimentale des dispositifs capables d'atténuer la rugosité

Les résultats obtenus par Watanabe et al. s'avèrent très encourageants puisque l'effet d'atténuation du coefficient de frottement perçu semble être un caractère réglable en fonction de l'amplitude de vibration de la plaque. Cependant, l'évaluation qui a été proposée est à notre sens insuffisante puisqu'elle n'a pas permis, par exemple, de déterminer de manière précise les seuils de détection de la rugosité et/ou du caractère glissant en fonction de l'amplitude de vibration et de l'état de surface initial de la plaque.

D'autre part, il est intéressant de connaître l'impact d'autres traitements de surface. L'utilisation de textures fines mais orientées, dont l'échelle spatiale est comprise approximativement entre 1 mm et 200  $\mu\text{m}$  (§b.), nous permettra de connaître l'efficacité de ce type de dispositif à limiter le cisaillement à l'échelle des crêtes épidermiques, à l'origine d'une sensation intense de frottement [Mar06b]. Ainsi, nous pouvons espérer pouvoir simuler une très large gamme de sensations allant du très rugueux au très glissant.

Pour cela, nous allons évaluer l'évolution de la rugosité, bien sûr en fonction de l'amplitude de vibration mais aussi en fonction de la directionnalité entre les empreintes digitales et la texture. Pour cette évaluation, nous proposerons par ailleurs un dispositif plus simple à mettre en oeuvre que celui de Watanabe et al, puisqu'il ne nécessite qu'un seul transducteur de Langevin et n'a pas besoin d'amplificateur intermédiaire (horn) pour obtenir l'amplitude de vibration escomptée [BBM<sup>+</sup>07].

### 2.2.3 Principe

Nous allons donc caractériser un dispositif qui modifie la perception de la rugosité. Pour ce faire, nous utilisons une plaque dont la fréquence de résonance devra être supérieure à 20 kHz et l'amplitude de vibration supérieure à 0.8  $\mu\text{m}$ . Ces valeurs sont celles relevées par Watanabe pour obtenir l'effet glissant. D'autre part la plaque sera choisie avec attention de sorte à procurer un espace d'exploration suffisant pour l'utilisateur.

Par ailleurs, afin de quantifier l'effet d'atténuation du coefficient de frottement en fonction de l'orientation de la texture rugueuse, nous recouvrons cette plaque par une texture rainurée dont les crêtes et les creux sont du même ordre de grandeur que ceux des empreintes digitales, ce qui permet d'obtenir les conditions optimales de commensurabilité. Une attention particulière est

portée à la direction du mouvement de l'utilisateur par rapport à l'orientation de la texture. En effet, nous savons d'après l'expérience de Martinot [Mar06b] qu'un mouvement dirigé dans le sens des rainures de la texture engendre la sensation d'une surface lisse (Fig. 2.2 a) alors qu'un mouvement orthogonal aux rainures donne l'impression d'une surface rugueuse (Fig. 2.2 b et c). Mais plus encore, afin de tester si l'orientation des crêtes épidermiques influe sur le phénomène de lubrification à haute fréquence, nous distinguons deux cas pour l'orientation orthogonale du mouvement : celui où l'angle relatif entre les rainures d'empreintes et les rainures de la texture est de  $0^\circ$  (Fig. 2.2 b) (cas très commensurable) et celui où l'angle est de  $90^\circ$  (Fig. 2.2 c).

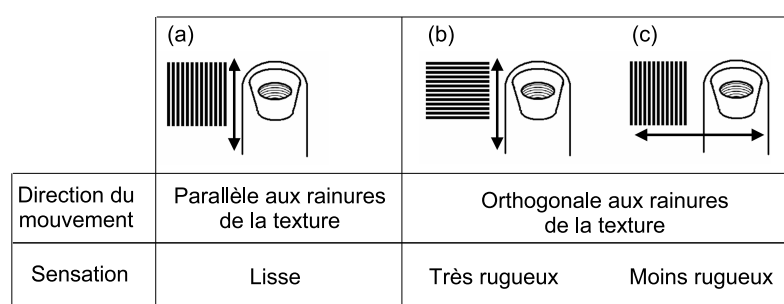


FIG. 2.2 – Mouvement dirigé du bout du doigt de l'utilisateur au regard de la sensation obtenue.

## 2.2.4 Mise en oeuvre expérimentale

### a. Plaque vibrante

Pour réaliser notre dispositif de caractérisation, nous avons choisi d'utiliser un transducteur de Langevin dont la fréquence de résonance est égale à 40 kHz (modèle FBL40452HS, Fuji Ceramics Corporation, Japan). Sur cet actionneur, nous fixons un disque de 80 mm de diamètre. De plus, afin de se rapprocher d'avantage du cas du piston, c'est-à-dire d'une plaque qui se déplace uniformément de bas en haut, nous essaierons d'induire une onde de déformation radiale du disque.

Afin d'obtenir cette onde radiale à la fréquence de résonance du transducteur choisi, il faut jouer sur l'épaisseur de la plaque, puisque le diamètre est imposé. La détermination de l'épaisseur de la plaque est réalisée grâce à une pré-étude par éléments finis du système (plaque - transducteur). L'analyse modale en 3 dimensions, menée sur le logiciel ANSYS, nous a permis de visionner les différents types de déformées obtenues pour les différentes fréquences de résonance du système et selon l'épaisseur du disque. Les résultats montrent qu'une plaque d'aluminium de 5 mm

d'épaisseur a une déformation radiale (mode n°4) à la fréquence de 41 kHz (Fig. 2.3).



FIG. 2.3 – Résultat de l'analyse modale effectuée sous ANSYS : à 41 kHz le disque à un mode 4 radial. A droite : la réalisation du dispositif de caractérisation.

Ce décalage par rapport à la fréquence de résonance initiale du transducteur (40 kHz) est tout à fait admissible, d'autant plus que l'ajout d'un élément supplémentaire sur une structure a tendance à augmenter la fréquence de résonance de l'ensemble.

L'épaisseur de la plaque étant déterminée, nous avons donc fait usiner une plaque d'aluminium de 80 mm de diamètre et de 5 mm d'épaisseur. Il a été demandé d'apporter une attention particulière à la planéité du disque, puisque ce paramètre influencera pour beaucoup la qualité de la fixation. Cette fixation a ensuite été effectuée grâce à un collage sous contrainte avec une colle Epoxy.

Le dispositif final, représenté à droite de la Fig. 2.3, a été soumis à une campagne de mesure. L'amplitude de déformation a été mesurée point par point sur le disque avec un vibromètre LASER (Modèle OFV505, Polytec GmbH, Waldbronn, Allemagne). Les résultats de ces mesures (Fig. 2.4 a) confirment l'étude par éléments finis, puisque nous obtenons le mode radial choisi pour une fréquence de résonance de 40.67 kHz.

D'autre part, les mesures effectuées sous tension réduite (20 V), nous donnent une amplitude vibratoire maximale crête-crête de 1.6  $\mu\text{m}$ , soit 0.8  $\mu\text{m}$  d'amplitude conformément à l'étude de Watanabe (Fig. 2.4 b). Nous avons donc la possibilité d'augmenter légèrement cette amplitude maximale en augmentant la tension d'alimentation.

## b. Revêtement

Sur la surface d'exploration, nous collons un revêtement adhésif rainuré. Le choix de ce revêtement est crucial pour le bon déroulement de l'expérience, puisque d'après l'article de Martinot



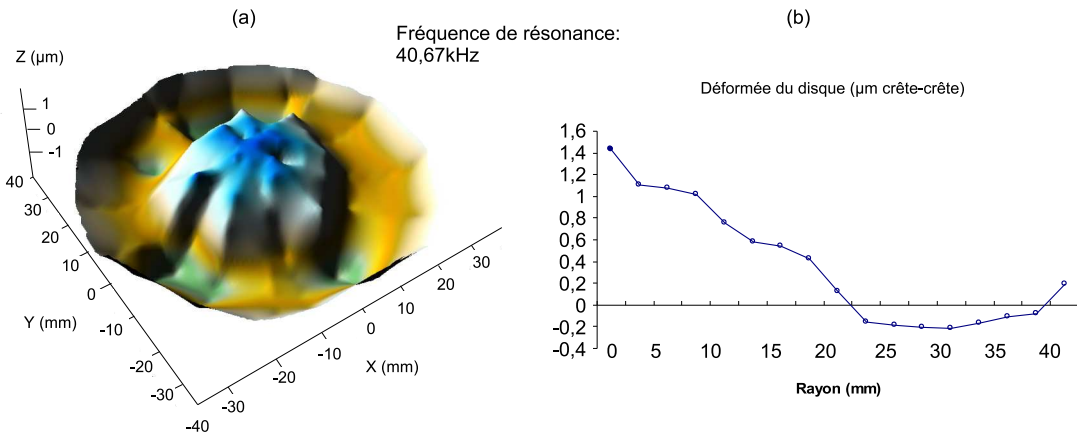


FIG. 2.4 – (a) Résultats d'ensemble et (b) sur un rayon des mesures effectuées au vibromètre LASER sous 20 V.

[Mar06b], cette amplification de la sensation due à la commensurabilité n'est effective que pour des surfaces sans reliefs importants - c'est-à-dire ne provoquant pas de courbures de la peau à l'échelle macroscopique - et adéquate à pénétrer, avec ses aspérités microscopiques, dans les rainures des empreintes digitales. Nous avons donc opté pour un adhésif très collant en plastique dont la surface est finement rainurée. Afin de s'assurer que les dimensions des rainures de l'adhésif sont du même ordre de grandeur que les dimensions des rainures d'empreintes, nous avons mesuré les profils d'ondulation et de rugosité (Fig. 2.5) du revêtement grâce à un profilomètre Taylor-Holson Surtronic 3+. Ce capteur accomplit ses mesures sur une longueur totale de 2 mm

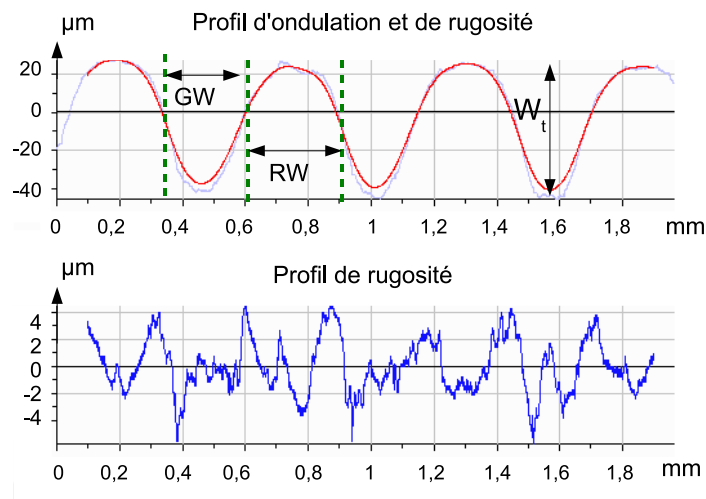


FIG. 2.5 – Profil d'ondulation et de rugosité (état de surface) de la surface texturée.

à une vitesse de  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Le traitement des mesures nous donne une courbe d'ondulation ainsi

qu'une courbe de rugosité qui nous renseignent sur la largeur des creux ("Groove Width", GW) et des crêtes ("Ridge Width", RW) de la texture ainsi que sur d'autres paramètres comme par exemple la hauteur de l'ondulation ("Waviness Height",  $W_t$ ). Ainsi, nous pouvons déduire du profil d'ondulation que la largeur des creux est de 0.26 mm et que la largeur des crêtes est de 0.30 mm. Ces valeurs sont comparées à celles obtenues par impression à l'encre des empreintes digitales (Fig. 2.6) et nous amènent à conclure que le choix de notre revêtement est pertinent

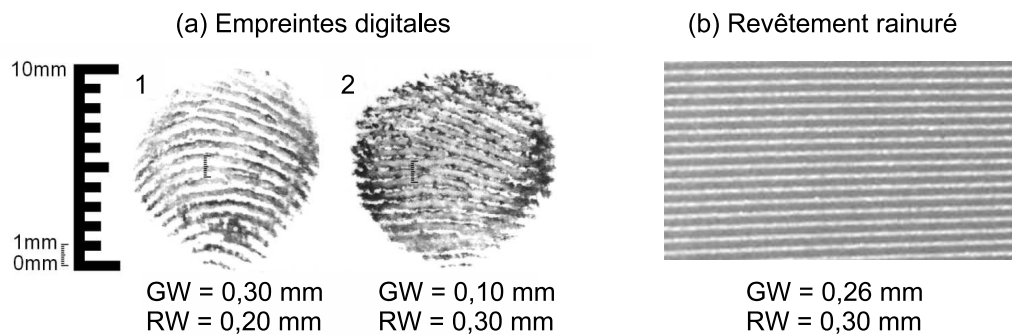


FIG. 2.6 – (a) Impression à l'encre des empreintes digitales. 1) Compression normale de la pulpe, 2) compression tangentielle [Mar06a]. (b) Agrandissement du revêtement rainuré.

pour permettre l'emboîtement entre les empreintes digitales et les rainures de la texture. Pour compléter cette étude, les paramètres géométriques du revêtement rainuré et des empreintes digitales sont résumés dans le tableau 2.2.

<b>Propriétés géométriques de la surface rainurée</b>	
Rugosité moyenne ( $R_a$ )	2.42 $\mu m$
Rugosité maximum ( $R_t$ )	14.4 $\mu m$
Hauteur d'onde ( $W_t$ )	68.4 $\mu m$
Largeur des creux	0.26 mm
Largeur des crêtes	0.3 mm
<b>Propriétés géométriques des empreintes digitales</b>	
Largeur des creux	0.1-0.3 mm
Largeur des crêtes	0.2-0.3 mm
Hauteur des crêtes épidermiques	100 $\mu m$ [MKY98]

TAB. 2.2 – Valeurs des paramètres géométriques.

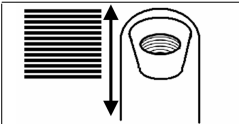
### 2.2.5 Evaluation

Le but de cette expérience est de vérifier d'une part les résultats obtenus par Watanabe et de démontrer d'autre part que l'orientation relative entre les rainures d'empreintes et les rainures de la texture influe sur l'atténuation du coefficient de frottement perçu. Nous allons pour cela quantifier la sensation perçue par les utilisateurs en fonction de l'amplitude de vibration et de l'orientation des rainures.

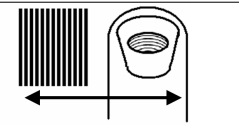
#### a. Hypothèses

Si nous considérons le cas du mouvement orthogonal aux rainures de la texture, la sensation perçue est considérée comme rugueuse (Fig. 2.2 b et c). Cependant, suivant l'orientation des rainures d'empreintes, la rugosité sera perçue de manière plus intense si les rainures d'empreintes sont orientées dans le même sens que les rainures de la texture. Cette sensation serait due au rôle

**HYPOTHESES:**



Angles relatif entre les rainures d'empreintes et de la texture  
**0°**



Angles relatif entre les rainures d'empreintes et de la texture  
**90°**

Déformations globales imposées sur la peau	LES MÊMES	
Intensité de la vibration sur la peau	LES MÊMES	
Fréquence de vibration sur la peau	LES MÊMES	
Forces de cisaillement sur les rainures d'empreintes	GRANDES	PETITES

FIG. 2.7 – Hypothèses initiales sur la déformation, l'intensité et la fréquence des vibrations ainsi que sur les forces de cisaillement pour deux orientations relatives doigt-texture perçue.

de rainures d'empreintes qui s'emboîtent dans les rainures de la texture [Mar06b]. En effet, lors du mouvement du doigt sur les rainures de la texture, les déformations globales imposées sur la peau ainsi que l'intensité et la fréquence des vibrations sont identiques dans les 2 cas (Fig. 2.7). Ceci montre, par conséquent, que la rugosité perçue ne devrait ni dépendre de paramètres spatiaux,

stochastiques ou déterministes, ni de paramètres vibratoires, mais de phénomènes d'interaction : les forces de cisaillement à l'échelle des crêtes épidermiques. Ainsi, la sensation plus intense de la rugosité, dans le cas où l'angle entre les rainures d'empreintes et les rainures de la texture est égale à  $0^\circ$ , serait donc due à de plus grandes possibilités d'emboîtement, générant par voie de conséquence de plus grandes forces de cisaillement (Fig. 2.7).

Si ces hypothèses s'avèrent exactes, une plus grande amplitude de vibration serait nécessaire pour annuler la sensation rugueuse dans le cas d'une surface très commensurable (angle relatif de  $0^\circ$ ). Nous allons donc vérifier dans les expériences qui vont suivre, si cette analyse est correcte, en imposant des vibrations haute fréquence de différentes amplitudes, dans chaque cas d'orientation de la surface.

### **b. Conception et méthodes**

Pour l'expérience, nous utiliserons donc le système constitué du transducteur de Langevin et d'un disque collé sur son sommet (Fig. 2.3) dont la conception a été détaillée dans le paragraphe "mise en oeuvre". Alimenté par une tension sinusoïdale de 40.7 kHz, ce dispositif vibre à sa fréquence de résonance et engendre une onde de flexion radiale sur le disque. L'amplitude de vibration maximale utilisée lors de l'expérience sera aux alentours de  $2 \mu\text{m}$  crête-crête. Ce dispositif est utilisé pour atténuer le frottement perçu sur la surface supérieure du disque, qui sera la surface d'exploration, et ainsi procurer une sensation glissante à l'utilisateur. Sur cette surface est collé le revêtement décrit précédemment.

### **c. Instruments**

Le système constitué du transducteur de Langevin et du disque recouvert de la surface rainurée (Fig. 2.8 a) est dissimulé dans une boîte parallélépipédique ( $30 \times 30 \times 60$  cm). La boîte comporte une ouverture circulaire en façade et un repose-poignet en mousse confortable (Fig. 2.8 b). Tous les branchements électriques sont dissimulés. Un petit rideau placé à l'intérieur de la boîte permet de réduire le champ de son ouverture afin d'éviter que le sujet n'obtienne des informations visuelles sur l'actionneur.

### **d. Sujets**

Cette expérience a été menée avec un panel de dix étudiants volontaires droitiers (7 hommes, 3 femmes) âgés de 23 à 30 ans. Les sujets sont choisis de telle sorte qu'ils soient naïfs sur

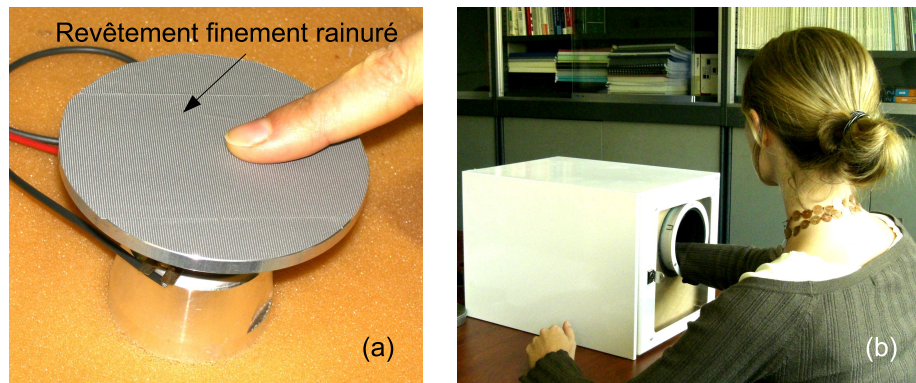


FIG. 2.8 – (a) Transducteur de Langevin sur lequel est collé un disque en aluminium. Le disque est recouvert par une surface finement rainurée. (b) Posture du sujet pendant l'expérience.

la conception du dispositif 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 et de laver et d'essuyer leur main avant de commencer l'expérience.

#### e. Protocole expérimental

Chaque sujet s'assoit devant la table où est disposée la boîte, y insère sa main horizontalement et amène son coude juste devant l'ouverture. Nous lui demandons aussi de maintenir un angle d'environ  $45^\circ$  entre son doigt et la surface à explorer. Par ailleurs, nous préconisons à tout participant 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, en accord avec les études récentes de Lederman et al. [LHKH04] (voir §a.).

Pour obtenir le cas à  $0^\circ$  (Fig. 2.2 b), nous plaçons le disque de telle sorte que les rainures de la texture soient orientées dans la direction orthogonale à la longueur de la boîte, et on demande au sujet de former une ligne droite par un mouvement de recul du doigt pour découvrir la surface présentée. Pour obtenir le cas à  $90^\circ$  (Fig. 2.2 c), nous appliquons au disque une rotation sur lui-même de telle sorte que les rainures de la texture soient parallèles à la longueur de la boîte, et on demande au sujet de former une ligne droite par un mouvement de droite à gauche du doigt.

L'expérience sera menée en trois étapes :

1/ Premièrement, nous vérifions si les sujets sont vraiment capables de discriminer les différences de rugosité entre la surface au repos et la surface vibrante, de façon à préciser de manière

sémantique la sensation relevée par Watanabe et al. Dans cette expérience, on demande au sujet de déplacer son doigt avec un mouvement de recul pour le cas à  $0^\circ$ . Pour cet essai, nous employons quatre surfaces virtuelles qui correspondent à quatre amplitudes (crête-crête) de vibrations :  $0 \mu\text{m}$ ,  $0.32 \mu\text{m}$ ,  $1.18 \mu\text{m}$ , et  $2.2 \mu\text{m}$ . Les stimuli sont présentés au sujet suivant deux phases : dans un premier temps (phase 1), nous diminuons l’amplitude de vibration pas à pas, puis dans un deuxième temps, nous l’augmentons (phase 2). Afin de mettre des mots sur ses sensations, nous demandons au sujet ce qu’il estime avoir perdu au cours de la phase 1 et au cours de la phase 2. Par ailleurs, nous lui expliquons que des adjectifs plutôt que des noms d’objets sont particulièrement désirés. Une fois le mot énoncé par le sujet, nous l’invitons à en écrire une définition, suivie d’un exemple de la vie de tous les jours permettant de se souvenir de la texture.

2/ Deuxièmement, nous cherchons à déterminer les seuils de détection de la rugosité pour les deux angles relatifs entre les rainures. Ainsi, dans les cas à  $0^\circ$  puis à  $90^\circ$ , le sujet commence par explorer la surface virtuelle la plus glissante, i.e. la surface avec la plus grande amplitude de vibration, puis nous réduisons petit à petit l’amplitude de vibration. Nous expliquons au sujet qu’il percevra une sensation rugueuse à partir d’un certain moment. La question qui lui est posée est la suivante : Percevez-vous la rugosité ? Une fois que le sujet a répondu ”oui” pour deux pas d’amplitude successifs, nous notons l’amplitude moyenne entre les deux valeurs correspondantes.

3/ Pour finir, la dernière expérience consiste à quantifier les sensations grâce à une procédure d’estimation de la rugosité. Nous prenons en compte deux facteurs : l’amplitude de vibration du disque et l’orientation relative des rainures. Six stimuli ont été sélectionnés afin d’examiner l’influence de l’amplitude de vibration sur la rugosité perçue (Tableau 2.3). Pour ce test, nous

Numéro de la surface virtuelle	Amplitude de vibration du disque ( $\mu\text{m}_{\text{crête-crête}}$ )
N°1	0
N°2	0.74
N°3	1.12
N°4	1.47
N°5	1.70
N°6	2.05

TAB. 2.3 – Amplitude de vibration du disque mesurée au vibromètre LASER.

aurions pu choisir davantage de stimuli, cependant le nombre de six à été retenu de sorte à éviter

une éventuelle adaptation vibrotactile [HBW01]. D'autre part, afin d'améliorer la procédure d'estimation d'intensité, les textures sont d'abord présentées aux sujets 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-mêmes l'échelle de notation qui leur convient le mieux sur l'ensemble, pour ne pas biaiser le processus d'objectivité 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 ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ), les sujets évaluent la rugosité des surfaces virtuelles et attribuent une note comprise dans les limites de leur échelle. Les surfaces virtuelles sont présentées aux sujets de manière aléatoire.

#### f. Résultats et analyse

**Expérience préliminaire : description sémantique de l'échelle de sensations :** Durant la première phase, c'est-à-dire lorsque l'amplitude de vibration décroît, la réponse de chaque sujet à la question : "Quelle sensation a été enlevée ?" est, pour tous les sujets, le caractère glissant ou lisse. Dans la deuxième phase, c'est-à-dire lorsque l'amplitude de vibration croît, la réponse à la même question diffère suivant les sujets, qui donnent jusqu'à trois descripteurs pour décrire leur sensation : 7 réponses étaient relatives au frottement puisque 2 sujets ont utilisé le mot "frottant" et 5 sujets ont utilisé le mot "résistant" pour décrire ce qui avait été "enlevé", 2 réponses "crénelé" et "strié" étaient en rapport avec le relief et 4 sujets ont utilisé les mots "rugueux" ou "rêche". La classification de ses deux adjectifs est cependant moins évidente puisqu'ils font intervenir les deux dimensions de jugement (relief et frottement), conformément à [TK06] et [HBKY00]. Nous avons donc demandé à ces sujets si c'est la dimension de relief ou de frottement qui définit le mieux les mots "rugueux" ou "rêche" pour nous aider dans le classement de leur réponse.

Les résultats sont résumés dans le tableau 2.4. Ils montrent que la dimension de jugement relative au frottement a d'avantage d'importance que celle du relief pour le test de notre revêtement rainuré.

D'autre part, si nous regardons la définition qu'ils donnent à leurs adjectifs, les sujets se sont orientés vers des descriptions qui visent à expliquer ce qui se passe sous leur pulpe de doigt pendant l'exploration. Cinq sujets notent que leur pulpe de doigt est compressée, puis étirée suivant la direction du mouvement, d'autres remarquent une résistance au mouvement. Toutes sortes d'objets ont été comparés à la surface texturée : du contreplaqué non poli, de la tapisserie, du blue-jean ou encore des grips antidérapants.

	Termes relatifs au frottement	Termes relatifs au relief
Pourcentage des réponses	70%	30%
Quelques exemples d'adjectifs	frottant, résistant rugueux	strié, crénelé rêche

TAB. 2.4 – Résultats de l'expérience préliminaire

Pour finir, comme il a été mentionné précédemment, nous devons choisir les termes qui caractérisent le mieux l'échelle de sensation perçue avec notre dispositif. Pour cela nous avons réuni un petit groupe "d'experts" du laboratoire pour décider du descripteur sémantique final. Les termes "frottant et "résistant" ont été éliminés car ils peuvent aussi décrire une surface lisse. Nous avons donc choisi le terme "rugueux" accompagné de la description suivante : "une surface qui étire localement la peau et qui peut être comparée à un grip par exemple". Cette description sémantique complète sera donc reprise dans les deux prochaines expériences pour définir l'échelle des sensations perçues par chaque sujet.

**Seuil de détection de la rugosité :** Les figures 2.9 et 2.10 représentent la fréquence des réponses cumulées du seuil de détection de la rugosité (suivant la définition que nous venons de donner), pour l'ensemble des participants, en fonction de l'amplitude de vibration du disque. On rappelle que la fréquence vibratoire est égale à 40.67 kHz. Pour des angles relatifs entre les rainures de la texture et les empreintes de  $0^\circ$  et de  $90^\circ$ , les seuils de détection de la rugosité à 75 % sont respectivement de  $1.9 \mu\text{m}$  et de  $1.7 \mu\text{m}$ .

Ceci veut dire que dans 75% des cas, les sujets ressentent la rugosité en dessous des seuils donnés par les courbes ( $T1=1.9 \mu\text{m}$  et  $T2=1.7 \mu\text{m}$ ).

En considérant les hypothèses de la Fig. 2.7, nous devrions avoir le même seuil de détection de la rugosité ( $T1=T2$ ) si les empreintes digitales ne jouaient aucun rôle dans la perception de la rugosité. Or comme nous le présentons, ce n'est pas le cas, puisque  $T1$  est supérieur à  $T2$ , montrant ainsi qu'il est moins nécessaire de diminuer l'amplitude de vibration pour ressentir la rugosité, dans le cas où la surface rainurée est reconnue très commensurable avec les rainures d'empreintes.

Par conséquent, on peut dès lors se demander si cet effet est dû à l'anisotropie des rainures d'empreintes. Nous allons donc tenter de répondre à cette question dans l'expérience suivante.



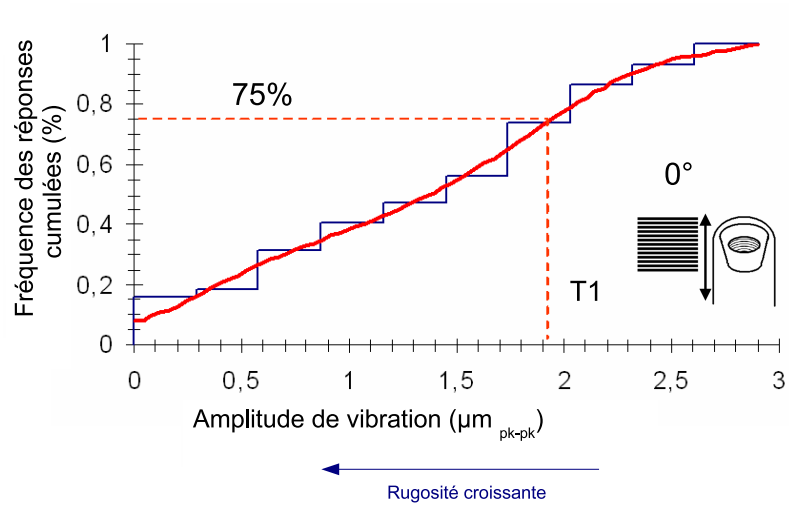


FIG. 2.9 – Fréquence des réponses en fonction de l’amplitude de vibration du disque, dans le cas où les empreintes sont parallèles aux rainures d’empreintes.

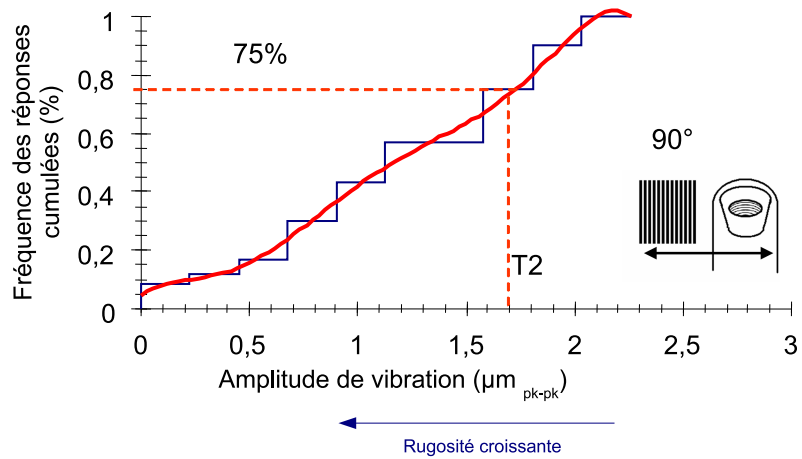


FIG. 2.10 – Fréquence des réponses en fonction de l’amplitude de vibration du disque, dans le cas où les empreintes sont orthogonales aux rainures d’empreintes.

**Caractérisation du niveau d'anisotropie :** Dans cette expérience, puisque les sujets ont chacun utilisé leur propre échelle de perception pour évaluer la rugosité, nous avons ramené l'ensemble des échelles sur 100. La figure 2.11 présente les distributions des estimations moyennes

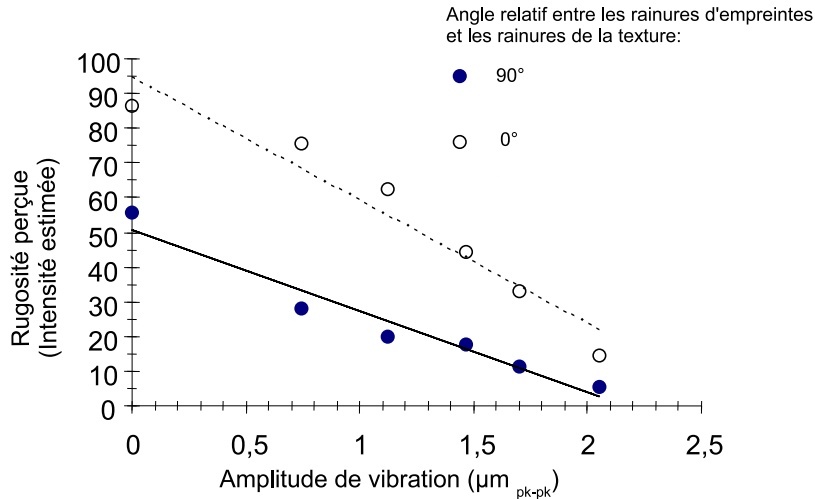


FIG. 2.11 – Intensité moyenne de la rugosité perçue en fonction de l'amplitude de vibration du disque.

en fonction de l'amplitude de vibration de la surface virtuelle donnée Tab. 2.3 avec laquelle a été exploré le dispositif. Une analyse de variance intra sujets<sup>3</sup> (ANOVA within subject) confirme un effet statistique significatif de l'orientation relative entre les crêtes de textures et celles de l'empreinte digitale pour les deux séries de données  $\{0^\circ, 90^\circ\}$ ,  $F_{0.95}(1, 118) = 14.86$ ,  $p < 0.0002$ <sup>4</sup>.

### g. Discussion et conclusion

En premier lieu, les résultats témoignent, conformément aux résultats de Watanabe et al. [WF95], que la sensation tactile provoquée par le phénomène de lubrification est fortement liée à l'amplitude de vibration. De plus, nous remarquons que la série de données représentant l'intensité moyenne de rugosité perçue (Fig. 2.11) peut être approchée par une fonction linéaire. Ce résultat est très appréciable pour la suite de notre travail car il va nous permettre de contrôler

<sup>3</sup>Contrairement à ce que pourrait laisser penser son nom, l'analyse de la variance n'est pas une méthode qui permet d'étudier les différences de variances entre populations, mais une méthode pour étudier les différences de moyenne entre populations. Cette méthode, néanmoins, doit son nom au fait qu'elle utilise des mesures de variance afin de déterminer le caractère significatif, ou non, des différences de moyenne mesurées sur les populations.

<sup>4</sup>Le test du F de Fisher est utilisé. Etant donné que la probabilité associée au F est dans ce cas inférieure à 0.0002, cela signifie que l'on prend un risque inférieure à 0.02% en concluant que la variable explicative apporte une quantité d'information significative au modèle.

aisément les sensations perçues par les utilisateurs.

D'autre part, dans des conditions où nous avons les mêmes déformations globales imposées sur la peau ainsi que les mêmes intensité et fréquence de vibration mais des angles relatifs entre les rainures d'empreintes et de la texture différents (Fig. 2.7), nous avons vérifié qu'une plus grande amplitude de vibration est nécessaire dans le cas à  $0^\circ$  que dans le cas à  $90^\circ$  pour obtenir la même intensité de rugosité. Ceci montre que la direction du mouvement, relativement à l'orientation des rainures de la texture, influe sur le phénomène de lubrification. Aussi, ces expériences ont fourni la preuve d'une privation sensorielle anisotropique du frottement appuyant l'hypothèse de l'importance de la commensurabilité et des forces de cisaillement associées. L'arrangement spatial est donc très important lors du processus de frottement sur la surface.

Dans cette partie, nous avons cherché à caractériser le concept de modification de la perception de la rugosité d'une surface. Nous avons commencé par concevoir un actionneur capable de modifier de manière électroactive le frottement apparent entre un doigt et une surface. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser un transducteur de Langevin du commerce sur lequel nous avons collé un disque en aluminium. Sous certaines conditions, ce disque vibre à son tour et engendre une sensation de glissement sous le doigt. Ce dispositif a ensuite été évalué au moyen de plusieurs expériences psychophysiques. Ces expériences nous ont permis de quantifier la sensation perçue et de démontrer que l'orientation relative des rainures d'empreintes et de la texture influe sur le coefficient de frottement perçu. Par ailleurs, nous avons démontré que la perception de la rugosité est réglable par l'amplitude de vibration. Cette propriété de perception sensorielle peut être utilisée pour créer de nouveaux types de stimulateurs tactiles.

## **2.3 Stimulation globale par modification spatio-temporelle des efforts de cisaillement sur la pulpe du doigt**

L'exemple de stimulation tactile présenté précédemment permet de leurrer l'utilisateur puisqu'il change la perception qu'il se fait d'une surface. L'expérience est d'autant plus réaliste qu'elle s'effectue doigt libre, dans des conditions de toucher actif. Nous notons alors que cette stimulation est globale, à des fréquences et des amplitudes qui sont bien au-delà de la bande passante des mécanorécepteurs. La richesse temporelle des stimuli, à l'origine de la perception

de la rugosité, est donc uniquement due à l'interaction doigt-surface, interaction qu'il n'est pas question de définir ici, mais dont on peut dire qu'elle est paramétrée par l'amplitude des vibrations. La texture de la surface que l'on touche influence donc fortement la stimulation "in fine", et l'ensemble des rugosités qu'il sera possible de simuler.

La question que nous nous posons dans cette partie revient à se demander si nous sommes capables de reproduire cette richesse spatiale indépendamment du revêtement initial de la surface d'exploration. L'intérêt est évident : pouvoir simuler des surfaces de rugosité paramétrable. C'est le problème dual du précédent car nous verrons qu'il est mis en oeuvre avec des moyens proches.

En outre, nous avons souligné la nécessité de prendre en compte l'aspect spatio-temporel de création des stimuli, pour qu'à chaque instant, l'utilisateur adapte la vitesse de son doigt pour garder une certaine constance dans la stimulation perçue. En retour, le stimulateur devra donc imposer une stimulation cohérente vis-à-vis de la texture simulée et des déplacements instantanés du doigt. Un bon moyen de réaliser cela est de synchroniser les stimuli sur la position de la pulpe du doigt. C'est pourquoi nous associons le stimulateur proprement dit à un dispositif qui mesure à tout instant la position du doigt.

Dans un premier temps, nous détaillerons le dispositif expérimental qui a rendu possible cette évaluation [BGLS06]. Puis, nous évaluerons la capacité de ce dispositif vibrant à haute fréquence pour simuler une texture [BGMLS06].

### 2.3.1 Dispositif expérimental de génération des stimuli

#### a. Stator vibrant

Pour des raisons de commodité, étant donné les recherches menées précédemment au L2EP [Gir02], nous avons choisi d'exploiter le stator d'un moteur piézoélectrique (MPE), le Shinsei USR 60 (Fig. 2.12 a), pour générer les stimulations vibratoires haute fréquence en surface. Ce dispositif présente l'avantage d'être beaucoup plus compact que le dispositif précédent tout en permettant lui aussi une exploration sans aucun danger pour l'utilisateur (Fig. 2.12 b). Le fonctionnement de ce stator est quelque peu différent de celui du dispositif précédent, puisque l'onde de flexion se propage à présent dans la direction orthoradiale. Elle est induite par des céramiques piézo-électriques collées sous le résonateur statorique, qui se contractent puis se dilatent. Dans les conditions "normales" de fonctionnement, le moteur est actionné par deux tensions d'alimentation en quadrature de phase, à une fréquence de résonance de 40 kHz. Deux

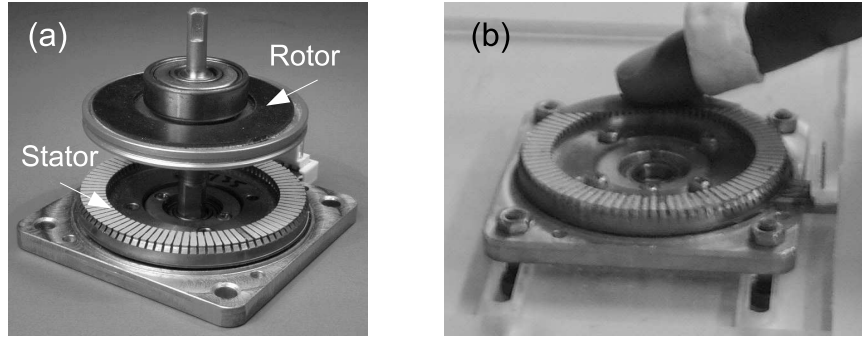


FIG. 2.12 – (a) Moteur piézoélectrique complet ouvert. (b) La surface d’exploration est constituée de la partie supérieure du stator.

ondes stationnaires en quadrature sont alors générées et créent une onde progressive, grâce à un positionnement approprié des céramiques et à leur polarisation initiale. Cependant, dans notre cas, nous détournons ce stator de son fonctionnement premier en n’alimentant qu’une seule phase. De cette façon, nous obtenons une onde stationnaire unique, d’amplitude maximale  $2 \mu\text{m}$  qui n’entraîne pas le doigt.

Lorsque l’amplitude de l’onde stationnaire est constante, la sensation perçue en déplaçant notre doigt sur le stator est analogue à ce que nous obtenons dans le cas du transducteur de Langevin et de sa plaque. En particulier, nous obtenons un effet très glissant à partir d’une hauteur d’onde de  $1.5 \mu\text{m}$ .

### b. Génération des stimuli

C’est l’alternance des zones glissantes (grande amplitude de vibration) et des zones bloquantes (faible amplitude de vibration) qui va créer l’illusion de toucher des surfaces texturées. Cependant, toute la surface d’exploration proposera la même sensation à un instant donné. De fait, seul le changement d’amplitude de vibration est capable de modifier le frottement perçu.

Les références d’amplitude d’onde sont synchronisées sur la position du doigt. Une transformation spatio-temporelle permet de contrôler les instants d’apparition des zones glissantes en fonction de la position du doigt. La figure 2.13 décrit le principe du contrôle de l’actionneur ainsi que sa représentation par Graphe Informationnel Causal (GIC) [Gir02]. Un exemple de loi programmée pour reconstituer une texture de période spatiale  $PS$  est donnée par l’expression de la référence d’amplitude d’onde  $W_{ref}$  :

$$W_{ref} = \frac{W_{\alpha}}{2} \left( 1 + \text{sign} \left( \frac{\sin 2\pi x}{PS} \right) \right) \quad (2.1)$$

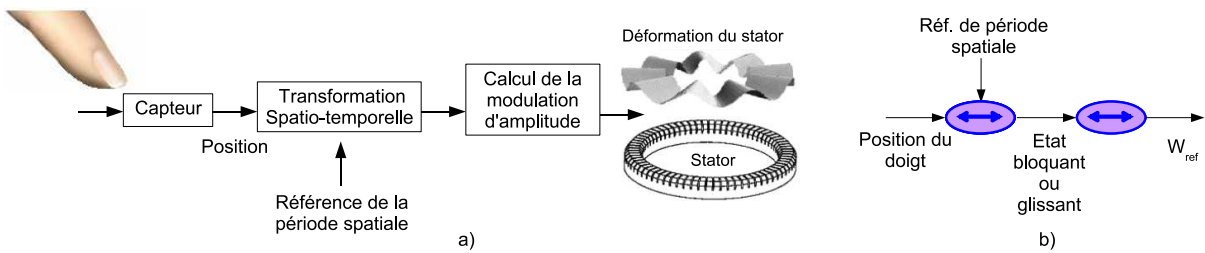


FIG. 2.13 – a) Principe de modulation de l’effet de lubrification, b) sa représentation par GIC.

avec  $W_\alpha$  une amplitude fixée et  $x$  la position du doigt.

La modulation d’amplitude est donc réalisée avec des signaux carrés parce que nous avons constaté que les signaux avec des changements brusques de pente sont plus faciles à percevoir que ceux avec des pentes douces.

Ceci se traduit par une modulation de l’amplitude de vibration de l’onde stationnaire qui provoque, par conséquent, une modulation de l’effet glissant. Cette variation temporelle du caractère frottant du dispositif amène l’utilisateur à toucher alternativement des zones glissantes et des zones bloquantes, ce qu’il interprète comme une texture.

Le dispositif expérimental constitué du stator du MPE et d’un capteur de position est représenté sur la Fig. 2.16. La connection entre le capteur et le doigt de l’utilisateur est réalisée au moyen d’une bague réglable. La liaison entre la bague et la tige du capteur est rigide de façon à éviter des écarts sur la position du doigt. L’utilisation d’un capteur linéaire à 1 degré de liberté impose un mouvement linéaire du doigt sur le stator, réduisant l’espace d’exploration à environ 4 cm. Toutefois, les mouvements d’avant en arrière sont permis.

Un amplificateur linéaire, dont on supposera qu’il est fidèle aux fréquences considérées aliement ce dispositif. Une fois connue l’amplitude de vibration à imposer sur le stator, une boucle d’asservissement de cette grandeur est nécessaire. En effet, les modélisations entreprises par [Gir02] pour un moteur Shinsei USR60 et [Pig05] plus spécifiquement pour un type d’actionneur à onde stationnaire, montrent que la relation reliant la tension d’alimentation à l’amplitude de vibration du stator n’est pas inversible directement car non-causale, puisqu’elle traduit l’accumulation d’énergies potentielle élastique et cinétique au sein du stator. Pour s’en rendre compte, nous donnons figure 2.14 la modélisation par GIC du stator du Shinsei USR60 dans le cas d’une onde stationnaire unique.

avec  $w_\alpha = W \cos(\omega t)$  l’amplitude instantanée de l’onde stationnaire.

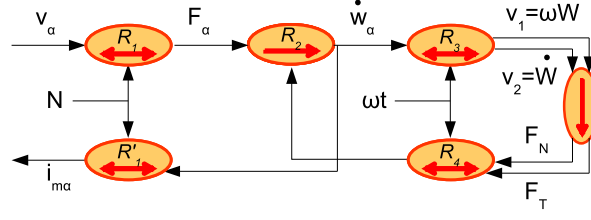


FIG. 2.14 – GIC du stator du Shinsei USR60 dans le cas d’une onde stationnaire unique.

Dans cette modélisation, l’environnement réagit à la propagation de l’onde stationnaire par un effort normal  $F_N$  et tangentiel  $F_T$  qui ne sont pas détaillés dans ce mémoire. On pourra considérer en première approximation que leur influence est négligeable puisque les efforts du doigt sont faibles.

$$R_1 : F_\alpha = NV_\alpha \quad (2.2)$$

$$R'_1 : i_{m\alpha} = N\dot{w}_\alpha \quad (2.3)$$

$$R_2 : \dot{w}_\alpha = \frac{1}{m} \int (F_\alpha - Cw_\alpha - d_s\dot{w}_\alpha - f_{r\alpha}) dt \quad (2.4)$$

avec  $N$ ,  $C$  et  $d_s$  des paramètres du stator et  $f_{r\alpha}$  la force de réaction modale.

$$R_3 : Re(\underline{\dot{W}}_\alpha e^{j\omega t}) \quad (2.5)$$

$$R_4 : Im(\underline{\dot{W}}_\alpha e^{j\omega t}) \quad (2.6)$$

Il est d’usage de maintenir l’amplitude des tensions d’alimentation constante et de faire varier la fréquence de celle-ci pour obtenir, compte tenu des processus de mise en résonance du stator, une amplitude d’onde réglable. Or, [Gir02] montre que la relation liant cette dernière à la fréquence n’est pas linéaire, dépend du point de repos, et que de plus, la température, qui modifie la fréquence de résonance, peut jouer un grand rôle dans les performances obtenues. C’est pourquoi, nous préférons asservir le stator dans un repère ”tournant” lié à l’onde stationnaire. Dans ce repère, la tension d’alimentation est transformée en une matrice d’angle  $\omega t$  et a pour affixe un vecteur  $\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix}$ . On montre alors que la relation liant  $v_q$  à  $w$  est linéaire, et qu’elle ne dépend plus de la pulsation de résonance, tandis que  $v_d$  sera ajustée pour conserver une amplitude de

la tension d'alimentation constante égale à  $v$  ( $v_d^2 + v_q^2 = v^2$ ). La structure de contrôle est ainsi donnée figure 2.15.

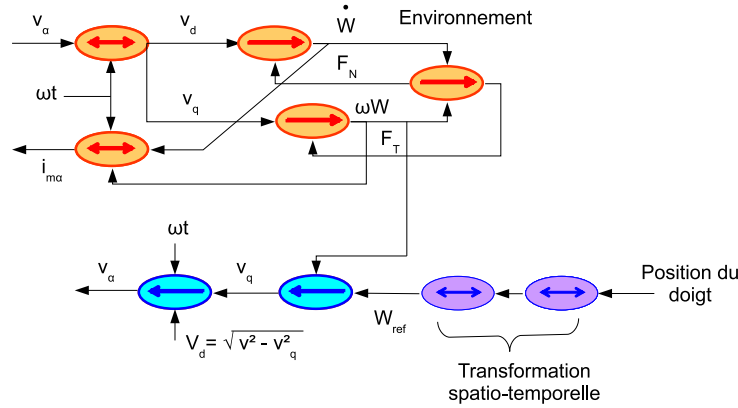


FIG. 2.15 – GIC de la structure de contrôle.

D'un point de vue pratique, l'inversion de la matrice de rotation, qui lie les tensions dans le repère  $d, q$  aux tensions dans le repère  $\alpha, \beta$ , peut être réalisée à partir d'un système à boucle à verrouillage de phase [Gir02] [Pig05].

Pour finir, signalons que, afin d'augmenter le caractère frottant du stator, nous y avons collé un adhésif assez bloquant, mais sans rainures, afin d'éviter les phénomènes d'anisotropie de la sensation, conformément à l'étude précédente.

Nous remarquons également que le choix du capteur à 1 ddl impose de reproduire des motifs qui sont aussi à 1 ddl. Néanmoins d'autres types de signaux de modulation peuvent être testés pour réaliser la modulation d'amplitude suivant ce principe, ce qui laisse envisager la simulation de différentes textures crantées.

### 2.3.2 Etude qualitative de la sensation

Nous avons constaté, en changeant la période spatiale simulée, qu'il était facile de reconnaître les textures finement rainurées des textures avec de larges crans. Cependant, on est en mesure de se demander si la période spatiale de la texture simulée est perçue de la même façon que la période spatiale d'une texture réelle. Nous allons donc comparer les périodes spatiales des textures simulées avec les périodes spatiales des textures réelles.

Pour savoir si les périodes spatiales simulées correspondent, au niveau de l'espacement, à des périodes spatiales réelles, il est plus prudent, pour commencer, de simuler des textures où



### 2.3. Stimulation globale par modification spatio-temporelle des efforts de cisaillement sur la pulpe du doigt

l'espacement entre rainures est supérieur à 1 mm (voir §b.), puisque nous savons qu'il est en général admis, pour des textures assez grossières, que la rugosité est perçue par un code spatial déterministe. En dessous de cette limite, pour une échelle spatiale comprise entre 1 et 200  $\mu\text{m}$ , le code de rugosité serait toujours lié à l'information spatiale mais sous une forme stochastique, ce qui complique l'interprétation de la perception de la période spatiale simulée.

**Sujets et matériel :** Dix étudiants naïfs âgés de 18 à 25 ans (7 hommes, 3 femmes) participent à l'expérience.

Dans toutes les conditions, tous les sujets, volontaires, portent un casque fermé. Ceci nous permet de masquer les indices de rugosité audibles qui sont produits par le frottement entre le doigt et la texture. Les textures crantées réelles sont des plaques imprimées de cuivre sur une seule face (Fig. 2.16 b), que l'on utilise habituellement pour concevoir des circuits électroniques. Elles sont gravées avec des motifs striés comme le montre la figure 2.16 b. L'épaisseur du cuivre ou la hauteur des crans est égale à 70  $\mu\text{m}$ . Les largeurs d'interespacement entre les crêtes et les creux des rainures sont égales ( $\text{GW}=\text{RW}$ ) et seule la période spatiale varie. Les périodes spatiales des cinq échantillons sont donc respectivement égales à 0.5, 1, 3, 7.5 et 13 mm.

Dans l'expérience, ces textures rainurées sont masquées dans une boîte et nous avons disposé sur les textures une plaque en aluminium avec une fenêtre d'ouverture rectangulaire mesurant 100 par 15 mm afin de contraindre le doigt à un mouvement rectiligne.

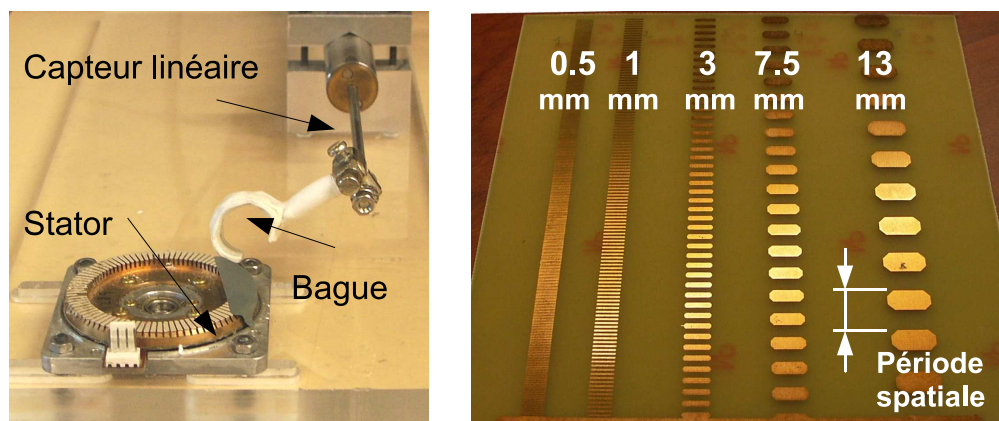


FIG. 2.16 – (a) Le dispositif test. (b) Les échantillons utilisés pour l'expérience de reconnaissance de la période spatiale.

**Protocole expérimental :** Avant de procéder à l'expérience, nous demandons aux sujets de se laver et de se sécher les mains. La tâche du sujet consiste dans un premier temps à mettre

son doigt dans la bague du capteur et à le déplacer le long de la surface du stator avec des mouvements d'avant en arrière pour découvrir la surface virtuelle. Dans un deuxième temps, le sujet insère sa main horizontalement dans la boîte pour comparer la période spatiale simulée avec les cinq échantillons réels. Le sujet doit amener son coude juste devant l'ouverture et nous lui expliquons qu'il doit former une ligne droite par un mouvement d'avant en arrière du doigt pour découvrir les surfaces présentées dans l'ouverture rectangulaire.

De plus, afin d'améliorer la procédure de reconnaissance de la période spatiale, les cinq textures virtuelles, puis les cinq échantillons réels, ont été présentés au sujet de manière aléatoire avant de réaliser le test. Après cette phase préliminaire, le sujet doit alors décider quelle surface réelle ressemble le plus, du moins pour son espacement entre les rainures, à la surface virtuelle présentée de manière aléatoire.

**Résultats :** Les résultats de l'expérience sont présentés dans le tableau 2.5. A partir de ces résultats, nous pouvons dire que les sujets sont capables de distinguer clairement des périodes spatiales "virtuelles" comprises entre 3 et 13 mm. Pour des périodes spatiales plus petites, la ressemblance entre les périodes spatiales réelles et virtuelles paraît nettement moins claire. En particulier, pour la plus petite période spatiale virtuelle (0.5 mm), la majorité des sujets a choisi l'échantillon réel de 1 mm.

Période spatiale des échantillons réels	Période spatiale simulée				
	0.5 <i>mm</i>	1 <i>mm</i>	3 <i>mm</i>	7.5 <i>mm</i>	13 <i>mm</i>
0.5 <i>mm</i>	10%	10%	—	10%	—
1 <i>mm</i>	<b>80%</b>	40%	—	10%	—
3 <i>mm</i>	10%	<b>50%</b>	<b>60%</b>	—	—
7.5 <i>mm</i>	—	—	40%	<b>70%</b>	—
13 <i>mm</i>	—	—	—	10%	<b>100%</b>

TAB. 2.5 – Résultats d'évaluation : pourcentage des réponses.

**Discussion :** Cette expérience est une première évaluation qui nous montre que ce dispositif tactile à 1 degré de liberté est capable de produire plusieurs textures distinctes. Effectivement, différentes textures périodiques rainurées peuvent être simulées grâce à une modulation d'amplitude à basse fréquence en fonction de la vitesse du doigt de l'utilisateur. Cependant, même si ce

dispositif tactile est plus compact, plus léger et simule davantage de sensations comparativement au transducteur de Langevin utilisé dans [WF95], ce n'est encore qu'un dispositif à un degré de liberté et qui, en outre, ne permet qu'un mouvement très réduit de l'utilisateur. Ainsi, la gamme de textures que nous pouvons simuler est par conséquent limitée à cause du faible espace de travail dont nous disposons.

D'autre part, il existe un décalage des réponses pour les périodes spatiales comprises entre 0.5 mm et 1 mm. Ceci pourrait s'expliquer par la difficulté de comparer directement les périodes spatiales réelles et virtuelles, puisque des paramètres autres que la période spatiale rentrent en jeu dans la comparaison des textures (nature des matériaux, forme des frontières entre le dépôt de cuivre et la plaque...). Rappelons aussi dans ce cas précis, que le code de rugosité est lié à l'information spatiale sous une forme stochastique, ce qui rend encore plus difficile la comparaison entre textures réelles et virtuelles. Une interprétation de ce résultat pourrait être que les sujets sont en mesure de ressentir des petites striations de la surface virtuelle alors qu'ils ne peuvent les ressentir sur la texture réelle correspondante, puisque la période spatiale réelle de 0.5 mm n'est plus discernable au toucher.

## 2.4 Conclusion

Nous avons caractérisé dans ce chapitre l'effet tactile glissant, qui résulte d'une vibration ultrasonique (Haute fréquence supérieure à 20 kHz).

Dans une première partie, nous avons quantifié cet effet grâce à un système constitué d'un transducteur de Langevin sur lequel est collé un disque. Les expériences menées sur ce dispositif ont aussi permis de démontrer que l'orientation relative des rainures d'empreintes et de la texture influe sur le coefficient de frottement perçu.

Dans une deuxième partie, nous avons pris en compte l'aspect spatio-temporel du mouvement pour moduler la sensation glissante en fonction de la position du doigt de l'utilisateur. Pour réaliser ce contrôle, nous avons choisi d'utiliser le stator d'un MPE associé à un capteur linéaire de position. L'utilisation du moteur nous permet de bénéficier d'un faible encombrement ainsi que d'une amplitude d'onde suffisante pour obtenir l'effet glissant. L'alternance entre des sensations glissantes et frottantes nous a permis de simuler des textures virtuelles périodiques. La comparaison entre les périodes spatiales virtuelles et réelles nous a donné des résultats encourageants. Toutefois le faible espace d'exploration de ce dispositif semble être un facteur limitant pour la

perception des textures. Dans le chapitre suivant, nous allons donc nous attacher à concevoir un dispositif, compact et de plus grande taille, capable de générer l'effet glissant.

## Chapitre 3

# Conception du dispositif tactile

### Sommaire

---

<b>3.1 Etude préliminaire : choix d'un modèle d'interaction . . . . .</b>	<b>78</b>
3.1.1 Lubrification active . . . . .	78
3.1.2 Effet "squeeze film" . . . . .	86
<b>3.2 Détermination et spécification du cahier des charges . . . . .</b>	<b>96</b>
3.2.1 Contraintes ergonomiques . . . . .	96
3.2.2 Contraintes d'encombrement . . . . .	97
3.2.3 Conditions pour l'obtention de l'effet glissant . . . . .	97
3.2.4 Contrainte sur la tension d'alimentation . . . . .	98
3.2.5 Contrainte sur la tenue mécanique . . . . .	98
<b>3.3 Dimensionnement et réalisation du dispositif tactile . . . . .</b>	<b>98</b>
3.3.1 Etude analytique . . . . .	99
3.3.2 Etude numérique . . . . .	109
3.3.3 Réalisation du monomorphe . . . . .	113
<b>3.4 Evaluations expérimentales . . . . .</b>	<b>114</b>
3.4.1 Mesure de l'amplitude de vibration . . . . .	114
3.4.2 Analyse qualitative du caractère glissant . . . . .	115
<b>3.5 Conclusion . . . . .</b>	<b>116</b>

---

Dans ce chapitre, nous nous focaliserons sur la conception d'un dispositif capable de modifier le frottement perçu par l'utilisateur. Nous avons vu dans le chapitre précédent que l'introduction d'une vibration dans le plan de contact permet de modifier les conditions de contact entre le

doigt et la surface explorée. Cependant, nous n'avons pas mis en évidence le principe physique à l'origine de la sensation perçue, étape indispensable avant la conception d'un dispositif qui exploitera cet effet. Ainsi, dans une première partie, nous allons confronter deux modèles d'interaction qui pourraient expliquer la variation du coefficient de frottement entre un doigt et une surface oscillante. Cette étude préliminaire nous orientera vers le choix d'un modèle que nous développerons et appliquerons dans une deuxième partie au contact doigt-surface. Forts de ces résultats, nous élaborerons dans une troisième partie un cahier des charges basé sur le principe précédemment décrit et adapté aux conditions d'exploration des utilisateurs dans le cadre du toucher dynamique. Pour finir, nous présenterons une méthode de dimensionnement du dispositif tactile ainsi que sa réalisation [BGLSre].

### 3.1 Etude préliminaire : choix d'un modèle d'interaction

Nous avons constaté que deux modèles physiques coexistent pour expliquer la diminution du coefficient de frottement induit par une plaque oscillante pour une gamme d'amplitude de vibration de quelques micromètres et pour des fréquences de quelques dizaines de kilohertz. Le premier effet est appelé "lubrification active" [Gar06]. Lorsqu'il y a introduction de vibrations dans le contact, cet effet caractérise la perte d'adhérence occasionnée par un contact intermittent entre deux surfaces.

Le deuxième effet, dû à la création d'un coussin d'air entre deux surfaces, est appelé "effet squeeze film" [Wie00]. Cet effet est créé par des vibrations rapides entre deux surfaces superposées dans la direction normale à l'une et à l'autre. Il se traduit par des cycles périodiques de compression et de décompression provoqués par les vibrations du fluide piégé entre les deux surfaces.

Dans cette partie, notre but n'est pas de mener une étude théorique poussée de ces deux effets. Nous allons plutôt nous intéresser aux conditions d'obtention de chacun des effets, afin de nous orienter vers l'un ou l'autre pour le dimensionnement d'un dispositif tactile capable de produire un effet glissant sous le doigt de l'utilisateur.

#### 3.1.1 Lubrification active

##### a. Introduction au modèle d'intermittence de contact

Lorsque deux solides sont en contact, une vibration sinusoïdale provoque des efforts sinusoïdaux dynamiques qui se superposent à la charge normale statique. Si la vibration est suf-

fisamment forte, le contact entre les deux solides peut se rompre, donnant lieu à un contact intermittent. Il est donc possible de réduire temporairement la valeur du chargement dynamique et d'amorcer un glissement. Lorsque ces phénomènes transitoires sont importants au regard de la période de vibration, le frottement apparent entre les deux solides est inférieur au frottement en condition non excitée. Ce phénomène est aussi appelé lubrification active. Le réglage de la durée relative du contact permet alors l'ajustement dynamique du coefficient de frottement global [Gar06] [Pig05] [GPR<sup>+</sup>07].

### b. Application au contact empreintes digitales-surface plane

Pour modéliser le contact, la théorie de Hertz est une approche intéressante dans le cadre des moteurs piézoélectriques rotatifs. Effectivement, ceux-ci présentent un contact du type sphère-plan, comme par exemple, les moteurs à rotation de mode [Gar06]. Cependant lorsque le contact est proche d'un contact surfaces discrètes-plan, comme ici dans le cas du contact empreintes-surface, il devient difficile d'approcher l'une des surfaces par une sphère de rayon de courbure équivalent afin d'y appliquer la théorie de Hertz. Une interprétation par système masse-ressort pourra alors satisfaire la description non-linéaire du problème.

**Introduction au modèle masse-ressort :** Le mouvement relatif de deux pièces en contact peut être explicité selon deux composantes : la composante tangentielle qui comprend des séquences d'adhérence-glissement [McM97], tandis que la composante normale peut entraîner un contact intermittent. Cette approche selon [YCM98] réduite à deux dimensions, identifie l'interface de contact à un système masse-ressort que nous allons détailler dans les paragraphes suivants.

Le schéma mécanique équivalent qui permettra de définir les relations dynamiques du système est représenté sur la figure 3.1. Le doigt est uniquement représenté par sa partie en contact avec la plaque : les empreintes digitales. Une empreinte digitale (crête épidermique) est décomposée en une élasticité normale  $k_n$  et tangentielle  $k_t$ . On impose à la structure le déplacement  $w(t)$  généré par la vibration de la plaque.

**Axe normal :** Pour décrire le comportement du système doigt-surface selon l'axe normal, nous allons chercher à décrire le mouvement des empreintes digitales selon  $z$  (Fig. 3.2). Nous considérerons la plaque parfaitement rigide pour que les empreintes soient les seuls éléments

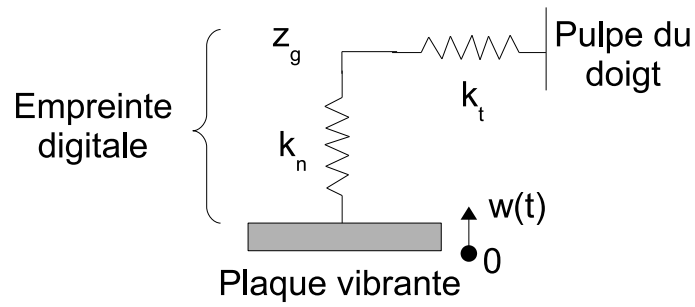


FIG. 3.1 – Schéma mécanique équivalent.

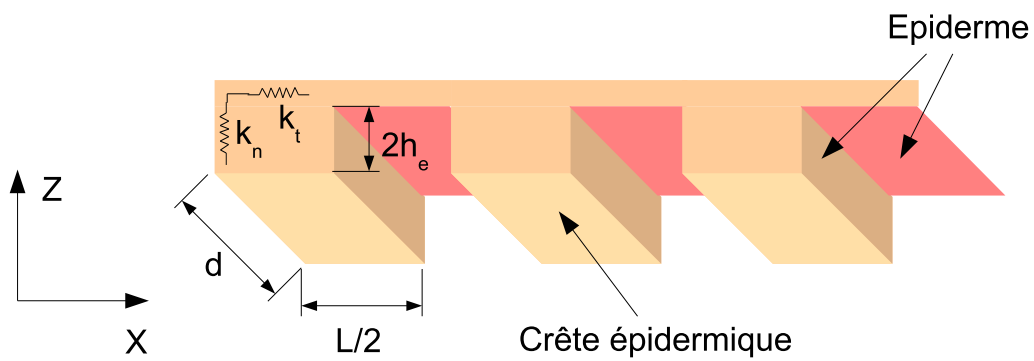


FIG. 3.2 – Schéma simplifié des empreintes digitales (plaque vibrante non représentée).



accumulateurs d'énergie potentielle élastique. Ainsi, lorsque la plaque ne vibre pas, les empreintes subissent un effort normal imposé par le doigt ( $F_n$ ) et se compressent sur une distance  $z_g = 2h_e - \Delta z$  par rapport au plan de référence,  $z_g$  étant l'ordonnée de la base de l'empreinte. La mise en vibration de la plaque impose un déplacement sinusoïdal  $w(t)$  de la crête des empreintes digitales, d'amplitude  $h_{vib}$ . Si le déplacement est suffisamment important pour que la distance  $z_g + h_{vib}$  soit supérieure à la hauteur naturelle de l'empreinte relâchée, alors il y a séparation des deux éléments. Les critères de changement d'état contact-séparation peuvent être interprétés selon les déplacements tels que [Pig05],

$$\begin{aligned} \text{si } (z_g + h_{vib}) \leq 2h_e & \quad \text{l'empreinte est en contact,} \\ \text{si } (z_g + h_{vib}) > 2h_e \text{ et } w(t) < 0 & \quad \text{l'empreinte est séparée de la plaque.} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Nous pouvons donc donner une contrainte sur l'amplitude  $h_{vib}$  pour qu'il y ait séparation :

$$h_{vib} > \Delta z = W_0 \quad (3.2)$$

A partir de l'Eq. 3.1, on peut écrire l'effort de réaction normale instantané en négligeant le coefficient d'amortissement sur la compression,

$$\begin{aligned} R_n(t) &= k_n(\Delta z + w(t)) \quad \text{lors du contact,} \\ R_n(t) &= 0 \quad \text{pendant la séparation.} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Cette modélisation doit considérer une variation de la constante élastique  $k_n$  en fonction de l'effort normal imposé par le doigt, puisque l'approximation du contact ne prend pas en compte l'influence de l'écrasement des crêtes épidermiques sur la plaque. Il est donc nécessaire d'approcher ce phénomène par une variation du coefficient élastique  $k_n = f(F_n)$  [MJF00].

**Axe tangentiel :** Selon l'axe tangentiel, trois cas sont à considérer :

- la phase de décollement pendant laquelle il n'y pas de contact et donc  $R_t = 0$ ,
- la phase d'adhérence, qui a généralement lieu juste après la phase de décollement. Durant cette phase, les crêtes épidermiques sont cisailées entre la plaque et la pulpe du doigt. On admettra alors que :

$$R_t(t) = k_t \Delta x = F_t(t) \quad (3.4)$$

avec  $F_t$  l'effort lié au cisaillement,  $k_t$  le coefficient d'élasticité tangentiel et  $\Delta x$  l'allongement tangentiel (Fig. 3.3).

- Enfin, lorsque la force tangentielle est trop importante, l'extrémité des crêtes épidermiques glisse sur la plaque. C'est donc une phase de glissement qui apparaît, caractérisée par le coefficient de frottement  $\mu$ . On a alors :

$$R_t(t) = -\text{sign}(v_{gliss})\mu R_n(t) \quad (3.5)$$

avec  $v_{gliss}$  la vitesse de glissement de l'extrémité d'une crête épidermique et  $\mu$  le coefficient de frottement dynamique appliqué à l'axe tangentiel.

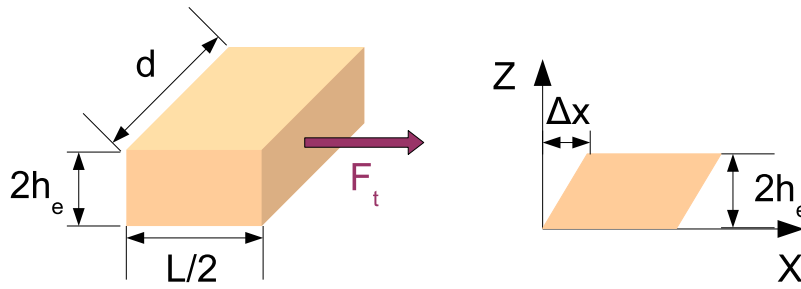


FIG. 3.3 – Déformation en cisaillement d'une crête épidermique.

Pour de très petits déplacements relatifs entre les crêtes épidermiques et le bâti, la zone de contact présente en réalité des zones d'adhérence et de glissement partielles. Ce phénomène sera pris en compte en modifiant la valeur de  $\mu$ , qui devient  $\mu(t)$ , approché par une fonction linéaire croissante, liée à la raideur tangentielle du contact (glissement partiel), puis une fonction constante à partir d'une valeur limite de déplacement ( $\delta_{critique}$ ) pour laquelle le glissement est total [Gar06].

Le déplacement critique  $\delta_{critique}$  délimitant la zone de glissement partiel est obtenu par la relation [Gar06] [Pig05] :

$$\delta_{critique} = \mu_0 C R_n = \mu_0 \frac{R_n}{k_t} \quad (3.6)$$

avec  $C$  la compliance tangentielle (m/N) et  $\mu_0$  le coefficient de frottement maximal à l'interface crête-substrat ( $\mu_0 = 1$ , valeur moyenne donnée par [MKY98]).

L'effort de frottement tangentiel pour les empreintes digitales devient alors :

$$R_t(t) = \mu(t).R_n(t) \quad (3.7)$$

avec la variation de  $\mu$  selon les instants de mise en contact ( $t_c$ ) et de séparation ( $t_s$ ) (Fig. 3.4) :

$$\begin{aligned}
 \mu(t) &= \frac{\mu_0}{\delta_{critique}} \cdot \delta(t) & \text{si } t_c < t < t_s \text{ et } \delta(t) \leq \delta_{critique} & \text{(glissement partiel)} \\
 \mu(t) &= \mu_0 & \text{si } t_c < t < t_s \text{ et } \delta(t) > \delta_{critique} & \text{(glissement total)} \\
 \mu(t) &= 0 & \text{si } t_s < t < t_c + T & \text{(décollement)}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

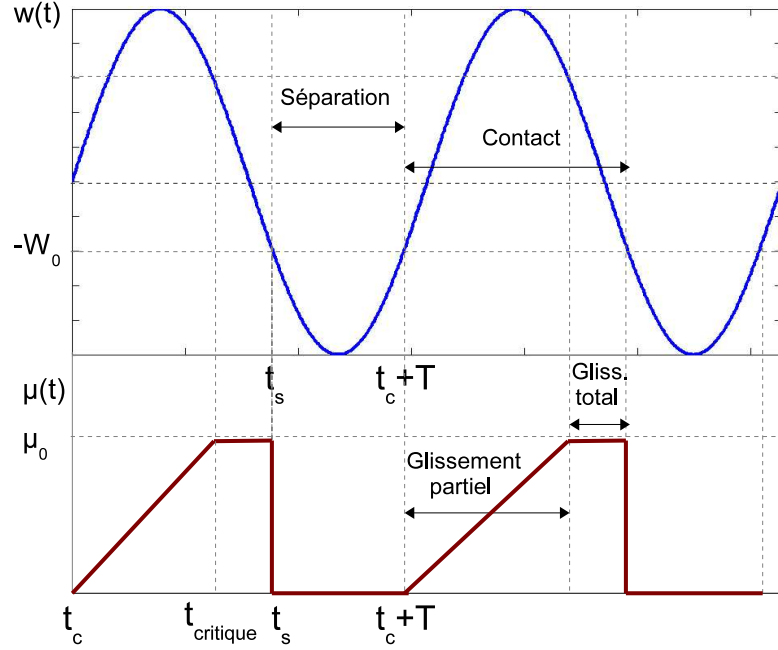


FIG. 3.4 – Evolution du coefficient de frottement variable  $\mu(t)$  en fonction du temps pour une amplitude d'onde  $w > W_0$  et pour une fréquence  $f > f_c$ .

avec  $\delta(t)$  le déplacement relatif lié à la vitesse imposée par l'utilisateur  $V_t(t)$  tel que :

$$\delta(t) = \int_{t_c}^t V_t(t) dt \quad \text{si } t_c < t < t_s \tag{3.9}$$

Ainsi, pour qu'il y ait une évolution du contact en glissement partiel avec un taux de glissement partiel élevé, on constate qu'il ne faut pas une vitesse  $V_t(t)$  trop élevée. Ceci signifie que la courbe de glissement doit être inférieure à la courbe de glissement critique [Gar06]. Cette condition se traduit par :

$$\frac{d}{dt} (\delta_{critique}(t)) > \frac{d}{dt} (\delta(t)) \tag{3.10}$$

Nous pouvons donc donner une contrainte sur la fréquence  $f$  :

$$f > \frac{V_t}{\delta_{critique}} = f_c \tag{3.11}$$

où  $f_c$  est la fréquence critique selon la vitesse relative.

**c. Possibilités de création d'un frottement variable :**

A partir de l'analyse sur l'axe normal et l'axe tangentiel, nous pouvons déduire une condition sur l'amplitude de vibration de la plaque (Eq. 3.2) et une condition sur la fréquence (Eq. 3.11) pour être dans la zone de lubrification active. Ainsi, pour une fréquence  $f > f_c$ , il y aura une évolution du contact en glissement partiel avec un taux de glissement partiel élevé, et pour une amplitude  $w > W_0$ , il y aura décollement des surfaces (Fig. 3.4). Nous allons appliquer le modèle que nous venons d'écrire aux empreintes digitales qui sont modélisées en rainures de section rectangulaire pour simplifier l'étude. Nous utiliserons les paramètres des empreintes digitales et du doigt en exploration recueillis dans la littérature [MKY98] [Mar06a]. Ces paramètres sont résumés dans le tableau 3.1.

<b>Paramètres du doigt en exploration</b> (voir Tab. 1.2)		
Aire de contact du doigt	$A$	1 [cm <sup>2</sup> ]
Force normale imposée par le doigt	$F_n$	0.6 [N]
Vitesse imposée par l'utilisateur	$V_t$	8.8 [cm.s <sup>-1</sup> ]
<b>Paramètres des empreintes digitales</b> [MKY98]		
Aire de contact des empreintes digitales	$A/2$	0.5 [cm <sup>2</sup> ]
Module de Young de l'épiderme	$E_e$	1.36 [10 <sup>5</sup> Pa]
Coefficient de Poisson de l'épiderme	$\nu_e$	0.48
Période spatiale des empreintes	$L$	350 [ $\mu$ m]
Hauteur des crêtes épidermiques	$2h_e$	100 [ $\mu$ m]

TAB. 3.1 – Paramètres de l'étude.

La force normale imposée par le doigt peut être écrite de la manière suivante :

$$F_n = k_n \cdot \Delta z \quad \text{et} \quad k_n = \frac{E_e \cdot A/2}{2h_e} \quad (3.12)$$

avec  $k_n$  le coefficient de rigidité normale et  $E_e$ ,  $A$  définis dans le Tab. 3.1.

Nous obtenons ainsi l'amplitude de vibration de la plaque à partir de laquelle il y aura décollement  $W_0$  :

$$W_0 = \Delta z = \frac{F_n}{k_n} = \frac{4F_n h_e}{E_e A} \quad (3.13)$$

De même, la force tangentielle de cisaillement peut être écrite :

$$F_t = k_t \cdot \Delta x \quad \text{et} \quad k_t = \frac{G_e \cdot A/2}{2h_e} \quad (3.14)$$

avec  $k_t$  le coefficient de rigidité tangentielle et  $G_e$  le module d'élasticité transversale ou module de Coulomb. Dans le cas d'un milieu isotrope, le module de cisaillement est lié au module d'Young et au coefficient de Poisson par la relation suivante :  $G_e = \frac{E_e}{2(1+\nu_e)}$

Ainsi, nous obtenons le déplacement critique en fonction des paramètres connus de l'étude :

$$\delta_{critique} = \frac{\mu_0 \cdot F_n}{k_t} = \frac{4\mu_0 \cdot F_n h_e}{G_e A} \quad (3.15)$$

Finalement, ces résultats donnent avec nos valeurs numériques  $W_0 = 8.8 \mu m$  et  $\delta_{critique} = 26 \mu m$ . De plus, avec l'équation 3.11, nous pouvons déduire la fréquence critique :  $f_c = 3.38 kHz$ .

Étant données les approximations faites pour réaliser cette étude, nos résultats sont discutables sur la fréquence critique ainsi que sur l'amplitude de vibration. En comparant nos conditions d'obtention de l'effet glissant avec celles obtenues expérimentalement par Watanabe et al. (voir chapitre 2) (Fig. 3.5), nous ne pouvons pas conclure à première vue sur l'efficacité du phénomène de lubrification active. Aussi, à l'issue de cette étude théorique, nous avons tenté

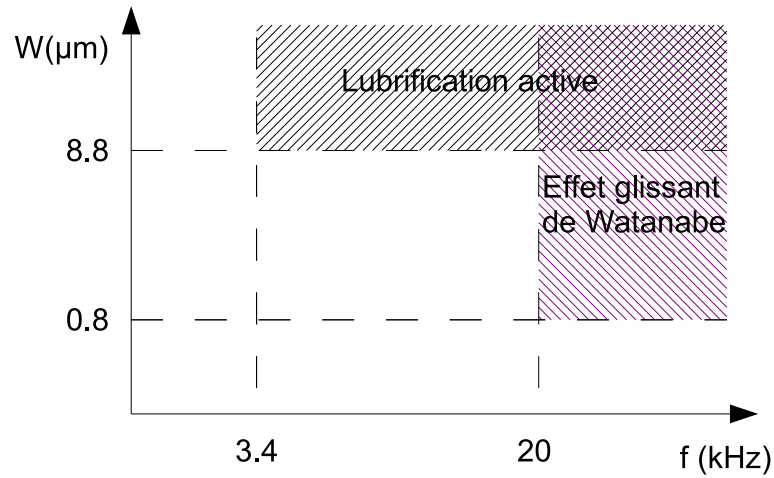


FIG. 3.5 – Graphique amplitude-fréquence délimitant les zones d'obtention de la lubrification active et de l'effet obtenu par Watanabe [WF95].

de caractériser cet effet de manière pragmatique pour des fréquences inférieures au domaine ultrasonique ( $f < 20 kHz$ ). Nous avons pour cela utilisé un pot vibrant magnétique (Modèle V406, Ling Dynamic Systems LTD, Royston, UK) qui permet d'obtenir des déplacements de 2 à 20 mm pour une gamme de fréquences de 5 à 13 kHz. Sur ce pot vibrant, nous avons fixé une plaque en aluminium. Nous avons demandé à cinq personnes d'évaluer le caractère glissant de

la plaque sur l'ensemble de la gamme de fréquence offerte par le pot vibrant magnétique. Les résultats montrent qu'aucune des personnes n'a trouvé la plaque glissante.

Si cette expérience ne permet pas de conclure pour des fréquences de l'ordre de 40 kHz, nous n'envisagerons cependant pas le phénomène de lubrification active comme le phénomène prédominant pour expliquer l'effet glissant ; c'est pourquoi nous allons à présent nous intéresser aux conditions d'obtention de l'effet "squeeze film".

### 3.1.2 Effet "squeeze film"

L'effet "squeeze film" est un phénomène de lubrification sans contact qui relève de la dynamique des fluides. Ce phénomène se produit lorsqu'une des surfaces en contact vibre très rapidement. Il se crée alors dans l'espace séparant les deux surfaces une surpression par rapport à l'environnement extérieur. Contrairement à la lubrification à air statique, la lubrification par effet "squeeze film" ne requière pas de compresseur extérieur et est par conséquent plus spécifiquement dédiée aux systèmes où les contraintes d'encombrement sont très restrictives [Wie00]. Cet effet peut être caractérisé en utilisant des actionneurs soit magnétiques [E.O64] soit piézo-électriques [PB67].

#### a. Principe de fonctionnement

Avec la lubrification par effet squeeze film, il est possible de créer un coussin d'air induit par des vibrations normales aux deux surfaces en contact (Fig. 3.6). Dans le cas où le fluide (ici l'air)

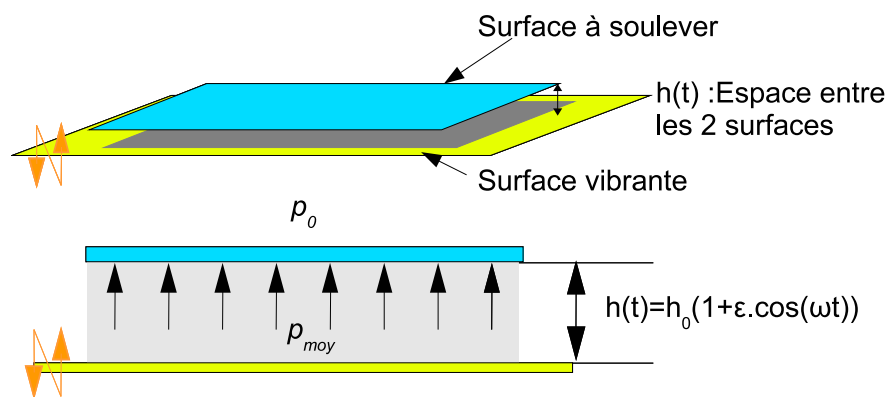


FIG. 3.6 – Schéma représentatif de 2 surfaces en contact soumises à des vibrations rapides.

piégé entre les deux surfaces est compressible, il (le fluide) subit alors des cycles de compression

et de décompression engendrés par la variation de volume. Si de surcroît la plaque vibrante est actionnée de manière sinusoïdale, l'espace entre les deux surfaces, aussi appelé épaisseur du film, variera aussi de manière sinusoïdale. Cependant, la variation de la pression correspondante variera elle de manière non-harmonique à cause de la non-linéarité de la relation de conservation de la masse pour un gaz parfait (Fig. 3.7) :

$$p.V^n \sim p.h^n = cste \quad (3.16)$$

avec  $p$  la pression,  $V$  le volume d'air piégé entre les deux surfaces,  $h$  l'épaisseur du film et  $n$  la constante polytropique ( $n = 1$  pour une transformation isotherme,  $n = 1.4$  pour une transformation adiabatique).

Cette non-linéarité entraîne une distorsion entre l'épaisseur du film imposée et la pression

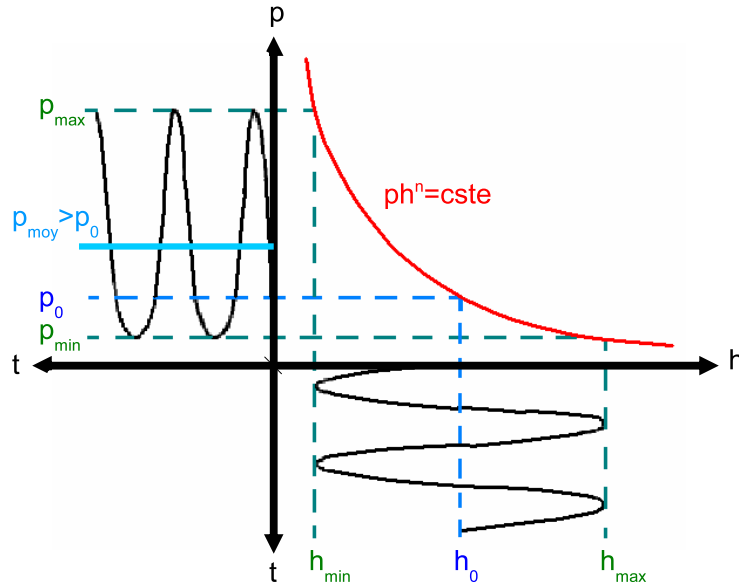


FIG. 3.7 – La variation sinusoïdale de l'épaisseur du film,  $h(t)$ , entraîne une variation non-harmonique de la pression (d'après [Wie00]).

résultante entre les deux surfaces. En conséquence, la pression moyenne  $p_{moy}$  sera supérieure à la pression correspondant à l'épaisseur moyenne du film  $p_0$  (Fig. 3.7).

Nous noterons toutefois que cette modélisation n'est correcte que si les deux surfaces considérées sont rigides et suffisamment grandes pour pouvoir négliger les effets de bord.

**b. Effet "squeeze film" entre une surface vibrante et un doigt**

Le but de cette partie est de calculer la surpression entre un doigt et une plaque vibrant très rapidement. Ceci nous permettra de trouver les conditions sous lesquelles la surpression entre les deux surfaces induira une variation du coefficient de frottement entre le doigt et la plaque. Dans notre calcul, nous prendrons en compte les propriétés géométriques des empreintes digitales, puisque nous ne pouvons pas supposer que les ondulations des empreintes digitales sont négligeables au regard de la rugosité de la plaque vibrante. De fait, la rugosité moyenne de la plaque ne dépasse pas quelques micromètres alors que les ordres de grandeur de la hauteur des crêtes épidermiques ( $2h_e$ ) et de leur période spatiale ( $L$ ) sont respectivement  $100 \mu\text{m}$  et  $350 \mu\text{m}$  [MKY98] (Fig. 3.8).

**Modèle de l'effet "squeeze film" :** Nous présenterons ici un modèle de l'effet "squeeze film", qui fut premièrement décrit par [E.O64] et [PB67], mais dans le cas particulier d'un doigt en regard d'un objet plan vibrant. Nous allons ainsi considérer l'épaisseur du film d'air entre le bout du doigt et un objet plan vibrant. Nous nous appuyons en particulier sur une étude développée par [Wie00] mais qui prendra en compte l'ondulation des empreintes digitales.

Pour simplifier l'étude, nous avons choisi de modéliser, le bout du doigt en une surface ondulée tout en supposant que la plaque vibrante oscille de manière sinusoïdale dans la direction verticale suivant l'axe  $z$  (Fig. 3.8). Ceci sous entend aussi que nous considérons les empreintes digitales indéformables. Cette hypothèse est justifiable a posteriori dans la mesure où nous allons travailler avec des fréquences ultrasonores.

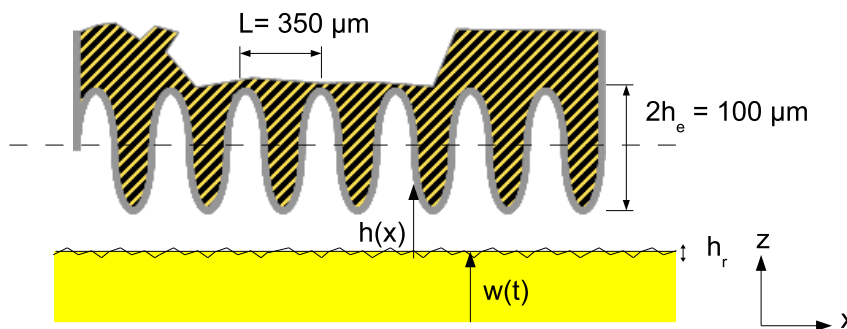


FIG. 3.8 – Approximation du profil du bout du doigt lorsque les empreintes digitales sont prises en compte.

Dans ces conditions, l'épaisseur du film,  $h$ , qui dépend de la position  $x$  et du temps considérés est donc une fonction de l'amplitude des oscillations,  $h_{vib}$ , à laquelle nous ajouterons les irrégularités



de la surface de la plaque, c'est-à-dire la rugosité  $h_r$  (en fait, nous prendrons la rugosité moyenne  $R_a$ ). Comme nous l'avons précisé, il faudra aussi prendre en compte l'amplitude des ondulations des empreintes digitales,  $h_e$ . Par conséquent, l'épaisseur du film est donnée par [WF95] :

$$h(x, t) = h_r + h_{vib} [1 + \cos(\omega t)] + h_e \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{L} x \right) \right] \quad (3.17)$$

où la pulsation de vibration de la plaque est donnée par  $\omega$ .

Par souci de commodité, nous normalisons cette relation, qui devient :

$$H = 1 + \epsilon \cos(T) + \delta \cos(kX) \quad (3.18)$$

avec  $h_0 = h_{vib} + h_r$ ,

$$H = \frac{h}{h_0 + h_e}, \quad X = \frac{x}{l_0}, \quad T = \omega t,$$

$$\epsilon = \frac{h_{vib}}{h_0 + h_e}, \quad \delta = \frac{h_e}{h_0 + h_e}, \quad k = \frac{2\pi l_0}{L}$$

et  $l_0$  la longueur en contact avec le bout du doigt.

Afin de déterminer la surpression générée par l'effet "squeeze film", nous faisons les hypothèses suivantes [Wie00] :

- Le comportement du fluide correspond à un écoulement visqueux laminaire,
- Le fluide est un gaz parfait compressible,
- Les effets d'inertie de l'écoulement sont négligeables,
- Le mouvement latéral relatif est nul.

Ces conditions permettent d'obtenir l'équation de Navier-Stock à une dimension. Cette équation, transformée grâce aux relations de continuité et des gaz parfaits, nous permet de trouver l'équation de Reynolds régissant notre fluide sous sa forme adimensionnelle :

$$\nabla(H^3 P^{1/n} \cdot \nabla(P)) = \sigma \frac{\partial(P^{1/n} H)}{\partial T} \quad (3.19)$$

où  $n$  est la constante polytropicque,  $\nabla$  l'opérateur divergence et

$$P = \frac{p}{p_0}, \quad \sigma = \frac{12\eta\omega l_0^2}{p_0(h_0 + h_e)^2} \quad (3.20)$$

$p$ ,  $p_0$  et  $\eta$  représentent alors respectivement la pression entre la plaque et le doigt, la pression atmosphérique et la viscosité dynamique du fluide. Le "squeeze number" est donné par  $\sigma$ . Il représente en quelque sorte une mesure de la compressibilité du fluide dans l'espace. Pour des

”squeeze numbers” petits, le fluide est considéré comme incompressible, alors que pour de grands ”squeeze numbers”, le fluide est piégé dans l’espace entre le doigt et la surface et se comporte comme un ressort.

De plus, nous supposerons que la compression du fluide est une transformation isotherme ( $n = 1$ ). Cette hypothèse est raisonnable puisque le film d’air est très fin et que sa capacité thermique est faible en comparaison de celle des surfaces vibrantes.

Pour la suite de l’étude, nous substituerons  $PH$  par  $\Psi$  afin de simplifier le terme de dérivation par rapport au temps.

Ainsi, en régime permanent, l’intégration sur une période donne [Wie00] :

$$\nabla \left[ \frac{1}{2} \bar{H} \nabla (\Psi_\infty^2) - \Psi_\infty^2 \nabla (\bar{H}) \right] = 0 \quad (3.21)$$

où  $\Psi_\infty$  exprime  $\Psi$  à l’intérieur de l’espace quand  $\sigma \rightarrow \infty$  et où  $\bar{H}$  représente l’épaisseur moyenne normalisée du film donnée par :

$$\bar{H} = 1 + \delta \cos(kX) \quad (3.22)$$

Nous noterons toutefois que la résolution de l’équation précédente (Eq. 3.21) ne sera valable que tant que la valeur de  $\sigma$  est considérée comme très grande. Dans le cas contraire, une faible valeur de  $\sigma$  impliquerait une solution beaucoup plus complexe.

**Solution analytique :** L’équation 3.21 nous donne la relation qui existe entre l’épaisseur du film normalisée et la pression normalisée pour un comportement du fluide agissant ”comme un ressort”. Trouver la pression revient donc à résoudre l’équation différentielle suivante :

$$\frac{1}{2} [1 + \delta \cos(kX)] \frac{d\Psi_\infty^2}{dX} + \Psi_\infty^2 k \delta \sin(kX) = K \quad (3.23)$$

résoudre l’Eq. 3.23 sans second membre est équivalent à résoudre :

$$\frac{d\Psi_\infty^2}{\Psi_\infty^2} = -2 \frac{\delta k \sin(kX)}{1 + \delta \cos(kX)} dX \quad (3.24)$$

ce qui donne après intégration de l’Eq. 3.24 :

$$\Psi_1^2 = K_1(X) [1 + \delta \cos(kX)]^2 \quad (3.25)$$

Après avoir réinjecté  $\Psi_1^2(X)$  dans l’Eq. 3.23, on trouve :

$$\frac{dK_1(X)}{dX} = \frac{2K}{[1 + \delta \cos(kX)]^3} \quad (3.26)$$

Par ailleurs, puisque la fonction  $\Psi_\infty$  est le produit de deux fonctions paires (H et P) d'après l'Eq. 3.16 et l'Eq. 3.18 :  $\Psi_\infty^2(X) = \Psi_\infty^2(-X)$  et  $\frac{d\Psi_\infty^2(X)}{dX} = -\frac{d\Psi_\infty^2(-X)}{dX}$ .

Ainsi, en remplaçant X par -X dans l'Eq. 3.23, nous obtenons :

$$\frac{1}{2} [1 + \delta \cos(kX)] \frac{d\Psi_\infty^2}{dX} + \Psi_\infty^2 k \delta \sin(kX) = -K \quad (3.27)$$

ce qui implique que  $K = 0$ , que  $K_1'(X) = 0$  et donc que  $K_1$  est une constante.

Pour finir, la solution de notre équation différentielle est :

$$\Psi_\infty^2 = K_1 [1 + \delta \cos(kX)]^2 \quad (3.28)$$

Les conditions limites en  $X = \pm \frac{1}{2}$  relativement à  $\Psi_\infty^2(X)$ , notées  $\Psi_{\infty B}$  sont :

$$\Psi_{\infty B}^2 \left( -\frac{1}{2} \right) = \Psi_{\infty B}^2 \left( \frac{1}{2} \right) = K_1 \left[ 1 + \delta \cos \left( \frac{k}{2} \right) \right]^2 \quad (3.29)$$

En remplaçant  $K_1$  par son expression dans l'Eq. 3.28, nous obtenons :

$$\Psi_\infty = \Psi_{\infty B} \left( \frac{1}{2} \right) \frac{|1 + \delta \cos(kX)|}{|1 + \delta \cos(\frac{k}{2})|} \quad (3.30)$$

A ce niveau, afin de trouver  $\Psi_{\infty B}$  en fonction des paramètres connus, nous allons concentrer notre attention sur les frontières du domaine étudié.

En considérant que  $p_0$  est une constante par rapport au temps et que  $\Psi_{\infty B}$  est égal à  $\Psi_\infty$ ,  $\lim_{X \rightarrow 1/2^+} \Psi_\infty^2 = p_0^2 H_B^2$  et à partir de l'Eq. 3.19, nous obtenons [Wie00] :

$$\begin{aligned} \Psi_{\infty B}^2 \left( \frac{1}{2} \right) &= p_0^2 \frac{\int_T^{T+2\pi} H_B^3 dT}{\int_T^{T+2\pi} H_B dT} \\ &= p_0^2 \frac{\int_T^{T+2\pi} [1 + \epsilon \cos(T) + \delta \cos(\frac{k}{2})]^3 dT}{\int_T^{T+2\pi} [1 + \epsilon \cos(T) + \delta \cos(\frac{k}{2})] dT} \\ &= p_0^2 \left[ 1 + \delta \cos \left( \frac{k}{2} \right) \right] \left[ 1 + \frac{3}{2} \frac{\epsilon^2}{[\delta \cos(\frac{k}{2})]^2} \right] \end{aligned} \quad (3.31)$$

D'où, en remplaçant  $\Psi_{\infty B}$  par son expression dans l'Eq. 3.30, nous avons :

$$\begin{aligned} P_\infty &= \frac{\Psi_\infty}{H} \\ &= p_0 \frac{(1 + \delta \cos(kX)) \sqrt{(1 + \delta \cos(\frac{k}{2}))^2 + \frac{3}{2} \epsilon^2}}{(1 + \delta \cos(\frac{k}{2}))(1 + \epsilon \cos(T) + \delta \cos(kX))} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Nous rappelons que  $P_\infty$  est ici la pression normalisée dans l'espace entre le doigt et la plaque pour une valeur infinie du "squeeze number"  $\sigma$ .

La pression moyenne est alors donnée par :

$$\overline{P_\infty} = p_0 \frac{(1 + \delta \cos(kX)) \sqrt{(1 + \delta \cos(\frac{k}{2}))^2 + \frac{3}{2}\epsilon^2}}{(1 + \delta \cos(\frac{k}{2})) \sqrt{(1 + \delta \cos(kX))^2 - \epsilon^2}} \quad (3.33)$$

De plus, en intégrant sur la position et sur le temps, nous pouvons exprimer la force moyenne adimensionnelle exercée par l'effet "squeeze film" sur le doigt,  $F_s$ , par unité de longueur en régime permanent :

$$\begin{aligned} F_s &= \int_T \int_X (P_\infty - 1) dX dT \\ &= \frac{1}{2\Pi} \int_0^{2\Pi} \left( \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (P_\infty - 1) dX \right) dT \end{aligned} \quad (3.34)$$

**Résultats du modèle :** Dans un premier temps, nous avons vu, pour prédéterminer analytiquement la surpression qui s'exerce sur le bout du doigt, que la condition suivante devait être respectée :  $\sigma \rightarrow \infty$ . Cependant, il est en général admis, que cette condition peut être restreinte à  $\sigma > 10$  [E.O64]. Ensuite, nous savons d'après l'Eq. 3.20 que  $\sigma$  dépend de la fréquence de vibration. Nous allons donc calculer à partir de quelle fréquence  $\sigma > 10$ .

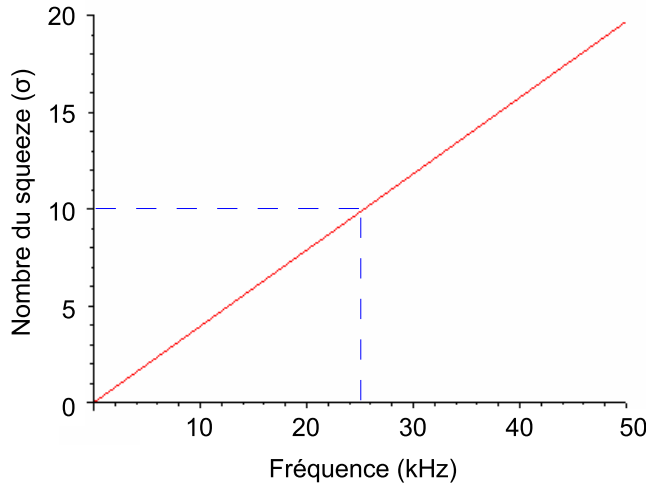


FIG. 3.9 – "Squeeze number" en fonction de la fréquence de vibration de la plaque pour  $h_r = 1.6\mu\text{m}$  et  $h_{vib} = 3\mu\text{m}$ .

Afin de ne pas obtenir une limite trop basse en fréquence, nous allons nous placer dans le

cas le plus défavorable, c'est-à-dire dans le cas de la plus petite pente de la droite représentant  $\sigma = g(f)$  (état de surface et amplitude vibratoire maximaux d'après les données du tableau 3.2 :  $h_r = 1.6 \mu\text{m}$  et  $h_{vib} = 3 \mu\text{m}$ ). Les résultats (Fig. 3.9) nous permettent de déterminer le premier critère sur la fréquence de vibration ( $f > 25 \text{ kHz}$ ), qui à son tour nous permet d'utiliser l'équation 3.21.

Dès lors, en employant les paramètres du Tab. 3.2, nous pouvons tracer le profil de la pression en fonction de la longueur de contact en utilisant l'Eq. 3.32. Conformément aux résultats précédents, nous avons fixé la fréquence des oscillations de la plaque à 40 kHz de façon à dépasser 25 kHz.

Amplitude des crêtes épidermiques	$h_e$	50 [ $\mu\text{m}$ ]
Période des empreintes	$L$	350 [ $\mu\text{m}$ ]
Rugosités moyennes de la plaque choisies pour différents cas de simulations	$h_r$	0.4 - 0.8 1.2 - 1.6 [ $\mu\text{m}$ ]
Longueur au contact	$l_0$	1 [cm]
Force normale appliquée par le doigt	$F_f$	0.3 $\rightarrow$ 0.7 [N]
Viscosité dynamique de l'air (at 20°C)	$\eta$	$1.85 \cdot 10^{-5}$ [Pa.s]
Pression atmosphérique	$p_0$	0.1 [MPa]

TAB. 3.2 – Liste des paramètres

Les résultats de simulation sont représentés sur la Fig. 3.10. Sur la partie supérieure de la Fig. 3.10, une partie du bout du doigt en contact avec la plaque vibrante a été modélisée par une sinusoïde d'amplitude 50  $\mu\text{m}$  et de période spatiale 350  $\mu\text{m}$ , de façon à prendre en compte les empreintes digitales. L'intervalle entre le zéro et l'extrémité inférieure de la sinusoïde illustre la rugosité moyenne ainsi que l'amplitude de vibration de la plaque. Quant à la partie inférieure de la Fig. 3.10, elle montre l'évolution de la moyenne temporelle de la pression normalisée en fonction de la position sur la longueur en contact (axe  $X$ ). Nous remarquons sur cette figure que les pics de pression sont localisés là où la peau du doigt est la plus proche de la plaque vibrante, c'est-à-dire aux sommets des crêtes épidermiques, alors que pour les creux des crêtes, la pression s'apparente à la pression atmosphérique.

Sur cette même figure, nous avons aussi représenté  $P_f$ , la pression moyenne normalisée im-

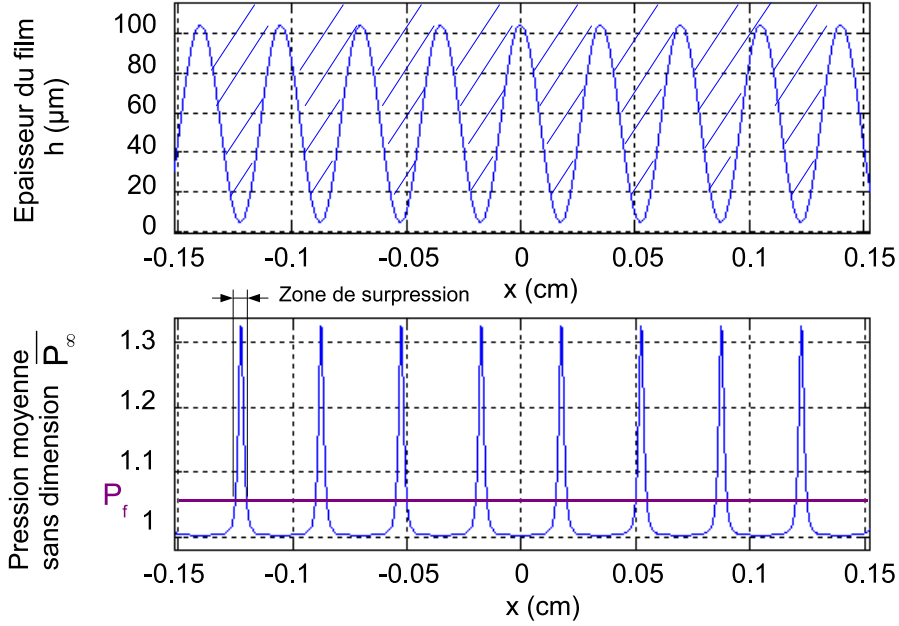


FIG. 3.10 – Épaisseur du film à un instant donné et profil spatial de la pression moyenne temporelle sous le doigt ( $h_r = 1.6 \mu\text{m}$ ,  $h_{vib} = 3 \mu\text{m}$ )

posée par le doigt pendant une tâche d'exploration :

$$P_f = 1 + \frac{F_f}{l_0^2 p_0} \quad (3.35)$$

avec  $F_f$  la force normale de contact appliquée par une personne qui explore la surface.

Nous avons choisi de prendre pour la suite des calculs,  $F_f = 0.5 \text{ N}$  comme force normale moyenne, en accord avec [WF95, SGH02] et §a..

Nous pouvons constater, d'après la Fig. 3.10, qu'il y a plusieurs zones le long de la surface de contact où la pression exercée par l'effet "squeeze film" est supérieure à la pression du doigt. Ces zones sont donc celles où l'empreinte digitale n'est pas en contact avec la plaque vibrante. Ainsi, ces petites zones peuvent donner lieu à un changement de coefficient de frottement relatif  $\frac{\mu'}{\mu}$  entre le doigt et la surface de la plaque, qui peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\frac{\mu'}{\mu} = 1 - \frac{F_s}{F_f} \quad (3.36)$$

A partir des hypothèses de calcul que nous avons effectuées précédemment, cette équation montre physiquement l'affaiblissement du coefficient de frottement relatif, pour un état de surface de la plaque vibrante donné, quand la force engendrée par l'effet "squeeze film" apparaît.

Par ailleurs, afin d'illustrer les variations du coefficient de frottement, nous avons simulé  $\frac{\mu'}{\mu}$  pour quatre états de surfaces différents (Tab. 3.2).

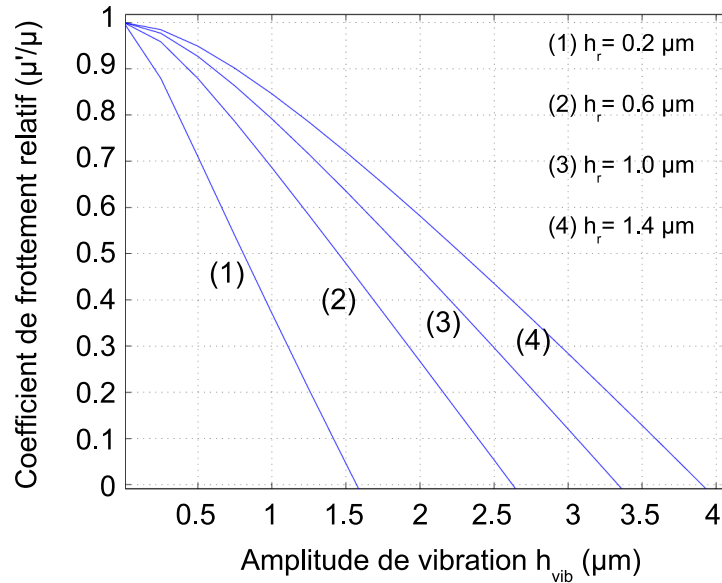


FIG. 3.11 – Le coefficient de frottement relatif en fonction de l'amplitude de vibration pour  $F_f = 0.5 \text{ N}$ , pour les quatre valeurs de  $h_r$  (Tab. 3.2) et pour  $f = 40 \text{ kHz}$ .

Les résultats (Fig. 3.11) montrent la forte dépendance du coefficient de frottement relatif en fonction de l'état de surface et de l'amplitude de vibration de la plaque.

Nous venons de voir qu'il est assez aisé de calculer avec cette méthode le coefficient de frottement relatif en prenant en compte les empreintes digitales. Cependant, nos résultats sont plus pessimistes que ceux annoncés par Watanabe et al. [WF95] (cf chapitre 2). En effet, pour une rugosité moyenne de la plaque de quelques micromètres (ce qui est réaliste d'un point de vue réalisation), une amplitude de vibration de la plaque supérieure à  $4 \mu\text{m}$  serait nécessaire pour atteindre un coefficient de frottement relatif nul, soit beaucoup plus que le résultat de  $1 \mu\text{m}$  indiqué dans [WF95]. Ces auteurs considèrent le doigt comme lisse avec une rugosité moyenne, il semble donc que cet écart s'explique par la prise en compte de la géométrie des empreintes dans notre cas.

En conclusion de cette étude, et moyennant certaines hypothèses (grande rigidité des empreintes à fréquence ultrasonore, air considéré comme un gaz parfait compressible, écoulement laminaire...), nous avons donc vérifié avec un modèle doigt-plaque vibrante qu'il était possible

d'obtenir l'effet "squeeze film". Cet effet peut être responsable de la sensation glissante (ou l'effet de lubrification) perçue par l'utilisateur lorsqu'il touche des surfaces vibrant à haute fréquence. Pour un état de surface donné de la plaque, il est donc possible de faire varier le coefficient de frottement relatif doigt-surface en fonction de l'amplitude de vibration (Fig. 3.11), comme nous l'avons démontré expérimentalement dans le chapitre 2 (voir §2.2.5). Nous noterons cependant que le coefficient de frottement relatif est fortement dépendant de la force appliquée par l'utilisateur ( $F_f$ ). En particulier pour des efforts normaux importants, l'effet glissant sera imperceptible. Cependant, ceci sort des conditions du toucher exploratoire latéral.

## 3.2 Détermination et spécification du cahier des charges

L'objectif de cette partie est de déterminer les éléments du cahier des charges qui permettent de répondre aux contraintes ergonomiques et d'encombrement mais qui tiennent compte aussi des contraintes d'obtention de l'effet glissant.

### 3.2.1 Contraintes ergonomiques

Le dispositif tactile que nous allons concevoir devra présenter des dimensions utiles compatibles avec les mouvements de l'utilisateur. C'est pourquoi, la définition d'un espace de travail pour le toucher de textures est un point important à prendre en compte pour la conception de dispositifs permettant une exploration dans les conditions de toucher actif. Ainsi, lorsque l'utilisateur explore une texture fine, il est important que la surface en question soit perçue comme "infinie". Cependant, il a été observé par Klatzky et Lederman [LK87] que, pendant une tâche d'exploration "les doigts frottent avec des mouvements rapides de va-et-vient une petite partie de la surface" mise à disposition et que "l'intérieur de la surface est davantage explorée que les bords". Cette observation nous montre que la surface d'exploration est bornée. Martinot a donc mesuré ses dimensions moyennes (voir §a.) en collectant la position et la force normale exercée par le bout du doigt pendant que les sujets exploraient des surfaces finement texturées. Le résultat est que les mouvements des sujets de son expérience sont limités en moyenne à une surface comprise dans un rectangle de **45 mm** × **58 mm**. Ceci montre qu'en absence de la vision, une surface de cette dimension est suffisante pour donner l'impression d'une très large surface d'exploration.



### 3.2.2 Contraintes d'encombrement

Les conditions pour l'obtention d'une réduction de coefficient de frottement perçu imposent de travailler dans la gamme de fréquence ultrasonique. La première solution pour mettre en vibration une plaque dans cette gamme de fréquences consiste à utiliser un ou plusieurs transducteurs Langevin (voir §2.2.5) puisque la fréquence et les déplacements mis en jeu sont dans la gamme des actionneurs piézoélectriques [Nog96]. Cette solution, malgré son efficacité, s'avère toutefois assez encombrante et son utilisation en tant que dispositif tactile peu adéquate. Nous nous tournerons donc plutôt vers une deuxième solution qui permet d'actionner directement la plaque grâce à une matrice de céramiques piézoélectriques collées sur sa face inférieure qui fonctionneront en mode  $d_{31}$ . Le gain en terme d'encombrement est important puisque la matière piézoélectrique se trouve répartie sur la plaque elle-même plutôt qu'être localisée dans un actionneur unique. Par une alimentation judicieuse des céramiques, nous créons une onde de flexion qui se propagera le long de la plaque. Ce faisant, nous dégradons quelque peu le principe d'obtention de l'effet "squeeze film" puisque dans ce cas, la distance entre le doigt et la surface n'est pas constante à un instant donné. Nous vérifions cependant que l'amplitude de vibration reste dans une gamme acceptable et permet d'obtenir un  $\mu'/\mu$  suffisant pour percevoir un effet glissant.

### 3.2.3 Conditions pour l'obtention de l'effet glissant

Au regard des résultats présentés Fig. 3.11, il est possible de connaître l'amplitude de vibration nécessaire pour faire léviter le bout du doigt, c'est-à-dire l'amplitude pour laquelle le coefficient relatif de frottement est nul. Néanmoins, le but de notre interface tactile n'est pas de mettre le bout du doigt en lévitation, mais seulement de faire décroître le coefficient de frottement relatif entre le doigt et la plaque vibrante de manière significative pour induire une différence de perception chez l'utilisateur.

Si l'étude précédente nous a permis d'obtenir une condition sur la fréquence de vibration ( $f > 25$  kHz), nous ne sommes cependant pas en mesure de savoir pour quelle valeur du coefficient relatif de frottement  $\frac{\mu'}{\mu}$  la sensation de glissement est clairement perçue par l'utilisateur.

Nous ferons donc l'hypothèse qu'un  $\frac{\mu'}{\mu} = 0.5$  est suffisant pour obtenir cet effet. Cet ordre de grandeur a été vérifié sur le stator du moteur piézoélectrique étudié au chapitre 2. Le calcul du coefficient relatif de frottement est détaillé en Annexe A. Il a été fait en mode "dégradé", c'est-à-

dire qu'il prend en compte l'onde de flexion qui se propage dans la plaque. Il montre, pour une amplitude vibratoire égale à  $1.5 \mu\text{m}$ , amplitude où la sensation glissante a été clairement perçue, que  $\frac{\mu'}{\mu}$  est compris entre 0.64 et 0.78. Ainsi, nous pouvons donc supposer qu'en choisissant une valeur de  $\frac{\mu'}{\mu} \approx 0.5$ , nous nous donnons une marge de sécurité suffisante.

D'après la Fig. 3.11, cette condition impose donc d'avoir une amplitude de vibration de  $1.5 \mu\text{m}$  si la plaque a une rugosité de  $0.6 \mu\text{m}$ .

### 3.2.4 Contrainte sur la tension d'alimentation

Le choix de la tension de travail utilisée pour réaliser l'étude a été fait en fonction de la dangerosité potentielle de la tension alternative d'alimentation. Nous nous sommes donc reportés à la classification des domaines de tension [Als]. Cette classification atteste que la tension est considérée comme pas ou peu dangereuse en dessous de 50 V environ. Nous remarquons toutefois, en pratique, qu'au-delà de 25 V il y a toujours un danger potentiel, surtout en présence d'humidité. Nous prendrons donc comme tension maximale  $V_{\text{max}} = 25 \text{ V}$  et pour tension de dimensionnement  $V = 15 \text{ V}$  afin de nous laisser une marge de sécurité.

### 3.2.5 Contrainte sur la tenue mécanique

Nous devons garantir par ailleurs la tenue mécanique de la plaque tactile de sorte qu'elle ne se déforme pas sous la pression du doigt. Nous imposerons donc une épaisseur de plaque supérieure ou égale à 1 mm en supposant que le matériau choisi sera de rigidité comparable à celle d'un acier.

## 3.3 Dimensionnement et réalisation du dispositif tactile

On peut trouver dans la littérature des exemples d'assemblages piézoélectriques sur un substrat de cuivre générant des ondes de flexion [MJF00] [Fer02]. Dans [Fer02], des céramiques carrées sont collées sur une surface plane. En général, le dimensionnement de ces dispositifs ne se fait pas dans la même optique que la nôtre, le but étant d'obtenir un actionneur plan ou linéaire qui ait des caractéristiques mécaniques performantes (force, vitesse).

Notre démarche est autre, puisque les dimensions du dispositif, son épaisseur ainsi que les nuances des céramiques doivent être optimisées pour répondre aux contraintes en terme de fréquence et d'amplitude de vibration.

Pour trouver les dimensions optimales, on peut avoir recours à une approche numérique qui calculera les déformations et les fréquences obtenues selon des dimensions données. Or, ces calculs sont lents et la méthode peut devenir complexe puisque nous ne disposons pas d'un dimensionnement a priori du dispositif. C'est pourquoi cette étude débute par une approche analytique dont le but est d'encadrer les longueurs d'ondes permises afin de répondre au cahier des charges. Ensuite, une étude plus fine par éléments finis viendra compléter le travail pour obtenir les dimensions définitives. Enfin, nous nous attarderons sur le protocole de fabrication du dispositif.

### 3.3.1 Etude analytique

L'étude analytique est effectuée en deux étapes. La première étape consiste à déterminer la déflexion de la plaque provoquée par la contraction des céramiques piézoélectriques. Nous examinerons donc une portion de la plaque d'une longueur égale à une demi-longueur d'onde, notée  $\lambda/2$  et modélisée comme une poutre simplement supportée à ses extrémités (Fig. 3.12). Les extrémités de la portion de la plaque correspondent aux noeuds de l'onde stationnaire qui se propage sur l'ensemble de la plaque. Le calcul de la déflexion statique nous permettra d'obtenir la déflexion à la résonance en multipliant la valeur statique par un coefficient d'amplification dynamique [Fly97].

La deuxième étape donnera lieu au calcul de la fréquence de résonance en fonction de la demi-longueur d'onde pour une largeur donnée. Pour réaliser cette étude, nous ferons l'hypothèse que

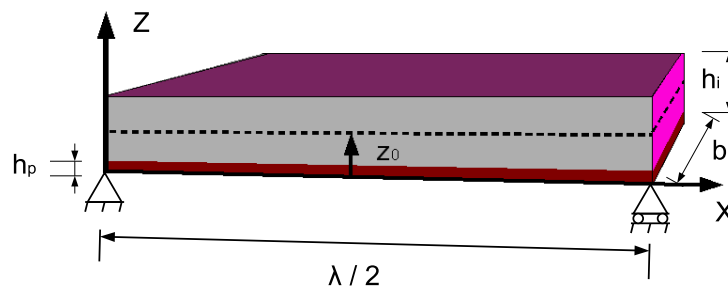


FIG. 3.12 – Une section d'une longueur égale à une demi longueur d'onde du monomorphe est modélisée comme une poutre simplement supportée.

la demi-longueur d'onde considérée ne se trouve pas affectée par les effets de bord et qu'il y a un nombre de longueur suffisant sur la longueur totale de la plaque.

**a. Détermination de la déflexion statique**

Le monomorphe considéré (Fig. 3.12) est constitué d'une couche en céramiques piézoélectriques, d'épaisseur  $h_p$ , et d'une couche d'un matériau passif, le substrat aussi appelé résonateur mécanique, d'épaisseur  $h_i$ . Céramiques et substrat sont collés l'un sur l'autre. L'hypothèse de travail qui a été retenue est celle qui suppose que l'assemblage est parfait, ce qui revient à considérer que l'épaisseur de la colle est nulle et qu'il y a continuité des contraintes à l'interface substrat-céramique piézoélectrique. La longueur de la poutre est égale à  $\lambda/2$  et sa largeur à  $b$ . Pour la suite de l'étude, il est aussi nécessaire de définir le plan neutre, caractérisé par son ordonnée  $z_0$  par rapport au bas de la couche de céramique. Ce plan neutre sépare les zones de compression et d'étirement de la plaque.

En considérant que la plaque ne présente pas d'extension initiale, et donc que ses déformations sont uniquement l'oeuvre de la flexion autour du plan neutre, un point  $M$  caractérisé par son ordonnée  $z$  prend la position  $M'$  après déformation tel que [LL86] :

$$\overrightarrow{MM'} = U = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (z_0 - z) \frac{\delta w}{\delta x} \\ (z_0 - z) \frac{\delta w}{\delta y} \\ w(x, y, t) \end{pmatrix} \tag{3.37}$$

où  $w(x, y, t)$  représente le déplacement selon l'axe  $z$ .

D'autre part, le rayon de courbure,  $\rho$ , causé par le moment fléchissant induit par la contraction des céramiques piézoélectriques, peut être déterminé à partir des résultantes des déformations et des contraintes de plaque composite (Fig. 3.13). Pour mener à bien ce calcul, nous

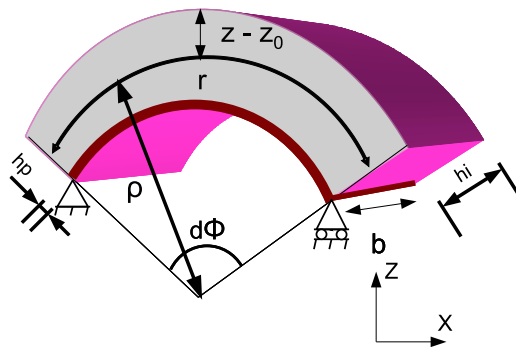


FIG. 3.13 – Poutre d'une demi longueur d'onde qui se fléchit lorsque les céramiques piézoélectriques se contractent.

supposons que nous sommes dans le cas de petites déflexions, de sorte que tous les arcs  $r$  (voir

Fig. 3.13), aient le même rayon de courbure [MN02] :

$$\frac{d\Phi}{r} \simeq \frac{d\Phi}{x} = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2w}{dx^2} \quad (3.38)$$

où  $d\Phi$  représente l'angle entre les extrémités de la plaque (Fig. 3.13).

De plus si  $z_0$  dénomme l'ordonnée du plan neutre et  $z - z_0$  la distance entre un plan de la structure parallèle au plan neutre et ce dernier, alors la déformation  $S_{xx}$  s'écrit :

$$S_{xx}(z) = (z_0 - z) \frac{d^2w}{dx^2} = \frac{z - z_0}{\rho} \quad (3.39)$$

où  $S_{xx}(z)$  représente la composante de déformation selon l'axe  $x$  agissant dans le plan normal à l'axe  $x$ .

Nous considérons le résonateur mécanique comme un milieu isotrope, ce qui nous permet d'exprimer la contrainte  $T_{s_{\text{reson}}}$  par la forme réduite suivante :

$$T_{s_{\text{reson}}} = E_i S_{xx} \quad (3.40)$$

avec  $E_i$  le module de Young du milieu isotrope.

Pour la partie piézoélectrique de la plaque, le tenseur des contraintes est déduit des relations constitutives piézoélectriques. La relation entre contrainte et déformation peut s'exprimer à partir d'un couple de relations entre deux variables indépendantes traduisant l'effet direct et inverse de la conversion énergétique [Nog96] :

$$\begin{aligned} T_p &= c^E S - e^t \mathcal{E} \\ D &= e S + \epsilon^S \mathcal{E} \end{aligned} \quad (3.41)$$

où  $\mathcal{E}$  et  $D$  sont le champ et le déplacement électriques.  $c^E$ ,  $e$  et  $\epsilon^S$  sont respectivement les matrices des constantes élastiques à champ constant, des coefficients piézoélectriques et de la permittivité à déformation constante.

En définitive, la distribution des contraintes selon  $x$  causée par un champ électrique appliqué dans la direction de l'axe  $z$  peut s'écrire de la manière suivante :

$$T_{xx}(z) = \begin{cases} E_i S_{xx}(z) = T_{s_{\text{reson}}} & h_p < z < h_p + h_i \\ c_{11_p}^E S_{xx} - d_{31} c_{11_p}^E \mathcal{E}_z = T_{s_{\text{piezo}}} - d_{31} c_{11_p}^E \mathcal{E}_z & 0 < z < h_p \end{cases} \quad (3.42)$$

où  $e^t = d_{31} c_{11_p}^E$

Par ailleurs, afin de pouvoir garantir l'équilibre des moments, le moment induit par les contraintes précédemment définies doit être nul, puisqu'il n'y a aucun moment extérieur agissant sur cette structure compte tenu des conditions aux limites. Ce qui donne :

$$M = 0 = b \int_z (z - z_0) T_{xx}(z) dz \quad (3.43)$$

Nous intégrons ensuite l'Eq. 3.43 entre zéro et  $(h_p + h_i)$  (Fig. 3.12) en remplaçant  $T_{xx}$  par son expression donnée par l'Eq. 3.42 et la relation (3.39) :

$$\int_0^{h_p} (z - z_0) d_{31} c_{11p}^E \mathcal{E}_z dz = \int_0^{h_p} \frac{(z - z_0)^2}{\rho} c_{11}^E dz + \int_{h_p}^{h_p+h_i} \frac{(z - z_0)^2}{\rho} E_i dz \quad (3.44)$$

Ainsi, en intégrant l'Eq. 3.44, nous déduisons la courbure  $c$  :

$$c = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{3}{2} \frac{d_{31} \mathcal{E}_z}{h_p a} \quad (3.45)$$

où

$$\frac{1}{a} = \frac{1 - 2f_0}{1 - 3f_0 + 3f_0^2 + \alpha(3\beta + 3\beta^2 + \beta^3 - 6\beta f_0 - 3\beta^2 f_0 + 3\beta f_0^2)} \quad (3.46)$$

et

$$\alpha = \frac{E_i}{c_{11p}^E}, \quad \beta = \frac{h_i}{h_p}, \quad f_0 = \frac{z_0}{h_p} \quad (3.47)$$

En outre, compte tenu de l'Eq. 3.38, le déplacement selon  $z$ ,  $w(x)$  s'obtient en intégrant deux fois l'Eq. 3.45. Alors, en prenant en compte les conditions aux limites ( $w(0) = w(\frac{\lambda}{2}) = 0$ ), il vient :

$$w(x) = \frac{3}{4} \frac{d_{31} \mathcal{E}_z}{h_p a} \left( x^2 - \frac{\lambda}{2} x \right) \quad (3.48)$$

La déflexion statique, c'est-à-dire le déplacement à  $\frac{\lambda}{4}$ , est donc donnée par :

$$\begin{aligned} w_{max} = w\left(\frac{\lambda}{4}\right) &= \frac{-3}{16} \frac{d_{31} \mathcal{E}_z}{h_p} \frac{(\lambda/2)^2}{a} \\ &= -\frac{3}{16} \frac{d_{31} V_z}{h_p^2} \frac{(\lambda/2)^2}{a} \end{aligned} \quad (3.49)$$

avec  $V_z$  la tension appliquée entre les électrodes des céramiques piézoélectriques.

## b. Détermination de la déflexion dynamique

Le calcul précédent considérait un cas d'alimentation statique, c'est-à-dire constante. Dans notre application, nous travaillons à la fréquence de résonance de la plaque. Ceci explique pourquoi nous avons besoin de calculer la déflexion dynamique, qui est en fait égale à la déflexion statique multipliée par un facteur d'amplification dynamique. Le facteur d'amplification dynamique correspond au facteur de qualité mécanique  $Q_m$  des céramiques piézoélectriques pondéré par le ratio entre l'énergie potentielle élastique du monomorphe entier,  $U_{\text{mono}}$ , et de l'énergie potentielle élastique du matériau piézoélectrique,  $U_{\text{piezo}}$ , [NJH85] :

$$Q = Q_m \frac{U_{\text{mono}}}{U_{\text{piezo}}} \quad (3.50)$$

L'énergie potentielle élastique du matériau piézoélectrique est donnée par :

$$U_{\text{piezo}} = \frac{\lambda b}{2} \frac{1}{2} \int_z S_{xx} T_{s_{\text{piezo}}} dz \quad (3.51)$$

Ainsi, en substituant dans l'Eq. 3.51 les expressions de la déformation  $S_{xx}$  (Eq. 3.39) et la contrainte  $T_{s_{\text{piezo}}}$  (Eq. 3.42), nous obtenons :

$$\begin{aligned} U_{\text{piezo}} &= \frac{\lambda b}{4} \int_0^{h_p} c_{11p}^E S_{xx}^2 dz \\ &= \frac{\lambda b}{4} \int_0^{h_p} c_{11p}^E \left( \frac{z - z_0}{\rho} \right)^2 dz \\ &= \frac{\lambda b c_{11p}^E h_p^3}{12 \rho^2} \left( 1 - \frac{3z_0}{h_p} + \frac{z_0^2}{h_p^2} \right) \\ &= \frac{3}{16} \lambda b h_p d_{31}^2 \mathcal{E}_z^2 c_{11p}^E \frac{1 - 3f_0 + 3f_0^2}{a^2} \end{aligned} \quad (3.52)$$

De la même manière, l'énergie potentielle élastique du monomorphe en entier est donnée par :

$$U_{\text{mono}} = \frac{\lambda b}{2} \frac{1}{2} \int_z S_{xx} (T_{s_{\text{piezo}}} + T_{s_{\text{reson}}}) dz \quad (3.53)$$

En substituant dans l'expression (3.53) les expressions de la déformation  $S_{xx}$  et de la contrainte  $(T_{s_{\text{piezo}}} + T_{s_{\text{reson}}})$  nous obtenons :

$$U_{\text{mono}} = \frac{\lambda b}{4} \left( \int_0^{h_p} c_{11p}^E S_{xx}^2 dz + \int_{h_p}^{h_p+h_i} E_i S_{xx}^2 dz \right) \quad (3.54)$$

Par ailleurs, à partir de l'Eq. 3.44, nous savons que :

$$\int_0^{h_p} d_{31} c_{11p}^E \mathcal{E}_z \left( \frac{z - z_0}{\rho} \right) dz = \int_0^{h_p} c_{11p}^E \left( \frac{z - z_0}{\rho} \right)^2 dz + \int_{h_p}^{h_p+h_i} E_i \left( \frac{z - z_0}{\rho} \right)^2 dz \quad (3.55)$$

Donc, en remplaçant dans l'Eq.3.54, nous obtenons :

$$\begin{aligned} U_{\text{mono}} &= \frac{\lambda b}{4} \int_0^{h_p} d_{31} c_{11p}^E \mathcal{E}_z \left( \frac{z - z_0}{\rho} \right) dz \\ &= \frac{\lambda b d_{31} c_{11p}^E h_p^2}{8\rho} \left( 1 - \frac{2z_0}{h_p} \right) \\ &= \frac{3}{16} \lambda b h_p d_{31}^2 \mathcal{E}_z^2 c_{11p}^E \frac{1 - 2f_0}{a} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Finalement,

$$Q = Q_m \frac{a(1 - 2f_0)}{1 - 3f_0 + 3f_0^2} \quad (3.57)$$

et

$$w_{\text{dyn}} = w \left( \frac{\lambda}{4} \right) Q = Q_m \frac{-3 d_{31} V_z}{16 h_p^2} \left( \frac{\lambda}{2} \right)^2 \left( \frac{1 - 2f_0}{1 - 3f_0 + 3f_0^2} \right) \quad (3.58)$$

Ainsi, nous venons de déterminer la déflexion dynamique (ou l'amplitude de vibration) en fonction des paramètres géométriques pour une valeur donnée de la tension d'alimentation. A partir de ce résultat, nous sommes donc en mesure de déduire la longueur d'onde de la plaque qui satisfait aux critères établis pendant l'étude de l'effet "squeeze film".

### c. Expression de la fréquence de résonance du monomorphe

La fréquence de résonance,  $f_n$ , est fonction des propriétés des matériaux utilisés d'une part et de la demi-longueur d'onde du monomorphe d'autre part. Elle peut s'exprimer par la relation suivante :

$$f_n = \left( \frac{\pi}{\lambda/2} \right)^2 \sqrt{\frac{G_b}{M_b}} \quad (3.59)$$

avec  $M_b$  la masse surfacique [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] du monomorphe :

$$M_b = \rho_p h_p + \rho_i h_i \quad (3.60)$$



$\rho_i$  et  $\rho_p$  étant respectivement les masses volumiques du matériau isotrope et des céramiques piézoélectriques et avec  $G_b$  la rigidité flexionnelle du monomorphe en [N.m].  $G_b$  est la somme de la rigidité flexionnelle des deux matériaux, où l'ordonnée de  $z$  est mesurée à partir de l'axe du plan neutre.

$$G_b = c_{11p}^E b \int_0^{h_p} (z - z_0)^2 dz + E_i b \int_{h_p}^{h_p+h_i} (z - z_0)^2 dz \quad (3.61)$$

La relation 3.59 traduit la tendance selon laquelle il faut diminuer la longueur d'onde de flexion pour avoir une fréquence élevée. Or, on peut remarquer que cette condition va dans le sens d'une diminution de la déflexion  $w(t)$  (Eq. 3.58) Dans la suite, nous chercherons donc un encadrement de  $\lambda$  qui permette à la fois de satisfaire la condition sur la fréquence de travail et sur l'amplitude. Auparavant, nous fournissons les valeurs des paramètres non optimisés en préliminaire à cette étude.

#### d. Ordonnée du plan neutre

Pour compléter l'étude et déterminer ultérieurement la valeur numérique des paramètres introduits, nous devons également calculer l'ordonnée du plan neutre  $z_0$  en fonction des paramètres géométriques.

Puisque le plan neutre est situé à l'endroit où les contraintes s'annulent mutuellement et changent de signe, distinguant ainsi les zones de traction et de compression, la somme des contraintes de chaque côté du plan neutre donne une résultante nulle. Le calcul est effectué dans le cas où les matériaux sont considérés comme purement élastiques. L'ordonnée  $z_0$  s'obtient alors en résolvant l'égalité (3.62) [Pig05],

$$0 = \int_z S_{xx}(T_{s_{piezo}} + T_{s_{reson}}) dz \quad (3.62)$$

Après développement, l'expression du plan neutre est fonction des dimensions et des propriétés mécaniques distinctes du monomorphe.

$$z_0 = \frac{h_p(1 + \alpha\beta^2 + 2\alpha\beta)}{2(1 + \alpha\beta)} \quad (3.63)$$

#### e. Paramètres non optimisés

**Choix des matériaux :** Pour cette étude, le résonateur mécanique doit garantir une bonne conductivité électrique de sorte qu'il puisse jouer le rôle de masse électrique. Nous nous oriente-

rons donc vers un alliage de cuivre. D'autre part, il est nécessaire que cet alliage ait de bonnes propriétés élastiques, comparables aux bons aciers spéciaux. Nous avons donc choisi d'utiliser un alliage en Cuivre Béryllium.

Le choix des céramiques est motivé par son application au travail en flexion. Comme indiqué précédemment, il faudra donc utiliser des céramiques isotropes transverses, d'axe d'anisotropie dans la direction de l'épaisseur. En outre, il est nécessaire d'avoir un fort facteur de conversion, un facteur de qualité  $Q_m$  convenable et de pouvoir supporter des champs électriques élevés. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'utiliser des céramiques piézoélectriques PZT (P1 91) de la société Saint-Gobain Quartz.

En choisissant ces deux matériaux, nous avons fixé la valeur du coefficient  $\alpha$  qui devient une constante non-optimisable. Les caractéristiques des matériaux sont indiqués dans le tableau 3.3.

<b>Propriétés mécaniques du résonateur</b>	
Module Young $E_i$ ( $10^9 \text{N.m}^{-2}$ )	123
Coefficient de Poisson $\nu_i$	0.31
Masse volumique $\rho_i$ ( $\text{kg.m}^3$ )	8250
<b>Propriétés mécaniques des céramiques P1-91</b>	
Constantes piézoélectriques $e_{31p}$ ( $\text{C.m}^{-2}$ )	-4.9
Constantes élastiques à champ constant $c_{11p}^E = \frac{s_{11}^E}{(s_{11}^E)^2 - (s_{12}^E)^2}$ ( $10^{10} \text{N.m}^{-2}$ )	6.79
Coefficient de charge $d_{31}$ ( $10^{-12} \text{m.V}^{-1}$ )	-247
Facteur de qualité mécanique $Q_m$	60
Masse volumique $\rho_p$ ( $\text{kg.m}^3$ )	7410
<b>Propriétés physiques du monomorphe</b>	
Ratio des constantes d'élasticité $\alpha$	1.81

TAB. 3.3 – Paramètres du dimensionnement

**Choix de la largeur de la plaque :** Puisque nous voulons à présent générer une onde de flexion suivant la longueur de la plaque rectangulaire, la contrainte de dimensionnement se présentera uniquement sur cette direction. Nous pouvons donc fixer la largeur de la plaque  $b$ . En

accord avec le cahier des charges (voir §3.2.1) et en supposant que la longueur est plus grande que la largeur, nous pouvons choisir la dimension de la largeur de sorte qu'elle soit supérieure à 45 mm. En anticipant sur des considérations pratiques décrites en annexe C, nous avons donc choisi  $b = 49$  mm.

**Choix de l'épaisseur :** Dans la littérature, on trouve des études sur l'optimisation de la flexion d'un monomorphe en fonction du ratio des épaisseurs dans des études quasi-statiques [MN02] [Wie00] [Lel02]. Les résultats montrent que le rapport des épaisseurs ( $\beta$ ) optimal pour obtenir la plus grande déflexion est compris entre 0.5 et 0.6 d'après l'Eq. 3.49. Cette condition sera difficile à atteindre puisque les céramiques que nous avons choisies ont une épaisseur standard égale à 1 mm. Répondre à cette condition nous imposerait donc de travailler avec des épaisseurs de résonateur de 0.5 mm. Or, usiner une plaque en Cuivre Béryllium de 0.5 mm d'épaisseur qui garantisse aussi une bonne planéité est très difficile à réaliser d'un point de vue matériel. De plus, une telle plaque garantirait difficilement la tenue mécanique du monomorphe. Pour toutes ces raisons, nous avons choisi d'utiliser une plaque de 2 mm d'épaisseur, ce qui nous donne finalement  $\beta = 2$ .

#### f. Encadrement de la demi-longueur d'onde

L'évolution de la valeur absolue de la déflexion dynamique en fonction de la demi-longueur d'onde donnée par l'Eq. 3.58 est présentée sur la Fig. 3.14, pour une tension d'alimentation de 15 V. Cette figure montre ainsi que, pour suivre les recommandations du cahier des charges qui impose de travailler avec une amplitude de vibration supérieure ou égale à  $1.5 \mu\text{m}$  (voir Fig. 3.11), il est nécessaire d'avoir une demi-longueur d'onde supérieure ou égale à 8.2 mm. Cette valeur constitue la borne inférieure pour la demi-longueur d'onde du mode de la plaque.

Sur la Fig. 3.15, l'évolution de la fréquence de résonance,  $f_n$ , obtenue à partir de l'Eq. 3.59 est représentée en fonction de la demi-longueur d'onde. Afin de satisfaire la condition sur la fréquence relative au "squeeze number" (voir Fig. 3.9), il est nécessaire d'avoir  $f_n > 25$  kHz, ce qui implique que la demi-longueur d'onde doit être inférieure à 14.7 mm. Cette étude permet in fine de donner un encadrement des longueurs d'onde permises qui permettent de répondre aux exigences du cahier des charges :

$$8.2 \text{ mm} \leq \frac{\lambda}{2} \leq 14.7 \text{ mm} \quad (3.64)$$

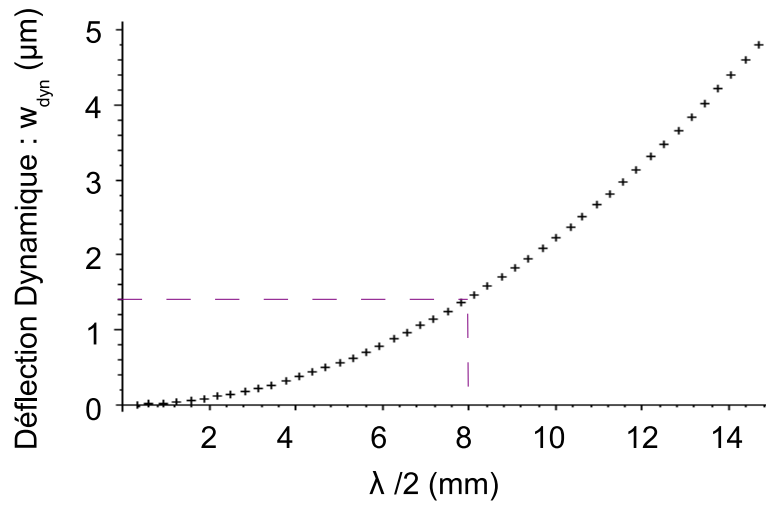


FIG. 3.14 – Déflexion dynamique en fonction de la demi longueur d’onde ( $\lambda/2$ ) pour un ratio des épaisseurs  $\beta = 2$  et pour une amplitude de tension d’alimentation de 15 V.

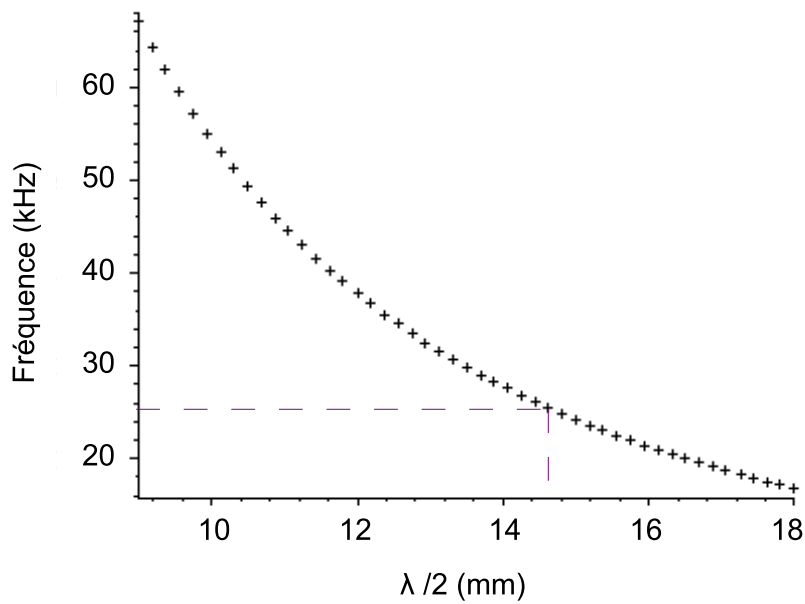


FIG. 3.15 – Fréquence de résonance en fonction de la demi-longueur d’onde.

Cet encadrement permet maintenant d'orienter les simulations numériques afin de déterminer les dimensions définitives du dispositif.

### 3.3.2 Etude numérique

Le but de cette modélisation par éléments finis est de calculer les fréquences de résonance, et les déformées correspondantes pour différents cas de longueur d'onde considérés. Ces analyses sont effectuées sur une demi-longueur d'onde et visent à valider l'étude analytique présentée précédemment.

#### a. Analyse modale pour différentes demi-longueurs d'onde

Nous allons déterminer dans ce paragraphe les fréquences de résonance d'une poutre simplement supportée de longueur  $\lambda/2$  et de largeur  $b$  comme il a été décrit dans la section précédente (Fig. 3.12). Cette analyse est menée avec le logiciel d'éléments finis ANSYS. Nous considérons 7 demi-longueurs d'onde qui mesurent respectivement 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm et 20 mm. Les paramètres utilisés pour réaliser l'étude sont donnés dans le Tab. 3.3 et l'annexe B. La figure 3.16 représente un exemple de déformée en flexion d'un morceau de monomorphe. Les céramiques (en vert) sont collées sur le résonateur en Cuivre Béryllium (en violet). On impose sur la ligne d'ordonnée  $z = z_0$  aux frontières latérales, un déplacement vertical nul représentant les noeuds de l'onde stationnaire. Les résultats de l'analyse modale sont résumés

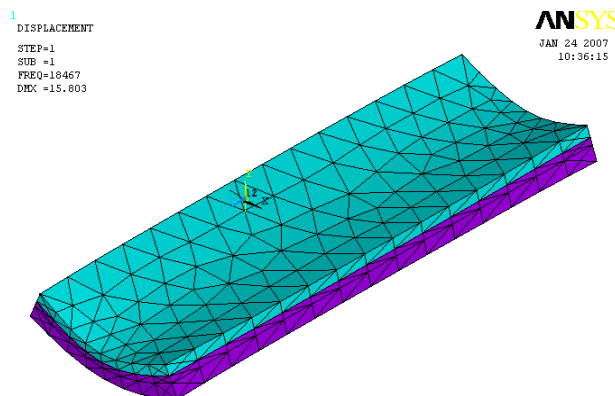


FIG. 3.16 – Analyse modale sur une demi-longueur d'onde de 16 mm et de largeur  $b$ . Les bords latéraux de la poutre sont simplement supportés.

dans le tableau 3.4. Les résultats reportés sur la Fig. 3.17 montrent une différence (comprise entre

<b>Demi-longueur d'onde</b> $\lambda/2$ (mm)	<b>Fréquence de résonance</b> $f_n$ (Hz)
9	53492
10	44684
11	36006
12	31622
14	23780
16	18467
20	11992

TAB. 3.4 – Résultats de l'analyse modale sur les différentes longueurs d'onde.

11.3% et 13.3%) entre les résultats issus de l'étude analytique et ceux obtenus par la modélisation par éléments finis. En particulier, ces résultats indiquent que la borne supérieure de  $\lambda/2$  respectant la condition sur la fréquence de résonance est surestimée par l'approche analytique. Les différences entre les deux courbes peuvent être liées au choix du maillage, c'est-à-dire à la taille des éléments, mais aussi à la forme de la déformée dans l'étude analytique, qui est imposée et parabolique. L'étude numérique a donc permis d'affiner les résultats obtenus analytiquement. Également, le modèle de poutre peut être malmené compte tenu des valeurs respectives de  $b$  et  $\lambda/2$ .

#### **b. Choix des dimensions finales de la plaque - analyse modale du monomorphe en entier**

La conception choisie pour le monomorphe impose que la largeur des céramiques utilisées corresponde à une demi-longueur d'onde. Cela permet en effet d'obtenir une meilleure conversion d'énergie au niveau des céramiques.

Compte tenu de la contrainte obtenue sur la demi-longueur d'onde, nous avons choisi dans le catalogue proposé par Saint Gobain des céramiques de 11 mm. Pour respecter les contraintes ergonomiques sur la longueur et s'affranchir des effets de bord, nous choisissons de placer 7 céramiques espacées entre elles de 1 mm. Les dimensions finales de la plaque sont donc :  $\mathcal{L} \times b = 83 \text{ mm} \times 49 \text{ mm}$ . Ceci nous donne une surface totale de  $40.67 \text{ cm}^2$ .

Par la suite, une analyse modale du monomorphe en entier est réalisée. A partir de cette analyse, nous avons trouvé que le mode de flexion (8 ; 0) correspond à une demi longueur

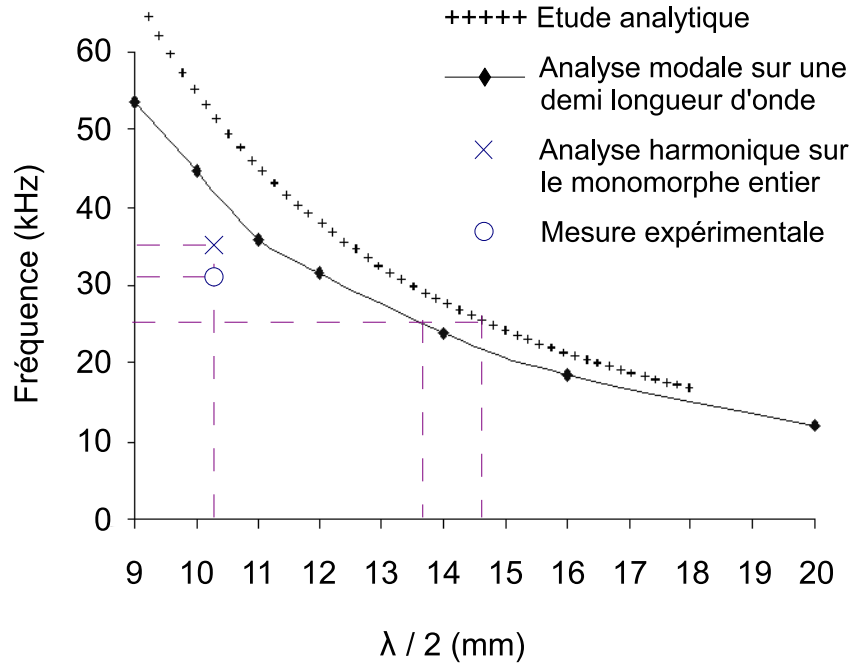


FIG. 3.17 – Fréquence de résonance en fonction de la demi-longueur d'onde : comparaison entre l'étude analytique et l'étude numérique.

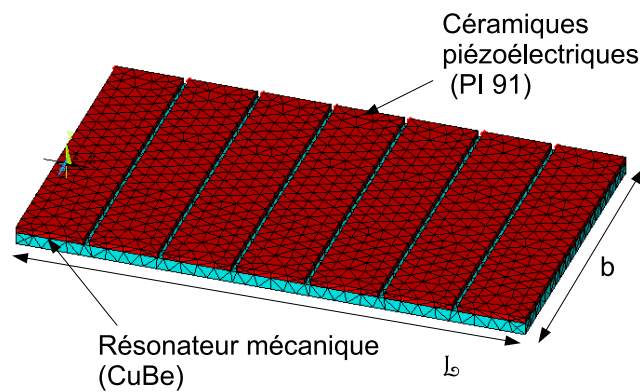


FIG. 3.18 – Modèle éléments finis du monomorphe.

d'onde de 10.37 mm dans la direction de l'axe  $x$ , c'est-à-dire suivant la longueur  $\mathcal{L}$ . La déformée représentée sur la Fig. 3.19 apparaît pour une fréquence de résonance de 35.6 kHz, fréquence satisfaisante au regard de l'analyse sur l'effet "squeeze film" ( $>25$  kHz).

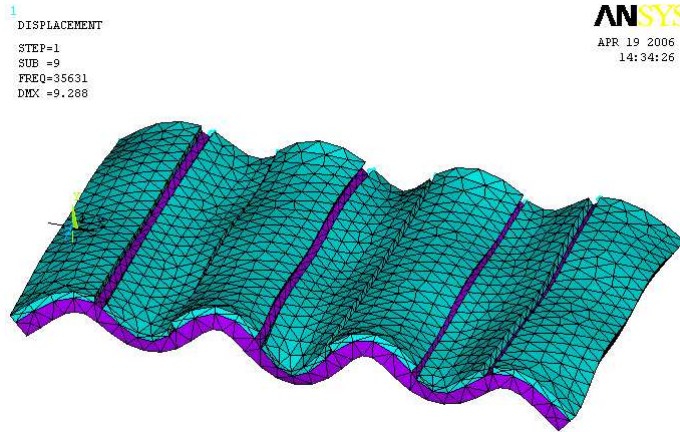


FIG. 3.19 – Résultat de l'analyse modale : déformée du mode  $(x; y)=(8;0)$  à la fréquence de résonance  $f=35.6$  kHz (ANSYS software®)

### c. Analyse harmonique sur le monomorphe entier

Cette analyse va nous permettre de savoir si les dimensions du monomorphe satisfont aux exigences sur l'amplitude de vibration. Nous utilisons pour cette analyse le même modèle que pour l'analyse modale (Fig. 3.18), à la différence que nous imposons cette fois-ci aux céramiques deux tensions sinusoïdales d'amplitude égale 15 V, déphasées de  $180^\circ$ . La polarisation initiale étant identique, les phases de dilatation et de contraction sont donc alternées d'une céramique à l'autre. Une onde stationnaire est donc créée dans la plaque.

Les résultats de l'analyse harmonique donnent le déplacement en tout point du monomorphe en fonction de la fréquence d'alimentation des céramiques. Pour un point de la structure situé sur un ventre de l'onde, le déplacement vertical est représenté sur la Fig. 3.20. Le maximum de la courbe indique un déplacement crête-crête de  $3.2 \mu\text{m}$  pour fréquence de résonance de 34.77 kHz (marqué par une croix sur la Fig. 3.17)

Notons que cette courbe a été obtenue pour un amortissement réglé pour obtenir un coefficient de qualité proche de ceux obtenus en pratique pour ces types d'assemblage ( $Q$  entre 100 et 200)<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>Par exemple, pour l'actionneur vu dans [Pig05],  $Q = \frac{\tau\omega_0}{2} = 123$  avec  $\tau$  le temps de réponse et  $\omega_0$  la pulsation à la résonance.



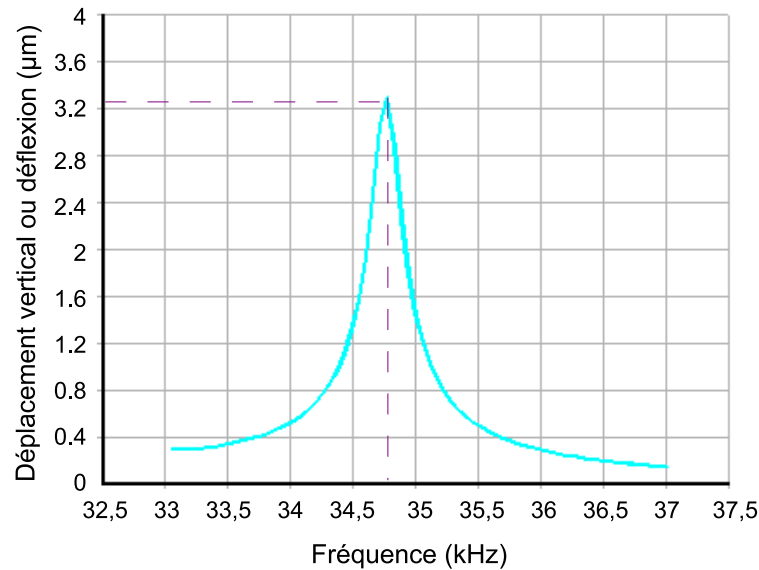


FIG. 3.20 – Résultats de l'analyse harmonique : déplacement vertical d'un point de la surface situé sur un ventre de l'onde (ANSYS software®).

Si le résultat ne permet pas de conclure avec assurance sur les capacités du dispositif réel, il est encourageant. En effet, même si la déflexion obtenue est inférieure à la valeur prédéterminée par l'étude analytique (Fig. 3.14), elle reste quand même dans un même ordre de grandeur.

### 3.3.3 Réalisation du monomorphe

La plaque en cuivre béryllium a été usinée par un processus d'électro-érosion qui nous permet de garantir une très bonne planéité de la surface ainsi qu'un bon état de surface (voir annexe C). Les céramiques, préalablement polarisées, sont maintenues sur le résonateur par collage suivant le schéma C.2 (annexe C). On notera qu'à la place de céramiques uniformes sur la largeur de la plaque, on préfère pour des questions de robustesse prendre des petites céramiques. Cet assemblage est garanti par une colle epoxy, réalisé en étuve sous l'application d'une pression mécanique équivalente de  $12 \text{ kg/cm}^2$ , de façon à satisfaire la conduction électrique entre les deux éléments (diminution de l'épaisseur de colle) et la rigidité mécanique de la liaison. Cette pression est exercée au moyen d'un dispositif d'assemblage et est ajustée au moyen de quatre ressorts. Les céramiques sont disposées sur un film adhésif pour maintenir leur position pendant le collage. Une attention particulière sera portée à la mise en place du dispositif d'assemblage, afin de ne pas casser ou fragiliser les céramiques. Une fois le collage réalisé, les céramiques sont connectées entre elles sur deux fils d'alimentation (Fig. C.3 et Fig. C.4). Le prototype est présenté sur la

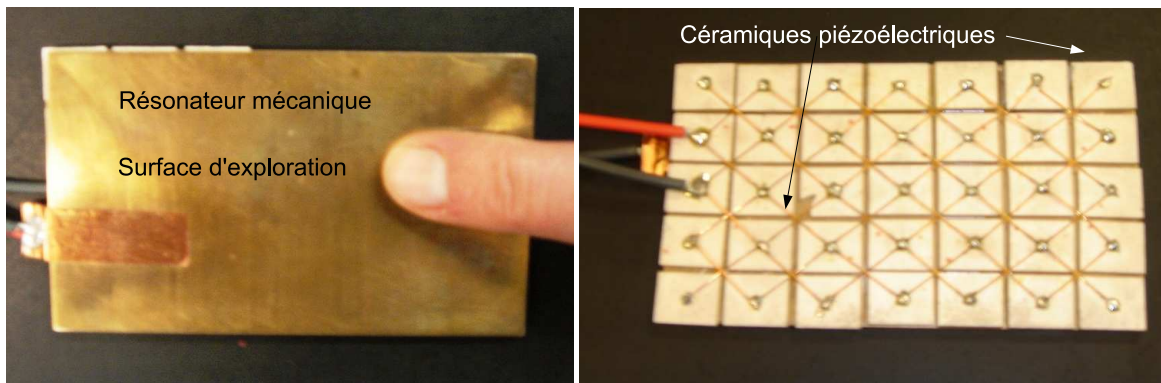


FIG. 3.21 – Vue de dessus et de dessous du dispositif.

Fig. 3.21. On remarquera que polarité de chaque céramique a été choisie de sorte à s'assurer que l'onde se propage bien suivant l'axe des  $X$ . Dans notre cas, le dispositif est alimenté uniquement par deux tensions d'alimentation, suivant le schéma de la figure C.4, dont la fréquence est ajustée pour correspondre à la fréquence de résonance qui génère l'onde stationnaire suivant la longueur de la plaque.

### 3.4 Évaluations expérimentales

Nous avons ensuite effectué deux évaluations expérimentales pour d'une part vérifier que la fréquence de résonance et l'amplitude de vibration sont proches de nos prédictions et d'autre part, pour s'assurer que l'effet glissant apparaît bien sur la face de dessus de notre monomorphe.

#### 3.4.1 Mesure de l'amplitude de vibration

L'amplitude de vibration est mesurée en utilisant un vibromètre LASER (Modèle OFV-505, Polytec GmbH, Waldbronn, Allemagne) relié à un contrôleur (OFV-5000) lui-même connecté à un oscilloscope. Les résultats montrent qu'une amplitude de vibration d'environ  $2.3 \mu\text{m}$  crête-crête (Fig. 3.22) est obtenue pour une tension d'alimentation de 15 V. Pour ce mode, la fréquence de résonance est égale à 30.5 kHz, (valeur qui correspond au point marqué par un cercle sur la Fig. 3.17) ce qui nous donne un "squeeze number" égal à 15.9 pour  $h_r = 0.6 \mu\text{m}$ .

Nous constatons que l'amplitude de vibration est plus petite que celle que nous avons dans l'analyse harmonique. Cette différence pourrait s'expliquer par la phase de collage du monomorphe, cruciale pour avoir une bonne amplitude de vibration, et que nous avons supposé parfaite dans l'étude théorique.

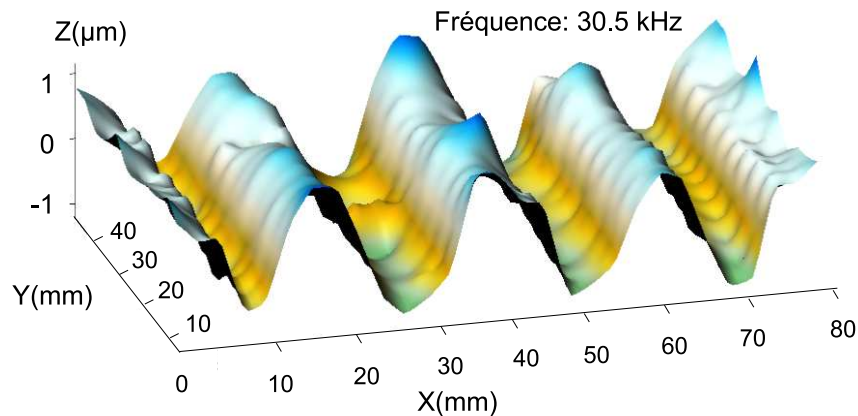


FIG. 3.22 – Mesures effectuées au vibromètre Laser du mode de flexion  $(x; y)=(8; 0)$ .

Néanmoins, en accord avec l'étude du coefficient de frottement relatif, l'amplitude de vibration que nous avons trouvée peut être suffisante pour permettre à l'utilisateur de percevoir une différence de glissement. Nous allons donc vérifier cette hypothèse dans le paragraphe qui suit.

### 3.4.2 Analyse qualitative du caractère glissant

Dans cette partie, nous allons tester qualitativement la sensation générée par l'effet "squeeze film" sur la plaque tactile que nous avons conçue. Ainsi, en contrôlant l'amplitude de vibration de la plaque, nous allons vérifier si nous pouvons modifier la sensation tactile sur la plaque. La surface du dessus (celle sans céramiques) est la surface d'exploration (Fig. 3.21). L'expérience est conduite avec 12 étudiants dont l'âge est compris entre 18 et 25 ans qui ne connaissent pas l'expérience. Tous les sujets (9 hommes, 3 femmes) portent des casques fermés pendant l'expérience (Fig. 3.23) de façon à masquer les bruits produits par le frottement du doigt sur la plaque. La tâche des sujets dans cette expérience est d'insérer leur main horizontalement dans une boîte contenant le dispositif, de poser leur coude en face de l'ouverture, puis de former une ligne avec un mouvement d'avant en arrière de leur index pour découvrir la surface (le dessus de la plaque tactile) présentée à l'intérieur de la boîte (Fig. 3.23). Puisque l'effet glissant est obtenu en faisant vibrer la plaque, nous faisons tester le caractère glissant sur quatre surfaces "virtuelles" correspondant en fait à quatre amplitudes de vibration de la plaque (crête-crête) :  $0 \mu\text{m}$ ,  $0.5 \mu\text{m}$ ,  $1.2 \mu\text{m}$  et  $2.3 \mu\text{m}$ . Dans une phase préliminaire, nous avons progressivement baissé l'amplitude de vibration pendant que les sujets exploraient la surface, puis nous leur avons demandé s'ils percevaient une différence entre le début et la fin. Tous ont répondu "oui" et

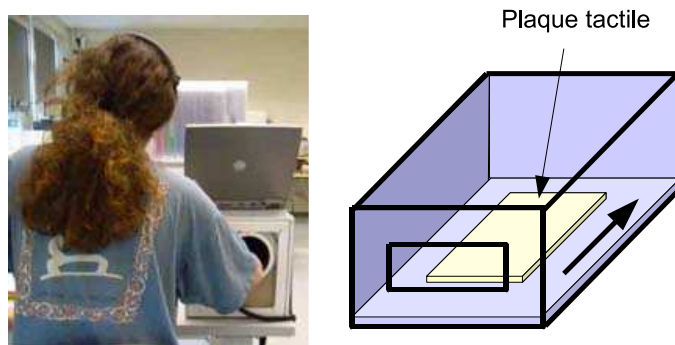


FIG. 3.23 – Dispositif expérimental d'évaluation.

ont ajouté que la surface était moins glissante. Dans une deuxième phase, nous avons demandé aux sujets d'évaluer l'intensité de l'effet glissant des quatre surfaces virtuelles présentées dans un ordre aléatoire sur leur propre échelle de perception.

	Intensité estimée			
	Ampl. 1 0 $\mu\text{m}$	Ampl. 2 0.5 $\mu\text{m}$	Ampl. 3 1.2 $\mu\text{m}$	Ampl. 4 2.3 $\mu\text{m}$
<b>Moyenne</b>	12.75	19.58	56.25	81.33
<b>Écart maximum</b>	27.25	10.42	16.25	18.67
<b>Écart type</b>	12.75	8.11	8.82	10.76

TAB. 3.5 – Statistiques descriptives du caractère glissant perçu.

Les résultats sont reportés sur le tableau 3.5. Toutes les échelles des sujets ont été ramenées sur 100 pour pallier les différences d'échelles (ordre croissant du peu glissant au glissant). Les valeurs du tableau ont été reportées sur la figure 3.24 où l'intensité estimée est représentée en fonction de l'amplitude de vibration de la plaque.

De cette expérience, il ressort donc clairement que cette plaque est capable de simuler un coefficient de frottement variable entre le doigt et la surface.

### 3.5 Conclusion

Pour le dimensionnement d'une plaque tactile permettant d'obtenir un effet glissant, nous avons présenté dans ce chapitre des considérations théoriques qui ont été vérifiées a posteriori.

Dans une première étape, nous avons étudié les conditions d'obtention d'un effet glissant

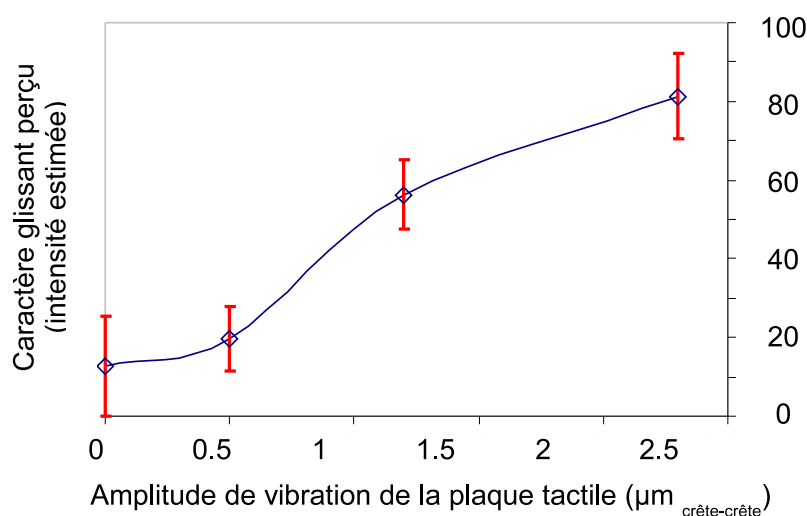


FIG. 3.24 – Intensité moyenne du caractère glissant estimée en fonction de l’amplitude de vibration de la plaque.

causé par deux phénomènes qui ont retenu notre attention : la lubrification active et l’effet ”squeeze film”. Les calculs effectués en considérant la géométrie des empreintes digitales pour la lubrification active nous ont conduits à ne pas envisager ce phénomène comme prédominant pour expliquer l’effet glissant ; c’est pourquoi nous avons choisi d’appuyer notre dimensionnement sur l’analyse de l’effet ”squeeze film”. Cet effet ”squeeze film” repose sur la création d’une surpression entre la plaque vibrante et le bout du doigt, considérations faites des empreintes digitales. L’étude de l’effet ”squeeze film” nous a permis de déduire des critères en terme d’amplitude de vibration, d’état de surface et de fréquence nécessaires pour induire un effet glissant sous le doigt.

De plus, afin de générer des vibrations sur la plaque et de satisfaire aux exigences ergonomiques (nous avons besoin d’un espace de travail d’au moins  $45\text{ mm} \times 57\text{ mm}$ , lorsque le poignet de l’utilisateur est posé sur une table), nous avons utilisé des céramiques piézoélectriques que nous avons collées sur un substrat en Cuivre Béryllium.

Ensuite, en prenant en compte les résultats de l’analyse du ”squeeze film”, nous avons effectué une étude analytique pour déterminer la déflexion dynamique d’une poutre en fonction de ses paramètres géométriques. Les résultats nous ont permis de choisir l’épaisseur de la plaque ainsi que la demi-longueur d’onde nécessaire pour obtenir l’amplitude de vibration et la fréquence préconisée par l’étude sur l’effet ”squeeze film”, pour une tension d’alimentation donnée. Une étude numérique a ensuite été menée pour calculer la fréquence de résonance et les déformées de la plaque ainsi que pour vérifier la valeur de l’amplitude de vibration donnée par l’étude

analytique.

Pour finir, des expériences menées sur le prototype ont permis de vérifier ses performances. L'amplitude de vibration a été mesurée et la perception glissante a été évaluée qualitativement.

# Chapitre 4

## Evaluation de la plaque tactile

### Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Evaluation des dispositifs haptiques . . . . .</b>	<b>120</b>
4.1.1	Evaluation de dispositifs à indentation normale . . . . .	121
4.1.2	Evaluation des dispositifs à vibration . . . . .	121
4.1.3	Évaluation de dispositifs de cisaillement . . . . .	123
4.1.4	Evaluation des dispositifs qui modifient le coefficient de frottement . . .	124
4.1.5	Evaluation de stimulateurs de forme . . . . .	125
<b>4.2</b>	<b>Évaluation des performances du dispositif dans le cadre de la simulation de périodes spatiales . . . . .</b>	<b>126</b>
4.2.1	Problématique . . . . .	126
4.2.2	Seuils différentiels de la période spatiale obtenus sur des échantillons réels en condition de toucher actif . . . . .	127
4.2.3	Discrimination de la période spatiale simulée . . . . .	130
<b>4.3</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>141</b>

---

Dans ce chapitre, nous évaluons la plaque tactile conçue dans le cadre de cette thèse afin d’avoir un aperçu de ses performances. Cependant, avant de procéder aux tests, nous nous attardons sur les différentes méthodes d’évaluation utilisées en haptique. Nous présentons des exemples d’évaluations en fonction du type de stimulation apporté par l’actionneur étudié. Cette première partie nous permettra de choisir les tests les plus appropriés pour notre dispositif. Dans une deuxième partie, nous mettons en oeuvre le test pour la plaque tactile et nous concluons sur ses possibilités et ses performances.

## 4.1 Evaluation des dispositifs haptiques

L'évaluation des dispositifs consiste à identifier les relations existant entre un stimulus physique et la perception psychique qu'il provoque. Elle étudie comment les personnes détectent, différencient, identifient, catégorisent ou décrivent des stimuli précis engendrés par les dispositifs haptiques. En évaluant ces dispositifs, nous nous plaçons ainsi au croisement de la psychologie et de la physique expérimentale. Nous comprenons alors qu'il est impossible de connaître les capacités d'un dispositif tactile sans faire appel à ce genre d'étude, puisque l'homme est le seul et unique "capteur" qui nous permette de mesurer l'information tactile.

Ainsi, pour mesurer les réponses perceptuelles à un stimulus, nous demanderons à un ensemble de personnes - les sujets - d'effectuer un certain nombre de tâches bien précises - l'expérience -. Les tâches les plus couramment employées sont souvent relatives à l'estimation de l'amplitude, la détection ou la discrimination des stimuli perçus ou encore la comparaison ou la mesure de niveaux de similarité :

- l'estimation de l'amplitude consiste à comparer des stimuli avec un stimulus standard. Les réponses des sujets peuvent par exemple être sous la forme d'un nombre ou d'une marque sur une ligne. Cette étude revient à placer sur une échelle subjective les sensations perçues par rapport à une référence.
- l'estimation des seuils de détection ou différentiel a pour but de connaître l'intensité du stimulus à partir de laquelle il est possible respectivement de percevoir une sensation ou une différence de sensation.
- la comparaison de niveaux de similarité nous renseigne sur la distance perceptive entre les objets et permet de construire des espaces de représentation de la perception (méthode d'échelonnement multidimensionnel) [HBKY00].

Ces méthodes psychophysiques servent en général en haptique à évaluer la perception des paramètres spatiaux comme la forme, la période spatiale, l'orientation, la courbure, ou alors des propriétés de la matière comme la rugosité, la dureté, la résistance thermique.

Dans la suite de ce chapitre, nous établissons un état de l'art des expériences psychophysiques réalisées dans le cadre de l'évaluation de dispositifs tactiles. Les expériences sont choisies selon le type de dispositif évalué étant donné les modes d'interaction différents. En effet, chaque dispositif stimule différemment la pulpe du doigt : les expériences doivent donc tenir compte de la nature des réponses obtenues. A partir de la classification établie dans le chapitre 1, cet état de l'art



nous orientera vers le choix du protocole expérimental le plus adapté à la plaque tactile conçue dans cette thèse.

#### 4.1.1 **Evaluation de dispositifs à indentation normale**

Pour ce type de dispositif décrit au chapitre 1, il est fréquent de demander aux sujets de reconnaître la forme affichée par le dispositif, que ce soit un objet familier, des Kanji (idéogrammes chinois) ou des cartes [SSM98]. On peut également leur demander de dessiner la forme qu'ils ont perçue [VPW06]. On évalue alors simplement le dispositif en calculant le nombre de bonnes réponses obtenues en moyenne par l'ensemble des sujets, qu'ils reconnaissent directement l'objet ou qu'ils choisissent parmi un panel d'objets le plus ressemblant. Par exemple, Makino et al. [MS05] proposent de faire comparer, à 35 volontaires, 7 objets de références de forme différentes à 3 stimuli différents sur un élément de leur matrice de succion. Les volontaires doivent choisir l'objet qui se rapproche le plus de leur sensation. Les auteurs montrent ainsi la possibilité qu'offre leur interface tactile à faire percevoir des formes différentes. Toujours dans le cadre de l'évaluation des dispositifs à indentation normale, Kammermeier et al. [KS02] apportent un éclairage intéressant en étudiant l'influence de la distance entre deux indenteurs de leur dispositif : par ces expériences, ils montrent que le pourcentage de bonnes réponses décroît avec l'augmentation de cette distance et ils supposent donc qu'il n'y a pas de seuil de détection, puisque cette variation est quasi linéaire. Ce résultat sera repris dans la suite du chapitre pour justifier l'évaluation des formes.

Pour leur part, plutôt que de chercher à savoir si les stimulations sont perçues comme des formes, Moy et al. [MWF00] s'intéressent à la perception de l'information de texture. Dans leur expérience, les sujets doivent déterminer l'orientation des rainures sur le dispositif.

Enfin, pour compléter leur étude sur les paramètres spatiaux, il est possible d'évaluer l'intensité du stimulus avec la méthode d'estimation de l'amplitude ou de déterminer la résolution temporelle du dispositif [KOR06].

#### 4.1.2 **Evaluation des dispositifs à vibration**

Les dispositifs à vibration peuvent aussi simuler des formes, non pas de manière directe comme les indenteurs normaux, mais de manière indirecte, en tentant de stimuler directement les mécanorécepteurs de la main ou du doigt de l'utilisateur [BKHSJ05]. Dans ce cas là, les expériences d'évaluation peuvent s'inspirer en bonne partie de celles effectuées avec les indenteurs

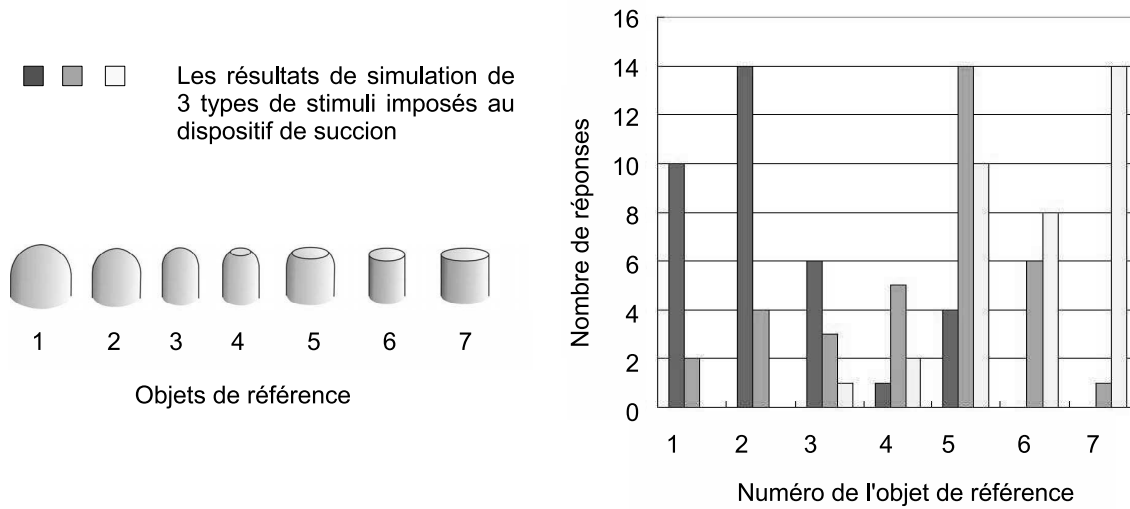


FIG. 4.1 – Les 7 objets de références utilisées dans l'article de Makino et les résultats de l'expérience pour trois types de stimuli (d'après [MS05]).

normaux.

De plus, parce qu'ils possèdent des taux de rafraîchissement plus élevés, les dispositifs à vibration peuvent par exemple simuler des objets tactiles dynamiques. C'est ainsi que Summers et al. [SCSB01] alimentent par vague les picots de leur dispositif et suggèrent par exemple d'identifier la direction du mouvement. Les résultats de l'expérience menée montrent que la tâche de discrimination de la direction du mouvement est très facile en absence d'arrière plan excité par une vibration uniforme. Par contre, lorsque l'objet tactile dynamique se déplace sur un arrière plan, les résultats sont plus mauvais, bien que l'acuité spatiale soit meilleure pour un arrière plan à 320 Hz qu'à 40 Hz. Les auteurs ont aussi noté que la perception de l'objet dynamique est différente en fonction de la fréquence d'excitation. Ces expériences ont permis de choisir la fréquence des stimuli la plus adaptée à la tâche envisagée. Partant du constat que les stimulateurs tactiles sont souvent utilisés de manière assez basique pour exciter la peau de l'utilisateur, Kim et al. [KKSK06] proposent (Fig. 4.2) d'utiliser une méthode qui permet de catégoriser sous plusieurs noms la rugosité d'une texture. Les résultats de leurs essais montrent qu'il y a une forte corrélation entre les réponses données pour catégoriser la rugosité et les variations de l'amplitude et de la fréquence des stimuli. Ainsi, si cette expérience permet d'évaluer la sensibilité humaine aux changements de fréquence et d'amplitude de leur dispositif, elle montre aussi, pour la représentation de la rugosité sur une interface tactile, que l'amplitude et la fréquence peuvent être des paramètres complémentaires. Les résultats de ces investigations peuvent être appliqués

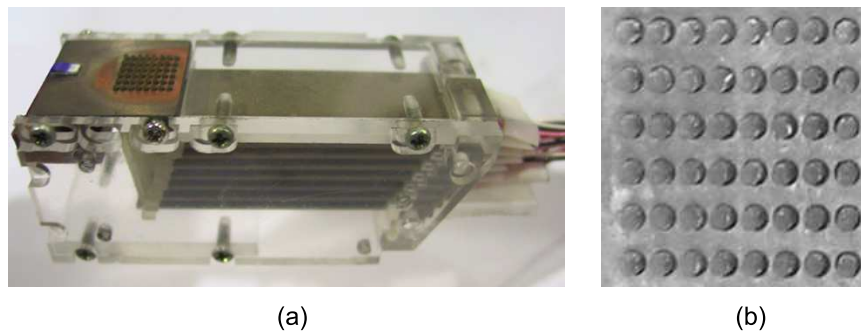


FIG. 4.2 – (a) Vue de côté du dispositif vibrotactile, (b) Vue de dessus du stimulateur tactile (d'après [KKSK06]).

pour simuler des motifs de textures ou des états de surface.

### 4.1.3 Évaluation de dispositifs de cisaillement

Dans une application pratique, Lesvesque et al. utilisent le dispositif STReSS, composé de 6 points fictifs (Fig. 4.3 a), pour simuler des motifs Brailles. La lisibilité des motifs Brailles a été évaluée en recueillant les performances des sujets lors d'une tâche de lecture. L'identification

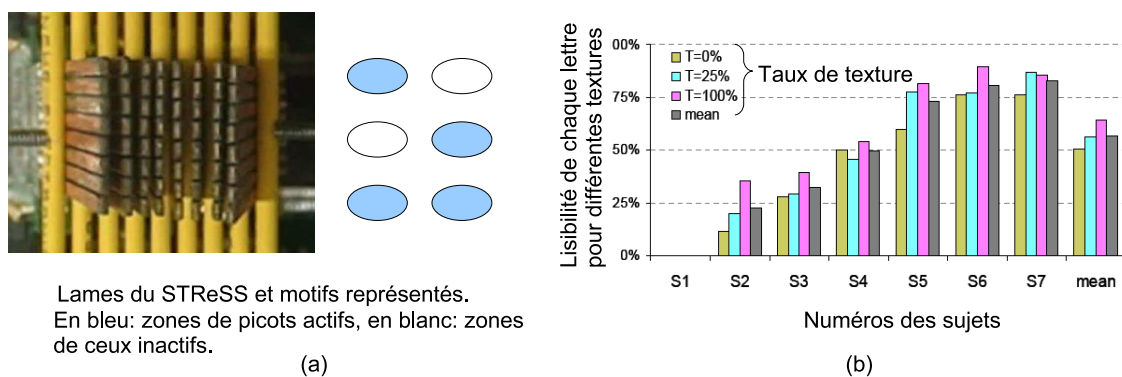


FIG. 4.3 – (a) Lames du STReSS vues de dessus et le motif Brailles simulé, (b) résultats de l'identification d'une liste de lettres sans signification en fonction du taux de texture superposé (d'après [LPH07]).

de la liste de motifs Brailles montre en outre que l'ajout d'une texture par dessus le point fictif simulé permet de mieux identifier les motifs (Fig. 4.3 b). Le protocole utilisé peut s'apparenter à ceux décrits dans la reconnaissance de formes (cf §4.1.1).

Drewing et al. quant à eux, cherchent à évaluer les performances dans une tâche de discrimination de la direction de la force latérale exercée par les picots [DFZ<sup>+</sup>05]. Dans le test, une direction étalon (Fig. 4.4 a) est comparée à huit directions de comparaison (Fig. 4.4 b). Les auteurs déterminent ainsi le seuil différentiel pour huit directions étalon en utilisant la méthode

constante et un questionnaire à choix forcé (Fig. 4.4 c). Les expériences ont permis de montrer

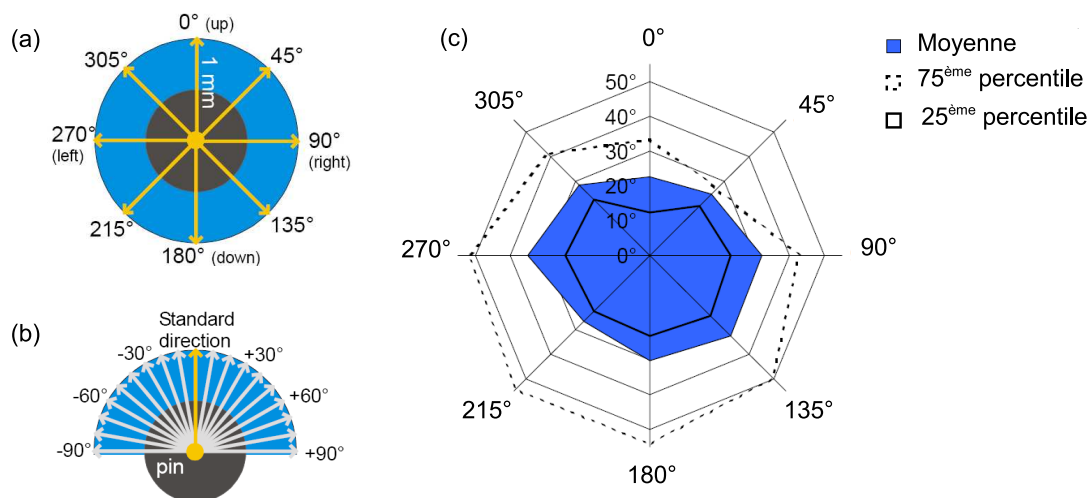


FIG. 4.4 – (a) Les huit directions étalon (flèches oranges) et (b) un exemple de directions de comparaison (flèches grises). (c) Seuils de discrimination de la direction représentés pour les huit directions étalon (d’après [DFZ<sup>+</sup>05]).

que les sujets sont capables de bien discriminer les directions simulées par le dispositif de cisaillement, mais aussi que leur résolution perceptuelle ne dépasse pas la résolution du dispositif, qui peut être mesurée par ailleurs. En d’autres termes, les auteurs ont démontré que leur dispositif est en mesure de produire des stimuli appropriés à la perception humaine de l’orientation. Pour notre part, nous retiendrons le principe de comparer le seuil différentiel des utilisateurs sur le dispositif avec la résolution du dispositif.

#### 4.1.4 Evaluation des dispositifs qui modifient le coefficient de frottement

Les expériences relatives à la modification du coefficient de frottement sont en général réalisées en condition de toucher actif. Par exemple, Watanabe et al. [WF95] utilisent une méthode qualitative qui leur permet de classer des échantillons suivant leurs différents niveaux de rugosité. Quant au dispositif à onde de surface de Nara et al. [NTM<sup>+</sup>01], il a été évalué avec une méthode de comparaison par paire qui permet de construire une échelle de la rugosité des textures réelles (papiers de verre) et virtuelles en utilisant la méthode de Scheffé. Le lien entre textures réelles et textures virtuelles a été effectué par une corrélation entre les deux échelles de perception de la rugosité. Cette expérience a montré que ces dispositifs sont capables de reproduire plusieurs sensations distinctes. Cependant, l’utilisation d’un faible nombre de stimuli, et les très grandes différences d’intensités entre les stimuli utilisés ne procurent qu’une idée restreinte de l’étendue

des performances d'un tel dispositif.

Ces expériences sont donc intéressantes pour connaître ce que nous pouvons simuler avec le frottement variable, mais elles ne nous permettent pas de savoir jusqu'à quel point ces dispositifs sont capables de "reproduire" la réalité. Pour cette raison, nous nous sommes basés sur une autre approche pour évaluer notre dispositif à frottement variable, cette méthode a été mise en oeuvre dans le cadre de stimulateur de formes à retour d'effort et est présentée dans le paragraphe qui suit.

#### 4.1.5 Evaluation de stimulateurs de forme

Nous avons vu dans le chapitre 1 que des dispositifs à retour de force sont aussi capables de procurer une impression de texture en simulant des trous et des bosses. En grande partie pour leur facilité de mise en oeuvre, ces dispositifs ont été évalués plus finement.

Tan et al. [TAT<sup>+</sup>06] [KTA07] ont, par exemple, proposé de simuler des textures virtuelles dans le but d'étudier leur perception, grâce à un joystick à 3 ddl à retour d'effort, appelé "minis-tick". Pour cette étude, l'idéal est d'avoir des surfaces virtuelles qui ne peuvent être distinguées des surfaces réelles. Cependant, il est impossible d'obtenir cette équivalence expérimentalement en comparant directement les échantillons virtuels aux échantillons réels, à moins que les participants ne ressentent tous la même texture de la même façon. C'est pourquoi, Tan et ses collègues suggèrent d'examiner si des seuils différentiels similaires peuvent être obtenus avec les textures périodiques réelles (Fig. 4.5 a) et virtuelles (Fig. 4.5 b) pour des sujets soumis dans les deux cas aux mêmes conditions expérimentales. Dans leurs tests, la période spatiale de la



FIG. 4.5 – (a) Les deux textures réelles en acier inoxydable à comparer, (b) Le dispositif à retour de force à 3 ddl utilisé pour simuler les textures (d'après [TAT<sup>+</sup>06]).

texture est maintenue constante ; le seuil différentiel est déterminé pour l'amplitude des profils

des surfaces texturées, dans le cas réel et virtuel. Ces expériences ont nécessité la fabrication d'échantillons réels différents et la programmation d'échantillons virtuels. Les résultats donnent des seuils différentiels sur les échantillons réels inférieurs mais assez proches de ceux obtenus sur les échantillons virtuels. Cela permet aux auteurs d'affirmer que leur dispositif est capable de simuler l'amplitude d'un profil d'une surface texturée périodique et montre ses performances dans ce domaine.

Nous noterons toutefois que le dispositif à retour d'effort impose de "toucher" virtuellement une surface via un stilet alors que l'exploration de la surface réelle est effectuée dans cette expérience avec un doigt. Cette différence d'exploration est importante puisque toucher une surface avec son doigt implique une recherche d'informations spatio-temporelles (voir chapitre 1) tandis que le stilet du dispositif haptique procure uniquement des vibrations mécaniques. Néanmoins, ce protocole qui compare les performances des utilisateurs sur le dispositif avec celles des utilisateurs sur des échantillons réels nous apparaît être une méthode objective pour évaluer notre dispositif. Elle sera donc transposée à notre cas dans la partie suivante.

## **4.2 Évaluation des performances du dispositif dans le cadre de la simulation de périodes spatiales**

### **4.2.1 Problématique**

Le choix des tests d'évaluation est souvent fait en connaissant a priori le type de stimulation que nous sommes capables de créer avec le dispositif. Dans le chapitre 2, nous avons montré expérimentalement qu'il était envisageable de simuler des motifs à une dimension avec le dispositif circulaire. Nous avons alors procédé à une première évaluation (cf chapitre 2, Tab. 2.5), en comparant directement les périodes spatiales virtuelles et réelles. Cependant, les résultats obtenus ont montré les limites de cette méthode. Effectivement, dans cette première expérience, de nombreux facteurs autres que la PS entraient en jeu et pouvaient influencer la décision des sujets. C'est pourquoi, pour la plaque tactile conçue dans cette thèse, on cherchera plutôt à savoir dans quelle mesure des différences de périodes spatiales (PS) virtuelles sont significatives du point de vue de la perception. En d'autres termes, il s'agit de déterminer les seuils différentiels pour un ensemble d'échantillons étalons de périodes spatiales virtuelles. Ce seuil différentiel, aussi appelé JND (Just Noticeable Difference) dans la littérature, représente l'habileté des utilisateurs à distinguer deux stimuli de même nature et peut être aussi mesuré par la fraction de Weber

(voir Annexe D).

La connaissance des seuils des PS virtuelles ainsi que celle des seuils différentiels des PS réelles rapportés dans la littérature, nous permettra alors d’apporter des éléments de comparaison entre les échantillons simulés et les échantillons réels. En effet, si les valeurs entre les seuils différentiels sur les échantillons virtuels et réels sont proches pour l’ensemble des PS étalons, ces derniers peuvent donc être considérés comme équivalents du point de vue de leurs périodes spatiales [TAT<sup>+</sup>06]. Nous avons donc ici une méthode pour évaluer les performances de notre stimulateur tactile par rapport à la réalité, méthode inspirée des travaux de Tan et al. [TAT<sup>+</sup>06].

Toutefois, construire un grand nombre d’échantillons réels s’avère coûteux car cela nécessite un usinage de haute précision ; nous avons donc plutôt recherché ces valeurs dans la littérature, ce que présente la partie suivante.

#### **4.2.2 Seuils différentiels de la période spatiale obtenus sur des échantillons réels en condition de toucher actif**

##### **a. Introduction**

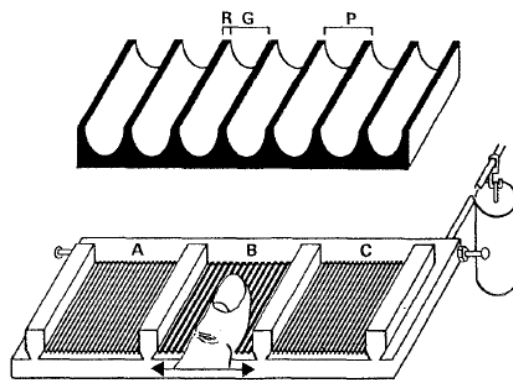
Nous avons vu au chapitre 1 que l’acuité spatiale est souvent quantifiée par la limite de distinction entre deux points. Toutefois, on peut également déterminer les seuils de détection et de discrimination sur l’espacement et la taille des éléments de surfaces texturées. Ainsi par exemple, Philips et Johnson [PJ81] ou de Van Boven and Johnson [BJ94], utilisent des surfaces rainurées ou bien des matrices constituées de petits points. Cependant, ces études ne permettent pas de prédire la discriminabilité pour une surface texturée quelconque ; d’une part, parce que les seuils différentiels trouvés ne peuvent pas facilement être généralisés à d’autres sortes de stimuli ; d’autre part parce que la résolution spatiale mesurée par les techniques de la limite de distinction entre deux points ou de l’orientation des rainures sont insuffisantes. Ainsi, les études comme celle de Craig et Johnson [CJ00] permettent de connaître la largeur minimale détectable des rainures mais ne permettent pas de connaître les performances de notre système perceptuel pour des surfaces rainurées de plus grandes périodes. Une autre limitation des études précitées tient au fait qu’elles utilisent le toucher passif (statique), qui n’est pas la procédure exploratoire naturelle (procédure exploratoire dédiée) pour explorer les surfaces finement texturées [LK87]. Ce choix du toucher passif a souvent été motivé par la possibilité d’éliminer d’éventuelles sources de variance [PJ81] [Dor89]. Cependant, le toucher n’est pas simplement le contact de la peau, il

implique aussi une exploration active de la surface.

Pour toutes ces raisons, nous nous orientons plutôt vers les études de Morley et al. [MGDS84] et de Nefs et al. [NKK01] qui présentent respectivement les mesures de seuils différentiels pour des textures périodiques carrées et sinusoïdales, dans les conditions de toucher actif.

#### b. Seuil différentiel de textures périodiques carrées : Expérience de Morley et al. [MGDS84]

Dans cette expérience on demande aux sujets de différencier des surfaces rainurées lorsqu'ils déplacent leur doigt sur cette surface. Afin de mesurer leurs performances de discrimination, Morley et al utilisent une méthode à choix forcé où 3 surfaces sont présentées à chaque essai (Fig. 4.6). Deux surfaces sur trois (par exemple A et C) sont identiques. La tâche à effectuer est de reconnaître la surface qui est différente des autres (l'échantillon de comparaison B). Morley et



G: largeur des creux, R: largeur des crêtes et P: période spatiale

FIG. 4.6 – Schéma du dispositif utilisé pour présenter les surfaces aux sujets. A et C sont les échantillons standard et B est l'échantillon de comparaison. Le grossissement au dessus montre le profil de la texture rainurée (d'après [MGDS84]).

al ont utilisé dans leur étude des textures périodiques carrées choisies de sorte à ce que la partie inférieure des creux de la texture rainurée ne puisse pas être touchée. Dans cette étude, seule la période spatiale varie alors que le rapport entre la largeur des creux et des crêtes est maintenu constant et égal à 9. Ils trouvent une fraction de Weber voisine de 5% pour deux largeurs de creux standard de  $770 \mu\text{m}$  et  $1002 \mu\text{m}$ .

Cette étude est intéressante car elle traite de périodes spatiales au profil carré. Cependant, nous noterons que :



- Morley et al. utilisent des surfaces rainurées dont le fond ne peut être touché et où les crêtes, très fines, donnent l'impression d'une surface très rêche. Nous recherchons plutôt une étude de référence qui utilise des échantillons où l'amplitude des rainures est nettement moins grande afin de nous rapprocher un peu plus du cas de la texture fine simulée avec notre plaque tactile.
- Ces auteurs ont aussi entraîné longuement leurs participants (1h40), ce qui n'est pas notre intention.
- De plus, ils n'utilisent dans leurs expériences que quatre sujets, ce qui limite la généralisation des résultats.

Pour les raisons que nous venons d'énoncer, nous avons choisi de nous appuyer davantage sur l'étude suivante de Nefs et al. Nous retiendrons toutefois les résultats de cette expérience, sachant qu'ils constitueront une borne inférieure pour la fraction de Weber dans le cas réel.

### **c. Seuil différentiel de textures périodiques sinusoïdales : Expérience de Nefs et al. [NKK01]**

L'étude présentée par Nefs et al. permet de connaître les seuils différentiels pour l'amplitude et la période spatiale de textures sinusoïdales (Fig. 4.7), dans les conditions de toucher actif. Les amplitudes choisies sont des multiples des seuils de détection de l'amplitude [LKK00] et les périodes spatiales sont comprises entre 0.25 cm et 1 cm. Les auteurs justifient leur choix pour la période spatiale par deux arguments : premièrement, la plus grande période spatiale permet au doigt de pouvoir se poser entre deux crêtes et la plus petite période spatiale permet d'avoir plusieurs périodes en dessous de la pulpe du doigt. Deuxièmement, la valeur 0.25 cm a été choisie de sorte à correspondre à la limite de distinction entre deux points sur la pulpe du doigt ; le seuil statique représentant la limite du cas dynamique. Nous noterons toutefois que cette valeur est assez discutée dans la littérature et s'échelonne entre 0.8 mm et 3 mm [BJ94] [SC86] (voir §b.).

La méthode utilisée pour la détermination des seuils est une méthode constante à choix forcé. Ainsi, dans une première expérience, les auteurs mesurent les seuils différentiels pour différentes amplitudes en fonction de la période spatiale. Ces seuils sont compris entre 10.8% et 15.8% de l'amplitude standard. Ils montrent que des différences d'amplitude aussi faibles que 2 mm peuvent être détectées. Les résultats montrent également que les rapports de Weber pour la discrimination de l'amplitude sont constants sur la gamme d'amplitudes étudiées, mais que ces derniers sont influencés par la période spatiale de la surface : la discrimination est meilleure

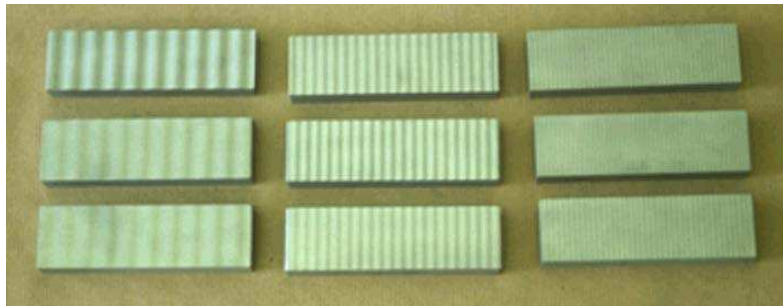


FIG. 4.7 – Exemples de stimuli. Les plaques mesurent 10 cm×3 cm×1.4 cm.

quand la période spatiale augmente (Fig. 4.8 a).

Dans une deuxième expérience, les auteurs ont déterminé les seuils différentiels pour chaque période spatiale étalon. En utilisant la même procédure que dans la première expérience, ils trouvent des rapports de Weber compris entre 6.4% et 11.8%. Dans ce cas, l'amplitude n'a pas d'effet sur les rapports de Weber pour la discrimination de la période spatiale. Cependant, les rapports de Weber diminuent quand la période spatiale augmente (Fig. 4.8 b).

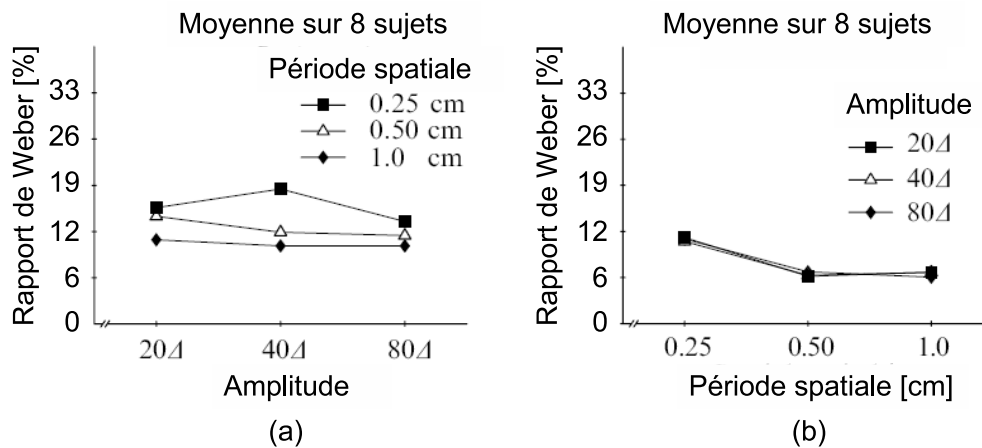


FIG. 4.8 – Résultats de l'expérience de Nefs et al. (d'après [NKK01]).

Cette expérience s'avère fondamentale pour la suite de notre étude. En effet, nous nous en sommes largement inspiré pour étudier les textures virtuelles.

### 4.2.3 Discrimination de la période spatiale simulée

A notre connaissance aucune évaluation n'a prouvé que les stimulateurs tactiles continus peuvent être utilisés pour simuler des textures rainurées avec la même finesse que des textures

rainurées réelles. Nous avons donc conduit une expérience qui permet de mesurer les seuils différentiels sur surface virtuelle pour quatre périodes spatiales étalon et pour une amplitude de vibration maintenue constante.

Avec cette expérience, notre but est de comparer la fraction de Weber de chaque période simulée avec la fraction de Weber d'une surface rainurée réelle équivalente de sorte à mesurer l'écart entre la simulation et la réalité.

En outre, comme il est très long et coûteux de fabriquer des échantillons rainurés de grande précision [NKK01], nous avons axé notre étude uniquement sur la détermination des seuils différentiels des textures rainurées virtuelles. Ces seuils seront ensuite comparés avec les résultats trouvés par Morley et al. [MGDS84] et par Nefs et al. [NKK01].

#### **a. Les sujets**

8 sujets ont participé à cette expérience perceptive, tous de façon bénévole. Le groupe est constitué de 3 femmes et 5 hommes dont l'âge est compris entre 23 et 43 ans (moyenne 31.2, écart type=8.6). Les participants ne présentaient pas de callosités, de cicatrices, ou tout autre signe de lésion de la peau sur leur bout de doigt. Parmi les participants, sept ont attesté être droitiers.

#### **b. Matériel**

Toutes les périodes spatiales simulées sur notre interface tactile sont imposées via un premier ordinateur qui dispose d'une carte SELIAtec multifonction PI01 sur bus PCI et de cartes électroniques adaptées. La position du doigt est mesurée sur la surface de l'interface tactile par un capteur de position linéaire de résolution 70  $\mu\text{m}$ . L'application qui fonctionne sur l'ordinateur mesure la position du doigt à la fréquence de 1000 Hz afin de mettre à jour la fréquence de modulation de l'amplitude de vibration de la plaque tactile (Fig. 4.9).

Un second ordinateur est utilisé pour gérer l'expérience et afficher à l'écran un indicateur d'échantillon simulé. Il est connecté au premier ordinateur par le réseau local.

Le dispositif tactile ainsi que le capteur de position sont placés à une distance qui permette à l'utilisateur de les atteindre facilement. Nous avons choisi de ne pas mettre de rideau devant la plaque car cette dernière garde son aspect lisse pendant toute l'expérience : la vision n'influencera pas la perception. D'autre part, le fait de voir la plaque permet de rassurer certains sujets.

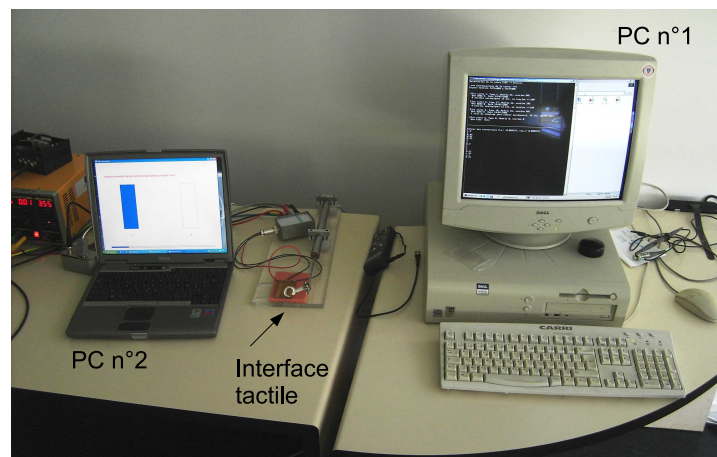


FIG. 4.9 – Matériel utilisé pour l'expérience : l'ordinateur portable gère l'expérience, il est en interaction avec l'utilisateur, la plaque tactile et son capteur de position puis l'ordinateur qui commande la plaque.

Tous les sujets volontaires portent un casque fermé pour nous permettre de masquer les éventuels bruits générés par la plaque et le capteur de position.

### c. Stimuli

La modulation d'amplitude de l'onde de surface provoque un frottement variable en fonction de la position du doigt. Ainsi c'est l'alternance entre les états glissants (grande amplitude de vibration) et des états bloquants (pas ou peu de vibration) qui donne l'impression de toucher une surface rainurée. La modulation choisie pour l'expérience est en forme de créneaux <sup>6</sup> et nous ferons uniquement varier la période spatiale (PS) pendant l'expérience (Fig. 4.10).

Nous utilisons 4 périodes standards étalons (0.25, 0.35, 0.50 et 1.0 cm) et nous réglons l'amplitude de vibration de la plaque de sorte à pouvoir distinguer facilement les effets glissants et frottants. Nous nous servirons de huit PS de comparaison pour chaque PS étalon. Les surfaces virtuelles ont des PS de comparaison comprises entre -20% et 20% de la PS étalon, espacées par un intervalle de 5% (-20%, -15%, -10%, -5%, 5%, 10%, 15%, 20%). Conformément à notre étude préliminaire ainsi qu'aux résultats de Nefs et al. qui trouvent un seuil différentiel plus élevé pour la PS étalon de 0.25 cm [NKK01], nous avons choisi de prendre pour 0.25 cm les huit PS de comparaison suivantes : -25%, -20%, -15%, -10%, 10%, 15%, 20% et 25%.

---

<sup>6</sup>On remarquera qu'utiliser une modulation en créneaux de l'effet "squeeze film" pour simuler une surface crantée n'implique pas directement que l'utilisateur perçoive une surface périodique carrée. En effet, la limite entre la surface bloquante et la surface glissante est nettement moins "coupante" ou raide que dans le cas réel par exemple.

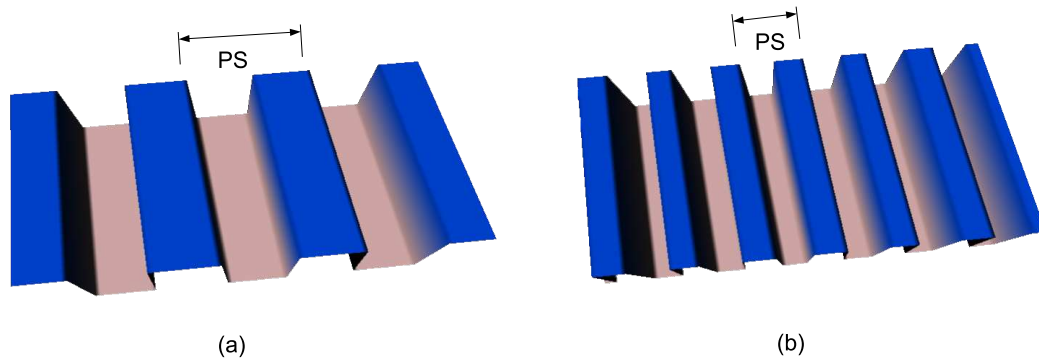


FIG. 4.10 – Exemples de textures virtuelles simulées sur la plaque tactile. Ici les zones en bleu sont celles qui ont le plus grand coefficient de frottement. En (a) on observe une période spatiale plus grande qu'en (b).

L'amplitude de vibration de la plaque est maintenue constante à  $1.15 \mu m$  pour tous les échantillons étalons et de comparaisons.

#### d. Protocole expérimental

La tâche à effectuer est de discriminer, entre deux périodes spatiales simulées, laquelle est la plus grande. Sur l'écran de l'ordinateur qui gère l'expérience, deux rectangles côte-à-côte, marqués 1 et 2 sont affichés, afin de représenter les deux périodes spatiales simulées (Fig. 4.11)<sup>7</sup>. L'un des deux rectangles correspond toujours à la période spatiale étalon, présentée aléatoirement à droite ou à gauche, alors que l'autre correspond à l'une des périodes spatiale de comparaison. La période spatiale en train d'être explorée sur le dispositif tactile est représentée par un rectangle colorié alors que l'autre rectangle reste blanc. Les sujets utilisent les flèches orientées vers la droite et la gauche sur le clavier pour changer d'un rectangle à l'autre, ce qui met en même temps à jour la période spatiale simulée sur le dispositif tactile.

Avant de commencer l'expérience nous demandons aux sujets de se laver et de se sécher les mains. Ensuite, les participants s'assoient devant la table où est disposée la plaque tactile et le capteur de position (Fig. 4.12 a). Le coude de la main préférée (le coude droit pour les droitiers) repose sur la table et l'index est inséré dans une bague liée au capteur de position. Nous demandons de surcroît à l'utilisateur d'essayer de maintenir un angle au contact d'environ 45 degrés entre la plaque et sa phalange distale (Fig. 4.12 b). Ensuite, nous expliquons au sujet qu'il doit former une ligne droite par un mouvement d'avant en arrière du doigt pour découvrir la surface virtuelle présentée. Nous lui demandons d'employer une "force légère et une vitesse

---

<sup>7</sup>Nous rappelons qu'en aucun cas la période spatiale n'est illustrée à l'écran

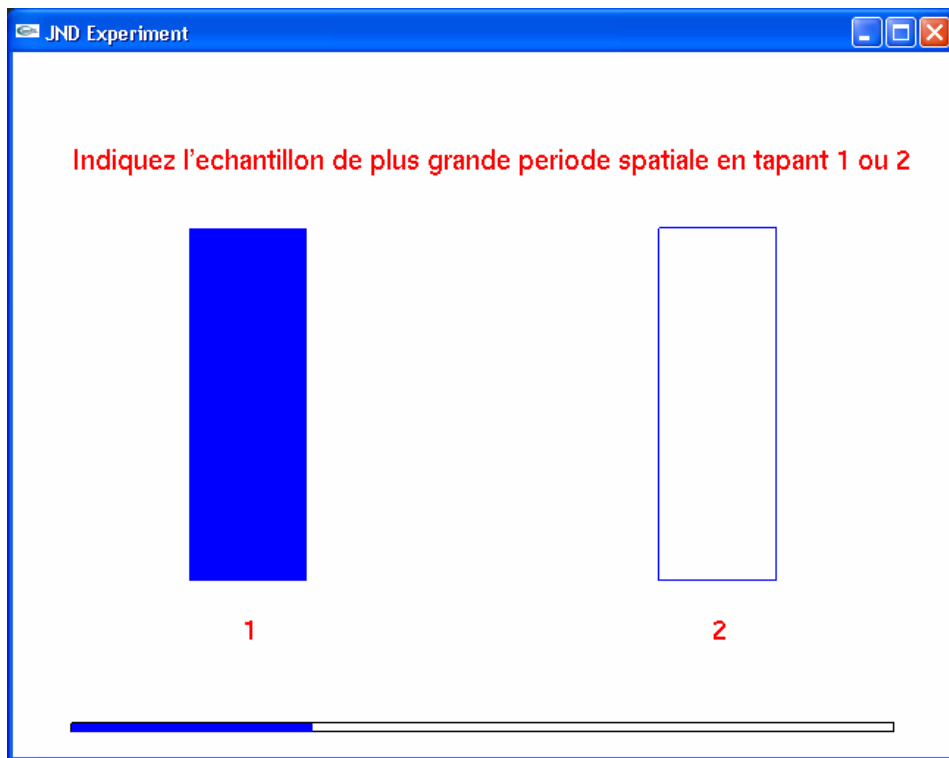


FIG. 4.11 – Interface du test : sur cet exemple, la période spatiale associée au rectangle n°1 est simulée sur la plaque, ce qui se traduit par une coloration bleue du rectangle correspondant. La consigne demandée aux sujets est : "Indiquez l'échantillon de plus grande période spatiale en tapant 1 ou 2".



FIG. 4.12 – Mise en place expérimentale. a) Posture du sujet portant un casque. b) Position du doigt sur la plaque tactile.

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 §a.), en accord avec les études récentes de Lederman et al. [LHKH04]. Les participants utilisent leur main dominante pour explorer la surface tactile et l’autre main pour contrôler les échantillons virtuels simulés à l’aide des flèches. Ils sont libres de passer d’un échantillon à l’autre autant de fois qu’ils le désirent et d’explorer chaque échantillon virtuel aussi longtemps qu’ils le veulent avant de taper les caractères ”1” ou ”2” correspondants à l’échantillon qu’ils considèrent comme celui de plus grande période spatiale. Après avoir tapé ”1” ou ”2”, deux nouveaux échantillons à discriminer sont présentés et la barre de progression en bas de l’écran est incrémentée de façon à donner une indication sur le nombre de paires qu’il reste à discriminer. Toutes les données brutes sont envoyées dans un fichier texte pour un traitement statistique ultérieur.

**e. Déroulement du test**

Pendant un test à proprement parlé, toutes les combinaisons entre les périodes spatiales étalon et les périodes spatiales de comparaison sont répétées 16 fois, ce qui signifie que chaque sujet effectue 512 essais (4 périodes spatiales étalons × 8 comparaisons × 16 répétitions). L’expérience est divisée en 8 sessions qui contiennent chacune 4 blocs (Fig. 4.13). Un bloc est constitué de 16 essais (1 période spatiale étalon × 8 comparaisons × 2 répétitions) sur la même période spatiale étalon. Les quatre périodes étalons sont utilisées dans chaque session. L’ordre de présentation des 4 périodes spatiales étalon ainsi que l’ordre de présentation à l’intérieur des blocs sont aléatoires. Une session dure entre 30 et 45 minutes. Les sessions sont séparées au moins d’une demi-journée. Pour la première session, des explications détaillées sont données par oral à chaque participant, pour les sessions suivantes les instructions sont abrégées. Ils peuvent poser des question supplémentaires s’ils le désirent.

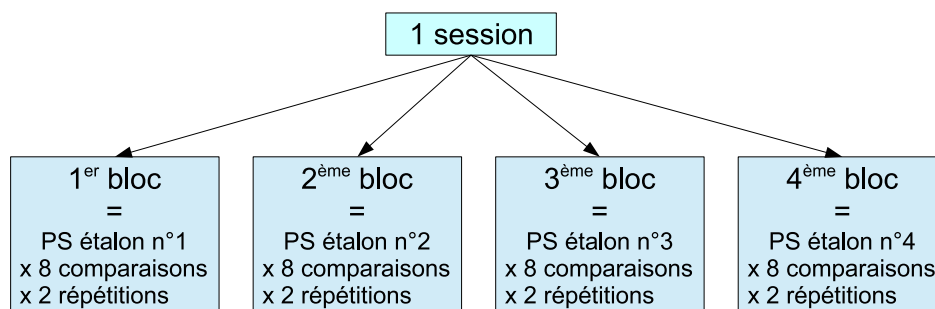


FIG. 4.13 – Description d’une session.

Le test commence par une session d'entraînement qui a pour but de familiariser le sujet avec la tâche demandée. Cette étape d'entraînement compte 4 paires de textures virtuelles à identifier et dure environ 2 minutes. Nous utiliserons pour cela des paires relativement faciles à identifier. Les réponses sont données pendant l'entraînement, par contre aucune correction n'est donnée pendant le test.

## f. Résultats

### *Rapport de Weber :*

Le rapport de Weber peut être graphiquement mesuré à partir d'une fonction psychométrique de chaque période spatiale [GS66]. Sinon, une méthode plus systématique consiste à effectuer une régression linéaire d'une transformation en logit [Lin92] (voir Annexe D). La statistique de R-carré<sup>8</sup> indique que le modèle ajusté explique au minimum 73 % de la variabilité pour toutes les périodes spatiales pour les réponses des sujets après transformation ( $R^2$  min = 0.73,  $R^2$  max = 0.96,  $R^2$  moyen = 0.88).

Les rapports de Weber pour la discrimination de la période spatiale sont représentés sur la figure 4.14 en fonction des périodes spatiales étalon pour les huit participants. La figure montre aussi les résultats moyens sur tous les participants. Le rapport de Weber sur l'ensemble était approximativement 8.96 % de la période spatiale étalon. Tous les participants ont à peu près la même sensibilité pour la discrimination, sauf pour le sujet CC qui semble un peu moins sensible que les autres participants. Les rapports moyens de Weber pour les périodes spatiales de 0.25, 0.35, 0.5 et 1.0 cm étaient respectivement de 9.58%, 8.93%, 9.24% et 8.07%. Ainsi, le seuil différentiel trouvé dans notre expérience s'échelonne de 239  $\mu m$  pour la période spatiale de 0.2 cm à 807  $\mu m$  pour la période spatiale de 1.0 cm (voir Tab. 4.1).

Nous avons ensuite effectué une analyse de la variance des mesures intra-sujets (ANOVA within-subjects) pour analyser plus en détail l'effet de la période spatiale étalon sur le rapport de Weber. L'analyse de la variance n'a pas montré d'effet significatif de la période spatiale étalon sur la fraction de Weber ( $F_{3,21} = 0.455$ ,  $p = 0.522$ ). Bien sûr, ce résultat ne signifie pas que les fractions de Weber sont les mêmes, puisque nous n'avons pas utilisé d'analyse statistique qui

---

<sup>8</sup>R<sup>2</sup> est la fraction de la variance expliquée. R<sup>2</sup> peut être interprété comme la proportion de variation dans la variable dépendante expliquée par le modèle de régression. C'est une mesure de l'efficacité générale de la régression linéaire, parfois appelée coefficient de détermination. Plus il est grand, mieux l'équation obtenue explique la variation dans les données.



4.2. Évaluation des performances du dispositif dans le cadre de la simulation de périodes spatiales

Période spatiale étalon (cm)	Seuil différentiel moyen ( $\mu\text{m}$ )	Rapport de Weber moyen $\pm$ écart type
0.25	242	9.58 $\pm$ 3.82 %
0.35	318	8.93 $\pm$ 2.39%
0.50	473	9.24 $\pm$ 3.47 %
1.00	824	8.07 $\pm$ 4.07%

TAB. 4.1 – Résultats de l'étude des seuils différentiels.

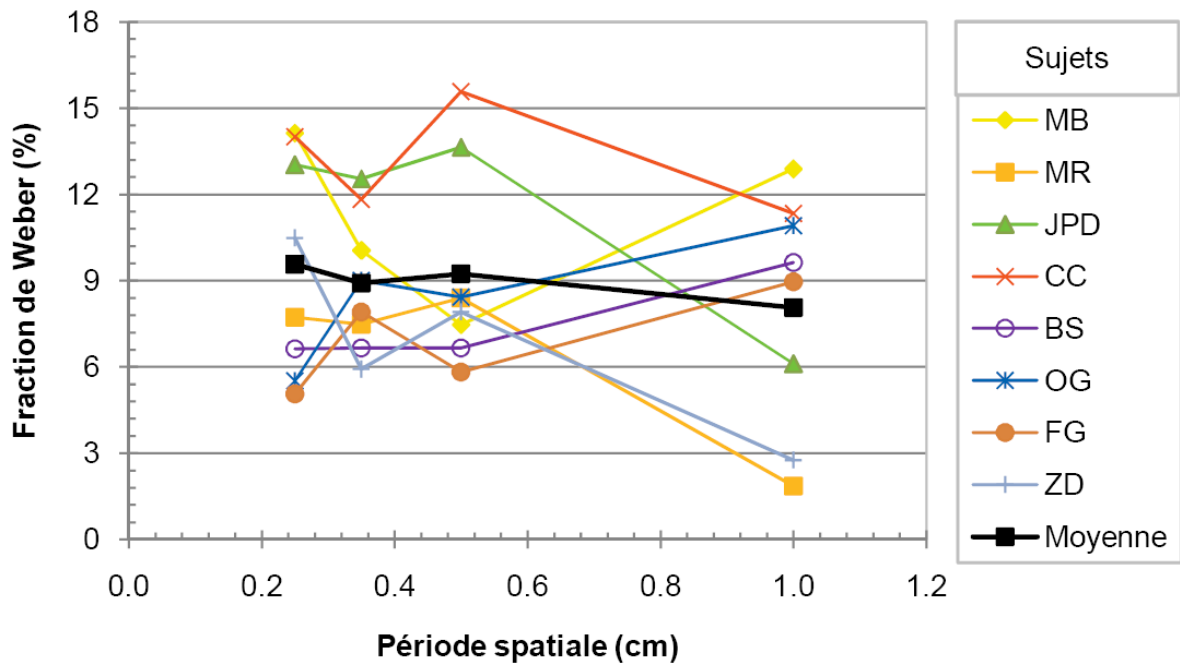


FIG. 4.14 – Représentation des rapports de Weber pour la discrimination de la période spatiale pour chaque participant. Les résultats moyens sur tous les participants sont aussi représentés.

prouve l'égalité des fractions de Weber. Cependant, ce résultat tend à montrer que le rapport de Weber reste constant. En d'autres termes, pour toute période spatiale simulée, le rapport moyen entre le seuil différentiel et la période spatiale étalon reste constant.

*Temps d'Exploration :*

Les participants étaient libres d'explorer chaque échantillon aussi longtemps qu'ils le désiraient avant de prendre leur décision. L'analyse du temps que les participants ont pris pour explorer les échantillons pour chaque période spatiale étalon est intéressante car elle permet de savoir si certaines périodes spatiales sont plus difficiles à percevoir que d'autres. Toutefois, l'analyse de la variance n'a pas montré, là non plus, d'effet très significatif du temps d'exploration sur la période spatiale. ( $F_{3,27} = 1.25$ ,  $p = 0.3$ ). La moyenne du temps d'exploration est comprise entre 26.9 s pour la période spatiale de 0.25 et 30.4 s pour la période spatiale de 0.35 cm avec un temps moyen de 29 s (Figure 4.15).

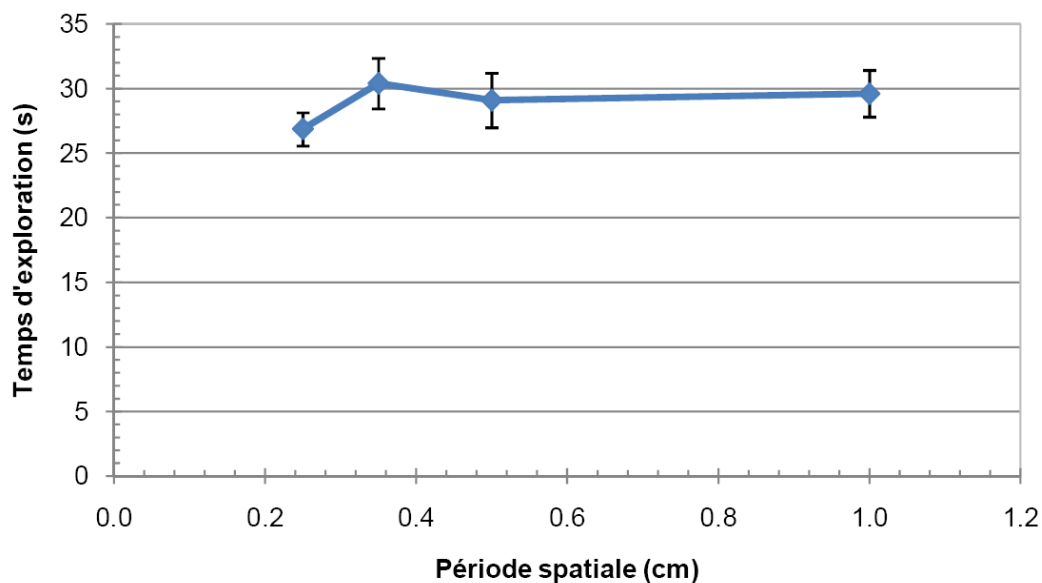


FIG. 4.15 – Temps moyen d'exploration sur l'ensemble des sujets. Les barres d'erreurs représentent 95% de l'intervalle de confiance.

## g. Discussion

*Discrimination de la période spatiale :*

L'étude que nous avons menée nous a permis d'examiner les seuils de discrimination de la période spatiale (PS) pour des surfaces virtuelles rainurées grâce à une modulation de l'amplitude de vibration de la plaque. Les expériences ont été réalisées dans les conditions de toucher

dynamique.

Même si les rapports de Weber moyens fluctuent avec chaque sujet, en égard à leur sensibilité tactile personnelle, nous avons observé que les rapports de Weber étaient proches sur toute la plage de PS étalon étudiées (valeurs comprises entre 8.07 % et 9.58 %) De plus, puisque l'analyse de la variance entre les différentes PS étalon n'a montré aucun effet significatif sur le rapport de Weber, nous pouvons donc considérer ce rapport constant, égal à 9 %, pour les quatre périodes spatiales étudiées. Ce résultat est important puisqu'il montre que les périodes spatiales sont perçues avec la même acuité sur l'ensemble de la plage des périodes spatiales étudiées

*Comparaison entre textures rainurées virtuelles et réelles :*

Morley et al. [MGDS84] ont trouvé une fraction de Weber de 5 % pour des rainures dont le profil est crénelé et pour des périodes spatiales 0.77 and 1.0 mm, tandis que Nefs et al. [NKK01] ont trouvé un rapport de Weber compris entre 6.4 % et 11.8 % pour des rainures dont le profil est sinusoïdal et pour des périodes spatiales entre 2.5 and 10 mm. Dans l'expérience de Morley et al., la transition d'un creux à une crête est très tranchant puisque le doigt est toujours en contact avec les crêtes qui sont relativement aiguës. De plus, les participants sont entraînés avant d'effectuer l'expérience. Tout ceci nous amène à considérer la fraction de Weber de 5 % trouvée comme une borne inférieure pour la discrimination de textures rainurées réelles et carrées. Les rapports de Weber plus importants, trouvés par Nefs et al., pour la période spatiale étalon de 0.25 cm, peuvent s'expliquer par le profil sinusoïdal utilisé, dans lequel les transitions entre les creux et les bosses sont douces. Ce phénomène peut expliquer pourquoi nous avons trouvé une fraction de Weber égale à 9.58 % pour la plus petite période spatiale (0.25 cm) lorsque Nefs et al. ont trouvé 11.8 % pour un profil sinusoïdal. Ainsi, cette valeur peut être considérée comme la borne supérieure pour la discrimination de textures rainurées réelles et carrées.

Ces résultats indiquent donc que le rapport de Weber de 9% trouvé dans notre expérience est proche du rapport d'une texture réelle équivalente finement rainurée et avec un profil carré (c'est-à-dire avec des rainures de faible profondeur). Cependant pour réduire ce rapport, nous pouvons proposer quelques pistes de conception.

*Indications de conception :*

Ce qui semble être important pour la simulation de surfaces rainurées, c'est la transition entre les creux et les bosses simulés. Notre hypothèse est que des transitions brusques entre les creux et les bosses simulés permettraient de réduire le rapport de Weber. De cette manière, le rapport que nous avons mesuré dans l'expérience apparaît être influencé par la forme de la modulation

d'amplitude de la surface rainurée simulée. Le passage en front montant de la partie glissante (faible coefficient de frottement) à la partie bloquante (fort coefficient de frottement), ralentit le mouvement du doigt, ce qui est perçu comme une transition de niveau. Cependant, cette transition est différente de la sensation procurée par des rainures réelles très aiguës, comme dans l'expérience de Morley et al. où les creux ne pouvaient pas être touchés. Ce qui en résulte, c'est que le passage d'un cran à un autre est plus facile à détecter dans leur expérience.

Nous pouvons penser que le coefficient de frottement de la plaque au repos, c'est-à-dire sans vibration, peut aussi avoir une influence sur l'habileté des sujets à distinguer des différences entre les périodes spatiales. En effet, le passage d'une surface avec un fort coefficient de frottement à une surface très glissante (effet squeeze film) est plus facile à distinguer que celui d'une surface avec un faible coefficient de frottement à la même surface très glissante. Nous ne connaissons pas la rugosité des échantillons utilisés par Nefs et al., mais la faible rugosité de notre plaque au repos ( $R_a = 0.6 \mu m$ ) pourrait être désavantageuse pour la discrimination de la période spatiale simulée.

A partir de ces considérations, nous pouvons mettre à jour les trois points suivants qui permettraient d'améliorer la discrimination du JND pour les dispositifs tactiles à frottement variable :

- Le frottement moyen de la surface au repos devrait être aussi important que possible afin de procurer une transition franche entre les zones de frottement et les zones de glissement.
- L'amplitude de vibration de la plaque vibrante doit être aussi grande que possible afin d'obtenir une bonne sensation de glissement.
- La forme de la modulante de l'amplitude de vibration peut être optimisée de façon à simuler des transitions brusques entre les creux et les bosses.

De cette étude, il ressort que les utilisateurs peuvent effectivement discriminer des textures rainurées carrées avec un dispositif tactile à frottement variable. Le rapport de Weber demeure constant sur l'ensemble des surfaces virtuelles évaluées et reste proche de la fraction de Weber de surfaces rainurées réelles. Cette expérience nous a permis de mieux comprendre les dispositifs basés sur le principe du frottement variable, ce qui nous a amenés à apporter des indications de conception pour les améliorer.

## 4.3 Conclusion

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons établi un état de l'art des expériences psychophysiques réalisées dans le cadre de l'évaluation des dispositifs tactiles, à partir de la classification établie dans le chapitre 1. Nous avons vu, entre autre, que les évaluations effectuées sur des dispositifs basés sur la modification du coefficient de frottement montrent ce qu'il est possible de simuler avec le frottement variable, mais ne permettent pas de savoir jusqu'à quel point ces dispositifs sont capables de reproduire la réalité.

Nous nous sommes donc inspirés d'un protocole qui compare les performances des utilisateurs sur le dispositif haptique avec celles des utilisateurs sur des échantillons réels, en mesurant les seuils différentiels.

L'expérience que nous avons menée montre que les rapports de Weber moyens mesurés sur la plaque tactile pour des périodes spatiales étalon de 0.25, 0.35, 0.5 et 1.0 cm sont constants et égaux à environ 9 %. Cette valeur est comprise entre le rapport de weber de 5 % trouvé dans la littérature pour des textures rainurées réelles à profil carré très aiguë et le rapport de Weber de 11.8 % trouvé pour un profil sinusoïdal avec une période spatiale de 0.25 cm. Ce résultat indique donc que le rapport de Weber que nous avons trouvé avec notre dispositif est proche du rapport de Weber d'une texture réelle équivalente finement rainurée avec un profil carré.

Ainsi, cette étude nous a permis de valider des motifs très simples de textures dont l'élaboration ne nécessitait qu'un capteur de position unidirectionnel. Cependant, l'ajout d'un capteur permettant la mesure de la position du doigt dans les deux dimensions, ainsi que les multiples possibilités de signaux de modulation de l'amplitude de vibration ouvrent le champ à des simulations de différents types de textures fines et complexes.



# Conclusion

Notre travail visait à concevoir un nouveau dispositif tactile capable de simuler des textures fines.

En premier lieu, nous avons regroupé et structuré les principaux résultats de la physiologie sensorielle, de la psychologie cognitive, de l'ergonomie et de la biomécanique, requis pour la compréhension du toucher de texture. Cette synthèse très multidisciplinaire nous a permis de nous rendre compte de la complexité du toucher et d'aboutir à une compréhension d'ensemble des mécanismes impliqués. Ces résultats ont en outre permis de dégager des points essentiels pour l'élaboration du cahier des charges. Par la suite, nous avons exposé des exemples d'illusions tactiles utilisées pour la conception de stimulateurs tactiles. Ces exemples nous ont montré qu'il n'était pas nécessaire que les dispositifs tactiles reproduisent la réalité dans ses moindres détails, mais que le but est d'obtenir la meilleure illusion possible pour leurrer l'utilisateur. Ceci nous a amenés à présenter des stimulateurs tactiles adaptés à chaque échelle du toucher. Nous avons vu que la simulation de la forme peut être effectuée grâce à l'exploitation du glissement ou par orientation du bout du doigt et que la simulation de la mollesse peut être simulée en contrôlant le taux de croissance de l'aire de contact. Quant à la simulation de textures, elle consiste à reproduire des sensations en générant les forces appropriées via le dispositif tactile. La simulation de textures fait donc appel à diverses technologies d'actionneurs en fonction de l'intégration voulue pour le dispositif (approche discrète ou continue) et du mode d'interaction désiré (indentation normale, étirement latéral, frottement..). L'approche discrète permet l'affichage de forme par indentation normale, la stimulation directe des mécanorécepteurs par des dispositifs vibrotactiles ou encore la simulation de contraintes de cisaillement. Quant à l'approche continue, elle permet de s'affranchir des problèmes d'intégration des dispositifs discrets, riches spatialement, en proposant une stimulation riche temporellement, qui tient compte de la position du doigt de l'utilisateur.

Les dispositifs continus à frottement variable ont particulièrement retenu notre attention puisqu'ils offrent la possibilité de simuler des textures très fines de différentes rugosités et qu'ils permettent de laisser libre cours au mouvement latéral d'exploration du doigt. D'autre part, dans le cas du toucher actif de textures où l'acuité spatiale du doigt atteint des niveaux inférieurs au millimètre, l'utilisation de dispositifs du type continu permet d'éviter des problèmes d'intégration et de satisfaire aux exigences ergonomiques en terme d'espace de travail. Ainsi, dans un deuxième chapitre, nous avons cherché à déterminer le potentiel d'une méthode qui simule ce frottement variable par stimulation vibrotactile haute fréquence. Le frottement variable est obtenu en faisant passer la surface d'un état rugueux à un état glissant. Cet état glissant, est obtenu pour quelques dizaines de kiloHertz et pour quelques micromètres d'amplitude. Après avoir conçu un actionneur capable d'obtenir l'effet glissant, constitué d'un transducteur de Langevin sur lequel est collé un disque, nous nous sommes donc attachés à quantifier cet effet en fonction des paramètres physiques qui rentrent en jeu dans la perception de la rugosité et du glissement. Les expériences qui ont été menées ont permis de quantifier la sensation perçue et de démontrer que l'orientation relative des rainures d'empreintes et de la texture influe sur le frottement perçu.

La question que nous nous sommes ensuite posée revient à se demander si nous sommes capables de reproduire la richesse spatiale d'une texture, indépendamment de la texture initiale qui recouvre l'actionneur, pour pouvoir simuler des surfaces de rugosité paramétrable. Un moyen consiste à prendre en compte l'aspect spatio-temporel du mouvement, en synchronisant les stimuli sur la position de la pulpe du doigt. Pour réaliser ce contrôle, nous avons utilisé le stator d'un moteur piézoélectrique associé à un capteur de position. L'alternance entre sensations glissantes et bloquantes nous a permis de simuler des textures virtuelles périodiques. Ensuite, l'expérience de comparaison entre textures réelles et virtuelles nous a donné des résultats encourageants nous permettant de valider le principe.

Toutefois, étant donné que le faible espace d'exploration semble être un facteur limitant pour la perception de textures en toucher actif, nous nous sommes donc proposés dans le troisième chapitre de concevoir un dispositif compact et de plus grande taille, capable de modifier les conditions de frottement entre le doigt et la surface explorée. Dans une étude préliminaire, nous nous sommes intéressés aux conditions d'obtention de l'effet de lubrification active et de l'effet "squeeze film" afin de comprendre quel serait l'effet responsable de la sensation glissante précédemment identifiée. L'étude sur la lubrification active ne nous a pas permis de conclure sur



---

l'efficacité de ce phénomène d'interaction par rapport au paramètre amplitude de vibration. Par contre, une expérience assez simple avec un pot vibrant magnétique, nous a engagés à ne pas considérer ce phénomène comme prépondérant pour expliquer l'effet glissant. Nous avons donc préféré utiliser pour notre dimensionnement le modèle de l'effet "squeeze film" qui nous a donné des conditions d'obtention conformes à nos expériences.

Par la suite, nous avons cherché à dimensionner notre propre dispositif afin qu'il soit capable de reproduire cet effet, tout en prenant en compte des considérations ergonomiques et d'encombrement. Le résultat est un résonateur plan qui est un assemblage de céramiques piézo-électriques collées sur un résonateur plan. Une étude analytique puis une étude numérique nous ont permis d'encadrer la demi-longueur d'onde du mode de flexion à imposer à la plaque de sorte à satisfaire aux conditions de fréquence et d'amplitude préconisées par l'étude de l'effet "squeeze film". Ceci nous a conduits au choix des dimensions finales de la plaque et des céramiques. Pour finir, des expériences menées sur le prototype nous ont permis de vérifier ses performances. L'amplitude de vibration a été mesurée et la perception glissante a été évaluée quantitativement.

L'expérience qui a été menée dans le troisième chapitre a montré que notre dalle tactile était capable de procurer plusieurs niveaux de perception du frottement. Cependant, cette première évaluation n'est pas à notre avis suffisante pour connaître les performances de notre dispositif. L'objectif du quatrième chapitre fut donc de choisir et d'effectuer une évaluation pour déterminer les performances du dispositif dans le cadre de la simulation de périodes spatiales. Les périodes spatiales ont été réalisées suivant la même méthode que celle décrite au chapitre deux. Cette méthode consiste à mesurer les seuils différentiels sur la surface "virtuelle" pour quatre périodes spatiales étalons et pour une amplitude de vibration maintenue constante. Le but étant de comparer le rapport de Weber de chaque période spatiale simulée avec le rapport de Weber d'une surface rainurée réelle équivalente de sorte à mesurer l'écart entre la simulation et la réalité. Les résultats ont montré que le rapport de Weber demeure constant sur l'ensemble des surfaces virtuelles évaluées et reste proche du rapport de Weber de surfaces rainurées réelles. Cette expérience nous a donc permis de valider la simulation de motifs unidirectionnels. Par conséquent, ce type de dispositif à frottement variable semble être prometteur pour simuler des textures virtuelles d'autant plus que son faible encombrement et sa taille modulable nous permettraient de l'intégrer dans un ordinateur de bureau, voire un ordinateur portable dans lequel le TouchPad serait équipé d'un retour tactile.

A l'issue de ces travaux, les pistes de recherche sont diverses et concernent principalement les possibilités de rendu de texture et l'évaluation de notre plaque tactile.

L'ajout d'un capteur permettant la mesure de la position du doigt dans les deux dimensions ainsi que le choix de nouveaux signaux de modulation ouvre un champ d'exploration considérable pour la simulation de textures fines et complexes. Effectivement, les dimensions de la plaque ont été choisies pour permettre une exploration dans le plan en respect du geste de toucher actif. Il est donc nécessaire de capter à tout instant la position du doigt dans ce plan. Ce faisant, il sera possible de simuler des textures plus complexes, présentant des anisotropies directionnelles. Un effort doit également être porté sur la génération des consignes sur l'interface. En particulier, il serait intéressant de mesurer le coefficient de frottement relatif entre les textures réelles que l'on souhaite reproduire et le doigt, en fonction de la position. Ceci afin de pouvoir transposer ce coefficient sur la plaque tactile, puisque la modulation d'amplitude de l'onde de flexion sert en fait à moduler le coefficient de frottement sur la plaque.

D'autre part, afin de rendre la texture simulée plus réaliste, il serait intéressant de prendre en compte le sens du mouvement puisque nous savons que la sensation perçue par l'utilisateur change s'il déplace son doigt vers l'avant ou vers l'arrière. C'est, par exemple, le cas typique des textures fibreuses où la sensation passe de lisse à frottant si nous nous déplaçons dans le sens du poil ou dans le sens contraire. Ceci peut être réalisé au moyen de deux solutions qui pourraient éventuellement être associées :

- changer la forme d'onde de la modulante suivant le sens et la direction du mouvement, ce qui sous-entend d'adapter le coefficient de frottement selon le sens du mouvement,
- profiter de l'orientation relative des rainures d'empreintes et du revêtement initial de la plaque pour augmenter la rugosité perçue sans trop augmenter la rugosité de la plaque.

De plus, dans notre vie de tous les jours, le toucher et la vue sont co-localisés pendant les multiples tâches d'exploration que nous effectuons. La perception des textures est ainsi guidée et influencée par la vue. Ainsi, quelques propriétés des textures telles que le frottement, la rugosité ou l'adhérence peuvent être déduites à partir de l'information visuelle [Hel82, GS03] qui à son tour influence la façon de toucher la surface. Notre dispositif ne permet pas, pour l'instant, de travailler de manière co-localisée, ce qui implique - par exemple dans une application de touch-pad avec retour tactile - que l'utilisateur qui reçoit les informations haptiques et visuelles suivant différents canaux, est obligé de faire l'effort d'intégration [IYNK01]. L'intérêt nous paraît donc évident de développer à l'avenir un dispositif transparent à frottement variable. Ceci pourrait

---

être réalisé au moyen d'une plaque de verre actionnée à ses extrémités par des céramiques piézoélectriques.

Enfin, dans le but d'élargir la gamme de textures simulables, nous pouvons aussi envisager de coupler notre dalle tactile avec une plateforme à retour kinesthésique, dans le but d'améliorer la simulation tactile d'objets en superposant l'information de texture à celle de forme. Nous évoquons ici le problème du couplage des sensations non évident à reproduire technologiquement et qui constitue un sujet large et crucial, puisque le toucher humain se nourrit d'informations pourvues par l'ensemble du système somesthésique.



# Glossaire

$A$	Aire de contact du doigt,
$b$	largeur de la plaque,
$C$	La compliance tangentielle,
$E_e$	Module de Young de l'épiderme,
$f_c$	La fréquence critique,
$F_f$	La force normale de contact appliquée par une personne qui explore la surface,
$F_n$	Force normale imposée par le doigt,
$F_s$	Force imposée par l'effet squeeze film,
$h$	L'épaisseur du film,
$H$	L'épaisseur du film $h$ normalisée,
$h_e$	Amplitude des crêtes épidermiques,
$h_p$	Épaisseur de la couche de céramiques constituant le monomorphe,
$h_i$	Épaisseur de la couche d'un matériau passif, le substrat aussi appelé résonateur mécanique,
$h_r$	Les irrégularités de la surface de la plaque (la rugosité),
$h_{vib}$	Amplitude de vibration,
$k_n, k_t$	Élasticité normale et tangentielle d'une crête épidermique,
$L$	Période spatiale des empreintes,
$l_0$	la longueur en contact avec le bout du doigt,
$\mathcal{L}$	Longueur de la plaque,
$n$	La constante polytropique,
$p$	La pression entre la plaque et le doigt,
$P$	Pression $p$ normalisée,
$p_0$	La pression atmosphérique,
$P_f$	la pression moyenne normalisée imposée par le doigt pendant une tâche d'exploration,

$Q_m$	Facteur de qualité mécanique des céramiques,
$Q$	Facteur d'amplification dynamique,
$V$	Le volume d'air piégé entre les deux surfaces,
$V_t$	Vitesse imposée par l'utilisateur,
$w(t)$	Déplacement sinusoïdal imposée par la plaque mise en vibration,
$W_0$	Amplitude critique pour qu'il y ait séparation,
$\alpha$	Ratio des constantes d'élasticité,
$\beta$	Épaisseur du résonateur sur l'épaisseur des céramiques,
$\Delta x$	Allongement tangentiel,
$\delta_{critique}$	Le déplacement critique,
$\eta$	La viscosité dynamique du fluide,
$\lambda$	Longueur d'onde,
$\frac{\mu'}{\mu}$	Coefficient de frottement relatif,
$\nu_e$	Coefficient de Poisson de l'épiderme,
$\mu_0$	Le coefficient de frottement maximal à l'interface crête-substrat,
$\rho_p$	Masse volumique des céramiques,
$\rho_i$	Masse volumique du résonateur,
$\sigma$	Le "squeeze number",
$\Psi$	Variable adimensionnelle représentant la pression par l'épaisseur du film ( $PH$ ),
$\omega$	Pulsation de vibration de la plaque,

## Annexe A

# Condition d'obtention de l'effet glissant sur le stator d'un moteur piézoélectrique

Nous allons déterminer la valeur du coefficient de frottement relatif pour le stator du moteur piézoélectrique (MPE) utilisé dans les mêmes conditions qu'au §2.3.1. Nous utiliserons les paramètres du tableau 3.2 ainsi que ceux relatifs au moteur piézoélectrique (Tab. A.1).

Propriétés du moteur piézoélectrique		
Amplitude maximale de vibration	$h_{vib}$	1.5 $\mu\text{m}$
Longueur d'onde	$\lambda$	18.7 mm
Fréquence de résonance	$f_n$	40.5 kHz
Rugosité moyenne	$h_r$	< 0.6 $\mu\text{m}$

TAB. A.1 – Paramètres du moteur piézoélectrique

Nous allons utiliser le même modèle que dans le §b., **à la différence que nous tiendrons aussi compte du mode de flexion du stator**, puisque dans ce cas, le stator ne se déforme pas comme un piston mais selon une onde stationnaire de flexion. Ainsi, à partir de l'Eq. 3.17 donnant l'épaisseur du film entre une plaque animée d'un mouvement de "piston" et un doigt, nous pouvons avoir l'épaisseur du film entre une surface soumise à une onde de flexion et un

doigt :

$$h(x, t) = h_r + h_{vib} \left[ 1 + \cos(\omega_0 t) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \right] + h_e \left[ 1 + \cos\left(\frac{2\pi}{L} x\right) \right] \quad (\text{A.1})$$

où  $\lambda$  représente la longueur d'onde de l'onde orthoradiale qui se propage le long du stator.

De la même manière que pour l'Eq. 3.18, nous obtenons l'expression normalisée de l'équation A.1 :

$$H = 1 + \epsilon \cos(T) \cos(k_{vib} X) + \delta \cos(kX) \quad (\text{A.2})$$

avec un paramètre adimensionnel supplémentaire  $k_{vib}$  tel que  $k_{vib} = \frac{2\pi l_0}{\lambda}$ .

Nous avons ensuite calculé la valeur du "squeeze number",  $\sigma$ , avec les paramètres des tableaux 3.2 et A.1. Les résultats donnent  $\sigma = 20.8$ , ce qui garantit les conditions de validité de l'Eq. 3.21 puisque le "squeeze number" est supérieur à 10.

En suivant la même démarche qu'au §b., la pression à l'intérieur de l'espace entre le doigt et le stator du MPE devient alors :

$$P_\infty = p_0 \frac{(1 + \delta \cos(kX)) \sqrt{(1 + \delta \cos(\frac{k}{2}))^2 + \frac{3}{2}\epsilon^2 \cos^2(\frac{k_{vib}}{2})}}{(1 + \delta \cos(\frac{k}{2})) (1 + \epsilon \cos(T) \cos(\frac{k_{vib}}{2}) + \delta \cos(kX))} \quad (\text{A.3})$$

L'expression de la pression (Eq. A.3), associée aux équations 3.36 et 3.34, nous a permis de simuler l'évolution du coefficient de frottement relatif entre le doigt et le stator. (Fig. A.1)

Les résultats montrent bien une tendance similaire à la réduction du coefficient de frottement relatif, bien que le mode vibratoire soit maintenant différent du mode "piston". En particulier pour une onde d'amplitude  $1.5 \mu\text{m}$ ,  $\frac{\mu'}{\mu}$  est compris entre environ 0.64 et 0.78 pour des rugosités moyennes de surfaces comprises entre  $0.2 \mu\text{m}$  et  $0.6 \mu\text{m}$  (rugosité du scotch collé sur le stator).

Or d'après le chapitre 2, l'aspect glissant est clairement perçu pour une amplitude vibratoire  $h_{vib} \geq 1.5 \mu\text{m}$  sur ce dispositif. Par conséquent, on peut penser que les valeurs  $\frac{\mu'}{\mu}$  comprises entre  $0.6 \mu\text{m}$  et  $0.8 \mu\text{m}$  correspondent bien à un effet glissant.



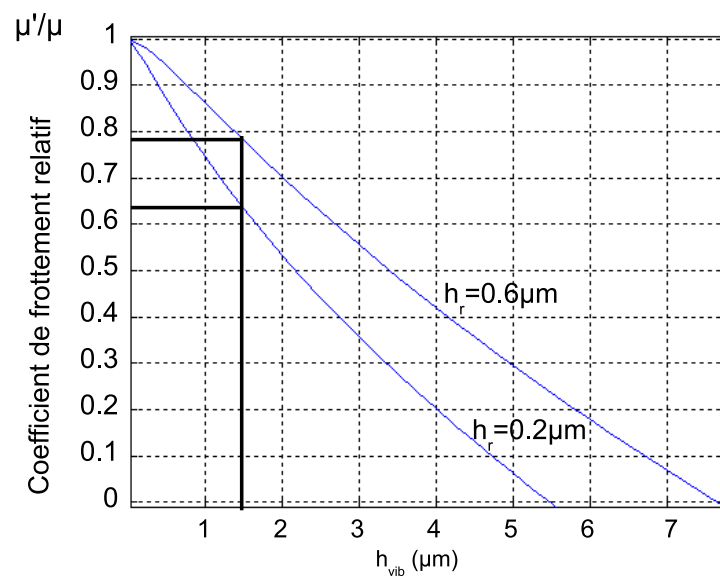


FIG. A.1 – Coefficient de frottement relatif en fonction de l’amplitude de vibration pour  $F_f = 0.5 \text{ N}$  et pour  $h_r = 0.2 \mu\text{m}$  et  $h_r = 0.6 \mu\text{m}$ .



## Annexe B

# Valeur numérique des matériaux

Masse volumique du Cuivre-Béryllium :  $\rho_i = 8250 \text{ kg.m}^{-3}$

Données des céramiques piézoélectriques PZT du type PI-91, de dimensions  $11 \times 9 \times 1 \text{ mm}^3$  commercialisées par Saint-Gobain Quartz, France :

Masse volumique :  $\rho_p = 7410 \text{ kg.m}^{-3}$

Matrice des constantes d'élasticité à champ électrique constant [ $10^{10}\text{N.m}^{-2}$ ] :

$$c^E = \begin{pmatrix} 12.09 & 7.63 & 7.31 & 0 & 0 & 0 \\ & 12.09 & 7.31 & 0 & 0 & 0 \\ & & 11.26 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 3.36 & 0 & 0 \\ & & & & 3.36 & 0 \\ & & & & & 2.23 \end{pmatrix}$$

Matrice des coefficients piézoélectriques [ $\text{C.m}^{-2}$ ] :

$$e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17.1 & 0 \\ -4.9 & -4.9 & 21.4 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



## Annexe C

# Réalisation du monomorphe

### C.1 Dessin de définition de la plaque

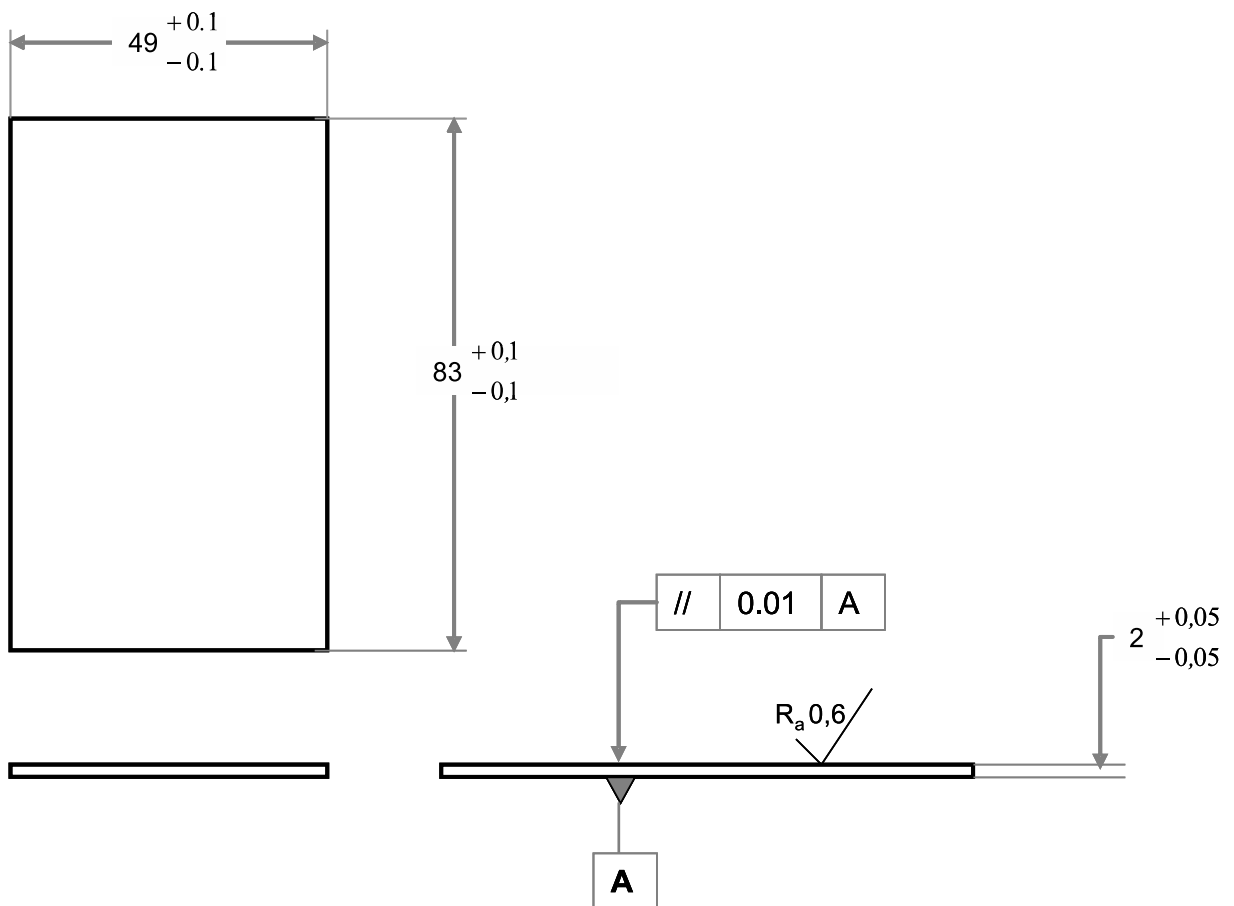


FIG. C.1 – Dessin de définition de la plaque.

## C.2 Schéma d'ensemble

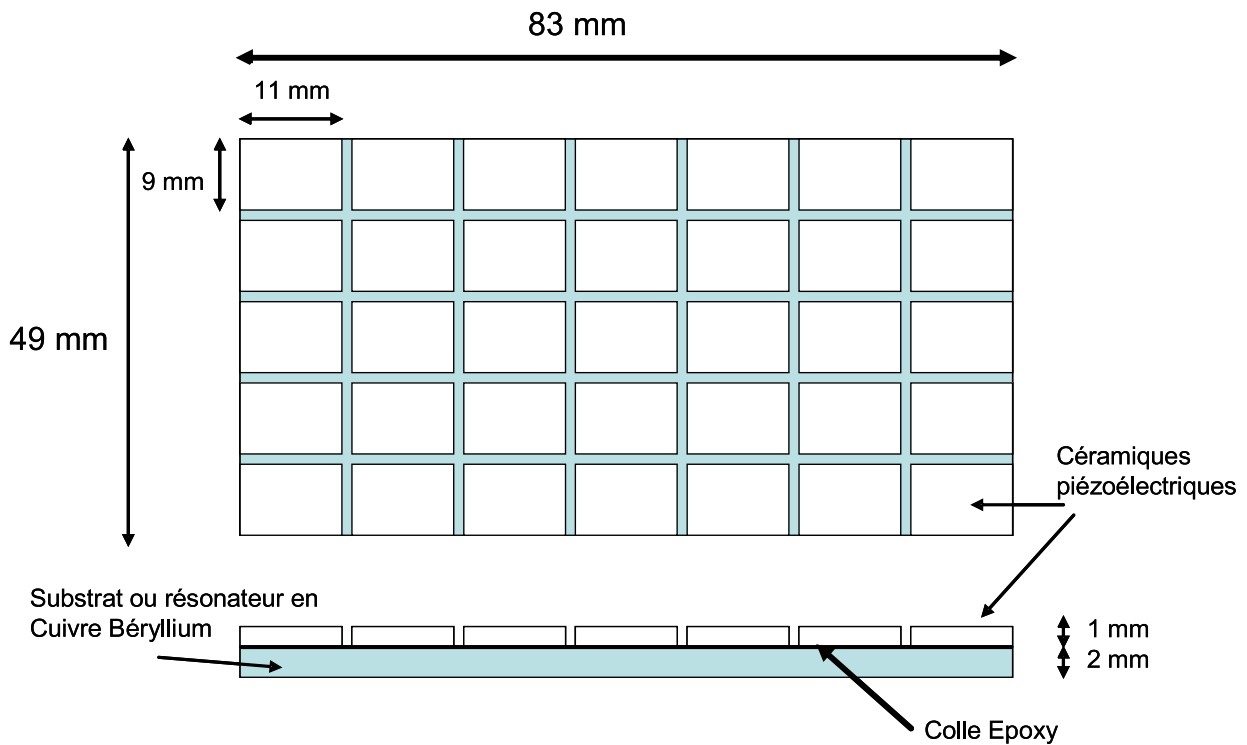


FIG. C.2 – Schéma d'ensemble du monomorphe.

## C.3 Connections

Pour obtenir le mode de flexion  $(x;y)=(8;0)$ , deux solutions de câblage et de polarisation des céramiques s'offrent à nous (Fig. C.3 et Fig. C.4).

Ces câblages ont été mis en oeuvre de façon à pouvoir aussi exciter le mode  $(x;y)=(0;6)$  suivant la largeur en remplaçant l'une des tensions  $Va$  par  $Vb$  pour la première solution ou en remplaçant  $Vb$  par  $Va$  pour la deuxième solution.

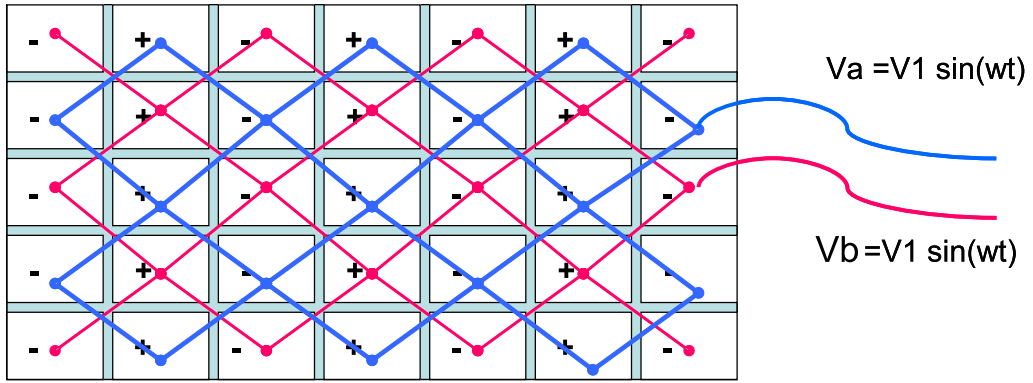


FIG. C.3 – Première solution.

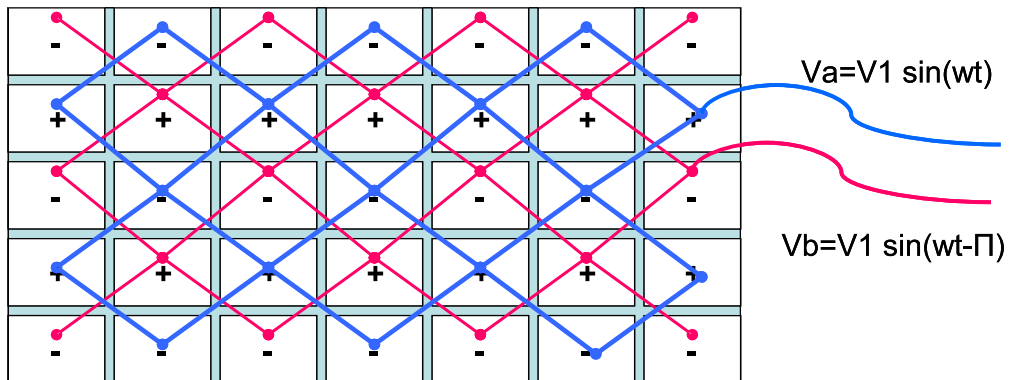


FIG. C.4 – Deuxième solution.





## Annexe D

# Expérience de détermination du seuil différentiel

### D.1 Le seuil différentiel

#### h. Définition du seuil différentiel

La mesure du seuil différentiel nous a parue la mesure la plus adaptée à cette étude, car cette expérience psychophysique renseigne sur la capacité de discrimination d'un sujet dans une situation donnée. Le seuil différentiel (ou seuil de discrimination ou encore "jnd" pour "just noticeable difference") est défini comme la limite des différences perçues et des différences non-perçues entre un stimulus dit standard, gardé fixe au cours de l'expérience, et un stimulus dit variable. Sa détermination est généralement unidimensionnelle, car il est aisé de faire varier la valeur d'un paramètre choisi (comme l'intensité, la fréquence ou la période spatiale) tout en gardant les autres paramètres constants. Ainsi, les seuils différentiels correspondent à des tâches dans lesquelles on cherche à déterminer quelle différence entre deux stimuli de même nature permet de juste les différencier (discrimination).

#### i. Critère pour la détermination du seuil différentiel

La détermination du seuil différentiel d'un individu repose sur une mesure statistique du seuil différentiel obtenu empiriquement au cours des multiples essais d'un protocole expérimental. En effet, puisque l'on cherche via le seuil différentiel à déterminer la limite des capacités du système

sensoriel, les réponses données par le sujet sont toujours entachées d'une certaine variabilité. Un critère couramment utilisé pour définir le seuil différentiel de façon opérationnelle consiste donc à rapporter la valeur limite pour laquelle le sujet est à une réponse correcte dans 75% des essais.

#### **j. Principe de l'expérience**

A chaque essai est présenté en succession un couple de stimuli. L'un est constant pour tous les essais : c'est le stimulus étalon (E). L'autre prend différentes valeurs, plus petites ou supérieures à l'étalon : c'est le stimulus de comparaison (C). Ces différentes valeurs sont présentées dans un ordre au hasard selon la méthode constante (tirage sans remise pour chaque série). La méthode constante est très souvent choisie car c'est la plus conforme au modèle statistique de tirage au hasard d'un échantillon dans une urne. Pour des raisons pratiques (économie), d'autres méthodes sont utilisables.

L'ordre de présentation de l'étalon comparaison peut être constant ou contrebalancé. Les consignes demandent au sujet de dire, par exemple, si le second stimulus est plus grand ou plus petit que le premier. Les réponses telles que "égales" ou "je ne sais pas" sont proscrites. C'est la méthode du choix forcé. Cette méthode permet en principe d'égaliser la fréquence d'utilisation des réponses (Bonnes réponses ou Erreurs).

#### **k. Présentation graphique des résultats de discrimination**

Sur un graphique portant en abscisse les valeurs du stimulus de comparaison et en ordonnée les probabilités de chaque réponse, on ajustera des fonctions psychométriques (Fig. D.1). Comme les réponses  $C > E$  et les réponses  $C < E$  sont complémentaires, il n'est pas nécessaire de répéter les calculs. La fonction psychométrique (logistique) des réponses  $C > E$  est :

Le Point d'Égalisation Subjective (PES) est la valeur du stimulus de comparaison jugée statistiquement égale à celle de l'étalon ; autrement dit, la valeur du stimulus de comparaison pour laquelle il y a autant de réponses  $C > E$  que de réponses  $C < E$ . On calcule ensuite l'erreur constante (EC) définie comme la différence entre le PES et la valeur de l'étalon (E). Enfin, pour calculer le seuil différentiel (SD), on détermine la valeur du stimulus de comparaison qui dans 75% des cas est jugée plus grande que l'étalon.

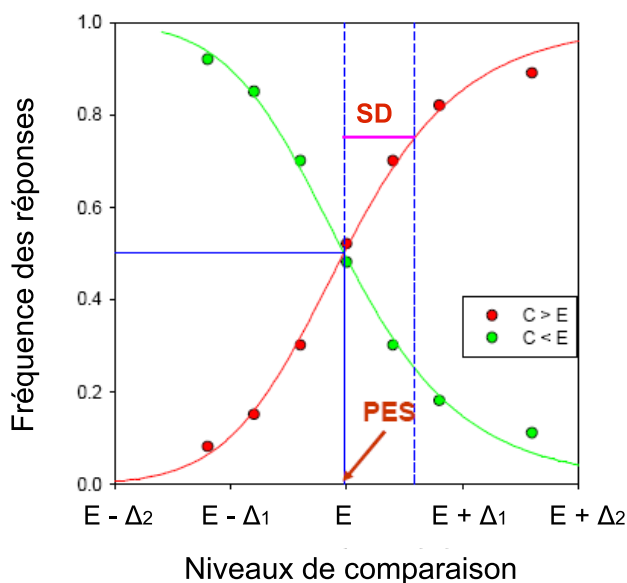


FIG. D.1 – Présentation graphique des résultats de discrimination. L'erreur constante n'est pas montrée car elle est pratiquement nulle dans cet exemple.

## D.2 Le rapport de Weber

Dans différents domaines de la perception, le seuil différentiel augmente avec le niveau de base de la stimulation (avec le stimulus étalon). Selon la loi de Weber-Fechner (Eq. D.1), le ratio de ces deux quantités est constant :

$$\frac{SD}{PES} = k \quad (\text{D.1})$$

où PES est l'intensité de la stimulation de base, SD est le seuil différentiel, c'est-à-dire petit incrément qui fait qu'une différence est perceptible entre la stimulation considérée et la stimulation de base et  $k$  est une constante dite fraction de Weber.

Cette loi est vérifiée dans beaucoup de domaines de la perception (par exemple dans la perception de la hauteur tonale, de l'intensité lumineuse, etc) mais on observe parfois des écarts lorsqu'on élargit la gamme explorée.

## D.3 Analyse des résultats

A partir des données brutes, nous calculons pour chaque participant le pourcentage d'essais pour lesquels les participants décident que la texture virtuelle de comparaison ( $C$ ) a une plus grande période spatiale que la texture virtuelle étalon ( $E$ ). Sur un graphique portant en abscisse

les valeurs du stimulus de comparaison et en ordonnée les probabilités de chaque réponse, nous allons ajuster les fonctions psychométriques trouvées. Le seuil différentiel est obtenu pour une valeur où 75 % des échantillons de comparaison sont jugés plus grands que l'échantillon étalon. Une transformation en logits<sup>9</sup> peut être appliquée à la fonction psychométrique en supposant que cette dernière suive l'équation D.2 [GS66] :

$$p(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{D.2})$$

où  $p$  représente la fréquence des réponses.

La fonction psychométrique transformée est donc supposée être une ligne droite d'équation [Lin92] :

$$\text{logit}(p) = aX + b \quad (\text{D.3})$$

où  $a$  et  $b$  sont déterminés empiriquement et où la moyenne (PES) est :  $PES = -b/a$

Le seuil différentiel et la fraction de Weber sont ensuite calculés à partir de la fonction logit et des valeurs de  $a$  et  $b$ .

---

<sup>9</sup> $\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$

# Bibliographie

- [Als] <http://fr.wikipedia.org> Article : Électrisation (santé).
- [AYS98] N. Asamura, N. Yokoyama, and H. Shinoda. The vibrations of texture. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 18(6) :32–37, 1998.
- [BBM<sup>+</sup>07] M. Biet, L. Boulon, F. Martinot, F. Giraud, and B. Lemaire-Semail. Using an ultrasonic transducer : Evidence for an anisotropic deprivation of frictional cues in microtexture perception. In *WorldHaptics, The Second Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 385–390, March 2007.
- [BFSB04] F. Barbagli, A. Frisoli, K. Salisbury, and M. Bergamasco. Simulating human fingers : a soft finger proxy model and algorithm. In *in proc. of Haptics Symposium 2004*, volume 84, pages 9–17, 2004.
- [BGLS06] M. Biet, F. Giraud, and B. Lemaire-Semail. New tactile device using piezoelectric actuators. In *Actuator*, pages 567–570, June 2006.
- [BGLSre] M. Biet, F. Giraud, and B. Lemaire-Semail. Squeeze film effect for the design of an ultrasonic tactile plate. *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectric and Frequency Control*, à paraître.
- [BGMLS06] M. Biet, F. Giraud, F. Martinot, and B. Lemaire-Semail. A piezoelectric tactile display using travelling lamb wave. In *EuroHaptics 2006*, pages 567–570, July 2006.
- [BGVC88] 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.*, 84(5) :1680–1694, 1988.
- [BH03] S.J. Bensmaïa and M. Hollins. The vibrations of texture. *Somatosensory and Motor Research*, 20 :33–43, 2003.

- [BJ94] R.W. Van Boven and K.O. Johnson. The limit of tactile spatial resolution in humans : Grating orientation discrimination at the lip, tongue and finger. *Neurology*, 44 :2361–2366, 1994.
- [BKHSJ05] M. Benali-Khoudja, M. Hafez, A. Sautour, and S. Jumpertz. Towards a new tactile language to communicate emotions. In *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, August 2005.
- [BKRS70] J.C. Bliss, M.H. Katcher, C.H. Rogers, and R.P. Shepard. Optical-to-tactile image conversion for the blind. *IEEE Transactions on Man Machine Systems*, 11(1) :58–65, 1970.
- [BSSR02] A. Bicchi, E.P. Scilingo, N. Sgambelluri, and D. De Rossi. Haptic interfaces based on magnetorheological fluids. In *in proc. EuroHaptics 2002*, 2002.
- [CJ92] C.E. Connor and K.O. Johnson. Neural coding of tactile texture : Comparison of spatial and temporal mechanisms for roughness perception. *J. of Neuroscience*, 12 :3414–3426, 1992.
- [CJ00] J.C. Craig and K.O. Johnson. The two-point threshold : Not a measure of tactile spatial resolution. *Current Directions in Psychological Science*, 9(1) :29–32,, 2000.
- [Con01] C.M. Conway. Tactile sequential learning : Artificial grammar learning by touch. *Master of Arts degree in Psychology, at Southern Illinois University at Carbondale*, 2001.
- [CS01] C.J. Cascio and K. Sathian. Temporal cues contribute to tactile perception of roughness. *J. of Neuroscience*, 21 :5289–5296, 2001.
- [CYM05] F. Chia-Yu and O. Manny. Direct measurement of index finger mechanical impedance at low force. In *in proc. IEEE/Worlhaptics 2005*, pages 657–659, 2005.
- [DFZ<sup>+</sup>05] K. Drewing, M. Fritschi, R. Zopf, M. Ernst, and M. Buss. First evaluation of a novel tactile display exerting shear force via lateral displacement. *ACM Trans. on Applied Perception*, 2(2) :118–131, 2005.
- [DH05] H. Dostmohamed and V. Hayward. Trajectory of contact region on the fingerpad gives the illusion of haptic shape. *Experimental Brain Research*, 164 :387–394, 2005.
- [Dor89] C.L. Van Doren. A model of spatiotemporal tactile sensitivity linking psychophysics to tissue mechanics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85 :2065–2079, 1989.

- 
- [DPV87] C.L. Van Doren, D.G. Pelli, and R.T. Verillo. A device for measuring tactile spatiotemporal sensitivity. *J. Acoust. Soc. Am.*, 81(6) :1906–1916, 1987.
- [dSZ99] A. Gomes de Sa and G. Zachmann. Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computer Graphics*, 23(3) :389–403, 1999.
- [EG01] E. Ahissar E. Gamzu. Importance of temporal cues for tactile spatial-frequency discrimination. *The J. of Neuroscience*, 21(18) :7416–7427, 2001.
- [E.O64] E.O.J. Salbu. Compressible squeeze films and squeeze bearings. *ASME Journal of Basic Engineering*, 86 :355–366, 1964.
- [FDZ<sup>+</sup>04] M. Fritschi, K. Drewing, R. Zopf, M. Ernst, and M. Buss. Tactile feedback systems. In *In Workshop at the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, 2004.
- [Fer02] J.-C. Ferniot. *Translateur piézo-électrique à onde stationnaire : modélisation théorique et caractérisation expérimentale*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, Juin 2002.
- [FJ82a] A. W. Freeman and K. O. Johnson. Cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey : Temporal discharge pattern evoked by vibration, and a receptor model. *Journal of Physiology (London)*, 323 :21–41, 1982.
- [FJ82b] A. W. Freeman and K. O. Johnson. A model accounting for effects of vibratory amplitude on responses of cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey. *Journal of Physiology (London)*, 323 :43–64, 1982.
- [Fly97] A.M. Flynn. *Piezoelectric Ultrasonic Micromotors*. PhD thesis, MIT Artificial Intelligence Laboratory, December 1997.
- [FO99] K. Fujita and Y. Oyama. Control strategies in human pinch motion to detect the hardness of an object. In *in Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, pages 682–686, 1999.
- [FO01] K. Fujita and H. Ohmori. A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control. In *in proc. 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, pages 78–82, 2001.
- [Fun93] Y.C. Fung. *Biomechanics : mechanical properties of living tissue*. Springer-Verlag, New York, 1993.

- [Gar06] L. Garbuio. *Etude du phénomène de lubrification électroactive à l'aide d'actionneurs piézoélectriques. Application à la réduction des forces de frottement sec dans un moteur à combustion interne*. PhD thesis, INPT, France, 2006.
- [Gir02] F. Giraud. *Modélisation causale et commande d'un actionneur piézo-électrique à onde progressive*. PhD thesis, USTL, France, 2002.
- [GPR<sup>+</sup>07] L. Garbuio, F. Pigache, J.F. Rouchon, B. Lemaire-Semail, and B. Nogarede. Ultrasonic friction drive for passive force feedback devices. *Electromotion international scientific quarterly*, 14 :55–66, April-June 2007.
- [GRDLT] <http://www.roblesdelatorre.com> G. Robles-De-La-Torre.
- [Gre04] B. G. Green. Temperature perception and nociception. *J. of Neurobiology*, 61(1) :13–29, 2004.
- [GS66] D.M. Green and J.A. Swets. *Signal detection theory and psychophysics*. New York, Wiley. (3rd ed. 1988, Los Altos, CA : Peninsula), 1966.
- [GS95] R.J. Gulati and M.A. Srinivasan. Human fingerpad under indentation i : static and dynamic force response. In *Advances in Bioengineering, proceedings of the ASME*, volume 29, 1995.
- [GS03] S. Guest and C. Spence. Tactile dominance in speeded discrimination of pilled fabric samples. *Experimental Brain Research*, 150(0) :201–207, 2003.
- [GT05] G.J. Gerling and G.W. Thomas. Importance of temporal cues for tactile spatial-frequency discrimination. In *Human Factors and Ergonomics Soc. Annual Meeting*, pages 7416–7427, Orlando 2005.
- [GTB02] A.H. Gosline, E. Turgay, and I. Brouwer. Haptic illusions : What you feel isn't always what you get. In *in Proceedings of Human Interface Technologies*, pages 19–22, 2002.
- [Hay07] V. Hayward. *Haptic Shape Cues, Invariants, Priors, and Interface Design*. In "Human Haptic Perception - Basics and Applications". M. Grunwald (ed.), Birkhauser Verlag., 2007.
- [HBKY00] M. Hollins, S. Bensmaia, K. Karlof, and F. Young. Individual differences in perceptual space for tactile textures : evidence from multidimensional scaling. *Perception and Psychophysique*, 62 :1534–1544, 2000.



- 
- [HBW01] M. Hollins, S. Bensmaïa, and S. Washburn. Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures. *Somatosens. Mot. Res.*, 18 :253–262, 2001.
- [HCH00] V. Hayward and M. Cruz-Hernandez. Tactile display device using distributed lateral skin stretch. *Proceedings of the Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems Symposium, Proc. ASME*, DSC-69-2 :1309–1314, 2000.
- [Hel82] M. A. Heller. Visual and tactual texture perception : Intersensory cooperation. In *Perception and Psychophysics*, 31(4) :339–344, 1982.
- [HH93] K. Hirota and M. Hirose. Development of surface display. In *In Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pages 256–262, 1993.
- [HH97] A. Z. Hajian and R. D. Howe. Identification of the mechanical impedance at the human finger tip. *ASME J. of Biomechanical Eng.*, 119(1) :109–114, 1997.
- [HSG00] Y. Hatwell, A. Streri, and E. Gentaz. *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*. Paris : Presses Universitaires de France. Amsterdam, NL : John Benjamins Publishers, 2000.
- [htta] <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Haptics/ProjectOverview>.
- [httb] <http://ftp.edi.fmph.uniba.sk/jaskova/IKTH/tema02/optacon.jpg>.
- [Imm] Immersion. In <http://www.immersion.com>.
- [IMVO05] R.J. Webster III, T.E. Murphy, L.N. Verner, and A.M. Okamura. A novel two-dimensional tactile slip display : design, kinematics and perceptual experiments. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(2) :150–165, 2005.
- [IS06] T. Iwamoto and H. Shinoda. Two-dimensional scanning tactile display using ultrasound radiation pressure. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 57–61, 2006.
- [IYNK01] H. Iwata, H. Yano, F. Nakaizumi, and R. Kawamura. Project feelex : Adding haptic surface to graphics. In *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, pages 469–476, 2001.
- [JH92] K. O. Johnson and S. S. Hsiao. Neural mechanisms of tactual form and texture perception. *Annual Review of Neuroscience*, 15 :227–250, 1992.
- [Joh01] K. O. Johnson. The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Current Opinion in Neurobiology*, 11(4) :455–461, 2001.

- [JV83] R. S. Johansson and A. B. Vallbo. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in Neuroscience*, 6(1) :27–32, 1983.
- [JZBD03] D. L. Jindrich, Y. Zhou, T. Becker, and J.T. Dennerlein. Non-linear viscoelastic models predict fingertip pulp force-displacement characteristics during voluntary tapping. *Journal of Biomechanics*, 34(4) :497–503, 2003.
- [KBL06] T. Kaaresoja, L.M. Brown, and J. Linjama. Snap-crackle-pop : Tactile feedback for mobile touch screens. In *Eurohaptics 2006*, July 2006.
- [KKSK06] S.C. Kim, K.U. Kyung, J.H. Sohn, and D.S. Kwon. An evaluation of human sensibility on perceived texture under variation of vibrotactile stimuli using a tactile display system. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 429–436, March 2006.
- [KOR06] Y. Kim, I. Oakley, and J. Ryul. Design and psychophysical evaluation of pneumatic tactile display. In *SICE-ICASE 2006, International Joint Conference*, pages 1933–1938, Oct. 18-21 2006.
- [KS02] P. Kammermeier and G. Schmidt. Application-specific evaluation of tactile array displays for the human fingertip. In *International Conference on Intelligent Robots and System, 2002. IEEE/RSJ*, volume 3, pages 2937–2942, 30 Sept.-5 Oct. 2002.
- [KTA07] M. Kocsis, H.Z. Tan, and B.D. Adelstein. Design and psychophysical evaluation of pneumatic tactile display. In *Second Joint EuroHaptics Conference, and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007*, pages 348–353, 22-24 March 2007.
- [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.
- [LAP99] J.H. Lee, I.S. Ahn, and J.O. Park. Design and implementation of tactile feedback device using electromagnetic type. In *In Intelligent Robots and Systems IROS '99*, volume 3, pages 1549–1554, 1999.
- [Led83] S. J. Lederman. Tactual roughness perception : Spatial and temporal determinants. *Canadian J. of Psychology*, 37 :498–511, 1983.
- [Lel02] S. Leleu. *Amortissement actif des vibrations d'une structure flexible de type plaque à l'aide de transducteurs piézoélectriques*. PhD thesis, ENS Cachan, France, 2002.

- 
- [LHKH04] S.J. Lederman, R.D. Howe, R.L. Klatzky, and C. Hamilton. Force variability during surface contact with bare finger or rigid probe. *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04)*, pages 154–160, 2004.
- [Lin92] S. Link. *The wave theory of difference and similarity*. Hillsdale (N.J.), Lawrence Erlbaum Ass., 1992.
- [LK87] S. J. Lederman and R. L. Klatzky. Hand movements : a window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3) :342–368, 1987.
- [LK93] S. J. Lederman and R. L. Klatzky. Extracting objects properties through haptic exploration. *Acta Psychologica*, 84 :29–40, 1993.
- [LKK00] S. Louw, A.M.L. Kappers, and J.J. Koenderink. Haptic detection thresholds of gaussian profiles over the whole range of spatial scales. *Experimental Brain research*, 132 :369–374, 2000.
- [LL86] L. Landau and E. Lifchitz. *Theory of Elasticity, course of theoretical physics*. Butterworth-Heinemann, 1986.
- [LLW82] S.J. Lederman, J.M. Loomis, and D.A. Williams. The role of vibration in the tactual perception of roughness. *Percept. Psychophys*, 32 :109–116, 1982.
- [Loo79] J.M. Loomis. An investigation of tactile hyperacuity. *Sens Processes*, 3(4) :289–302, 1979.
- [LPH07] V. Levesque, J. Pasquero, and V. Hayward. Braille display by lateral skin deformation with the stress tactile transducer. In *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, pages 115–120, March 2007.
- [LTSC02] R.W. Lindeman, J.N. Templeman, J.L. Sibert, and J.R. Cutler. Handling of virtual contact in immersive virtual environments : Beyond visuals. *Virtual Reality*, 6(3) :130–139, October, 2002.
- [LW86] R.H. LaMotte and J. Whitehouse. Tactile detection of a dot on a smooth surface : peripheral neural events. *J. of Neurophysiology*, 56(4), 1986.
- [MABC06] F. Martinot, H. Aladine, M. Biet, and C. Chaillou. Mechanical responses of the fingerpad and distal phalanx to friction of a grooved surface : Effect of the contact

- angle. In *14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, volume 29, pages 297–300, March 2006.
- [Mar06a] F. Martinot. *Caractérisation du rôle de la dynamique du toucher dans la perception de textures*. PhD thesis, USTL, France, 2006.
- [Mar06b] F. Martinot. The influence of surface commensurability on roughness perception with a bare finger. In *Eurohaptics*, pages 21–29, July 2006.
- [MBC00] E.M. Meftah, L. Belingard, and C.E. Chapman. Relative effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch. *Experimental Brain Research*, 132 :351–361, 2000.
- [McM97] A.J. McMillan. A non-linear friction model for self-excited vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 205(3) :323–335, 1997.
- [MGDS84] J.W. Morley, A.W. Goodwin, and I. Darian-Smith. Tactile discrimination of gratings. *Experimental Brain Research*, 49 :291–299, 1984.
- [MH69] M. M. Merzenich and T. Harrington. The sense of flutter-vibration evoked by stimulation of the hairy skin of primates : Comparison of human sensory capacity with the responses of mechanoreceptive afferents innervating the hairy skin of monkeys. *Experimental Brain Research*, 9 :236–260, 1969.
- [MJF00] P.L. Moal, E. Joseph, and J.-C. Ferniot. Mechanical energy transductions in standing wave ultrasonic motors : Analytical modelling and experimental investigations. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 19(5) :849–871, 2000.
- [MKY98] T. Maeno, K. Kobayashi, and N. Yamazaki. Relationship between the structure of human finger tissue and the location of tactile receptors. *JSME International Journal*, 41(1) :94–100, july 1998.
- [MN02] V. Monturet and B. Nogarède. Optimal dimensioning of a piezoelectric bimorph actuator. *The European Physical Journal - Applied Physics*, 17 :107–118, 2002.
- [MPC05] F. Martinot, P. Plénacoste, and C. Chaillou. Sounds and vibrations of human fingerprints. In *International Conference on Sensing Technologies IEEE/ICST'2005*, Palmerston North, New Zealand, volume 29, November 2005.
- [MS05] Y. Makino and H. Shinoda. Selective stimulation to superficial mechanoreceptors by temporal control of suction pressure. In *Proceedings of the First Joint Eurohap-*

---

*tics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2005*, pages 229–234, March 2005.

- [MTL] <http://touchlab.mit.edu> MIT Touch Lab.
- [MWF00] G. Moy, C. Wagner, and R.S. Fearing. A compliant tactile display for teletaction. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3409–3415, 2000.
- [NHT06] M. Nakatani, R.D. Howe, and S. Tachi. The fishbone tactile illusion. In *Proceedings of Eurohaptics*, pages 69–73, 2006.
- [NJH85] A.D. Nashif, D.I.G. Jones, and J.P. Henderson. *Vibration Damping*. John Wiley & Sons, New York, 1985.
- [NKK01] H.T. Nefs, A.M. Kappers, and J.J. Koenderink. Amplitude and spatial-period discrimination in sinusoidal gratings by dynamic touch. *Perception*, 30 :1263–1274, 2001.
- [NMYT98] T. Nara, T. Maeda, Y. Yanagida, and S. Tachi. A tactile display using elastic waves in a "tapered plate". In *International Conference on Artificial Reality and Tele-existence*, pages 106–116, 1998.
- [Nog96] B. Nogarède. Moteurs piézo-électriques. *Techniques de l'ingénieur*, DFB(D3765), juin 1996.
- [NTM<sup>+</sup>01] T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higushi, S. Ando, and S. Tachi. Surface acoustic wave tactile display. *Computer Graphics and Applications*, 21 :56–63, 2001.
- [PB67] C.H.T. Pan and P.H. Broussard. Squeeze film lubrication. In *Gas Bearing Symposium*, Southampton, 1967.
- [PCKN05] W.R. Provancher, M.K. Cutkosky, K.J. Kuchenbecker, and G. Niemeyer. Contact location display for haptic perception of curvature and object motion. *International Journal of Robotics Research*, 24(9) :1–11, 2005.
- [PH99] D.T.V. Pawluk and R.D. Howe. Dynamic lumped element response of the human fingerpad. *Journal of Biomechanical Engineering, Transactions of the ASME*, 121 :178–183, 1999.
- [PH03] J. Pasquero and V. Hayward. Stress : A practical tactile display system with one millimeter spatial resolution and 700 hz refresh rate. In *Proceedings of Eurohaptics*, pages 94–110, 2003.

- [Pig05] F. Pigache. *Modélisation causale en vue de la commande d'un transducteur piézo-électrique plan pour une application haptique*. PhD thesis, USTL, France, 2005.
- [PJ81] J. R. Philips and K. O. Johnson. Tactile spatial resolution. i.two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition. *Journal of Neurophysiology*, 46 :1177–1191, 1981.
- [PM03] I. Poupyrev and S. Maruyama. Tactile interfaces for small touch screens. In *Symposium on User Interface Software and Technology, UIST 2003*, pages 217–220, 2003.
- [RDLT02] G. Robles-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*, pages 159–164, 2002.
- [RDLT06] G. Robles-De-La-Torre. The importance of the sense of touch in virtual and real environments. *Multimedia, IEEE*, 13(3) :24–30, July-Sept. 2006.
- [RDLTH01] G. Robles-De-La-Torre and V. Hayward. Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch. *Nature*, 412(6845) :445–448, 2001.
- [RO01] D. Richard and D. Orsal. *Neurophysiologie : Organisation et fonctionnement du système nerveux*. Dunod, 2001.
- [SC86] C.E. Scherrick and R.W. Cholewiak. "Cutaneous sensitivity", in *Handbook of perception and Human Performance*. New York : John Wiley, 1986.
- [SCSB01] I. Summers, C. Chanter, A. Southall, and A. Brady. Results from a tactile array on the fingertip. In *In Eurohaptics 2001 : Conference Proceedings*, July 2001.
- [SFSB07] M. Solazzi, A. Frisoli, F. Salsedo, and M. Bergamasco. A fingertip haptic display for improving local perception of shape cues. In *In Proceedings of the Second Joint Eurohaptics Conference And Symposium On Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems*, pages 409–414, 2007.
- [SGH02] A. M. Smith, G. Gosselin, and B. Houde. Deployment of fingertip forces in tactile exploration. *Experimental Brain Research*, 147(2) :209–218, september 2002.
- [SL95] M.A. Srinivasan and R.H. LaMotte. Tactual discrimination of softness. *J. of Neurophysiology*, 73(1) :88–101, 1995.

- 
- [SMR97] E.R. Serina, C.D. Mote, and D. Rempel. Force response of the fingertip pulp to repeated compression - effects of loading rate, loading angle and anthropometry. *Journal of Biomechanics*, 30(1) :1035–1040, 1997.
- [SRWV05] M. A. Symmons, B. L. Richardson, D. B. Wullemin, and G. H. VanDoorn. Active versus passive touch in three dimensions. *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, WHC 2005*, pages 108–113, 18-20 March 2005.
- [SSM98] M. Shinohara, Y. Shimizu, and A. Mochizuki. Three-dimensional tactile display for the blind. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 6(3) :1063–1070, 1998.
- [SSTB07] E.P. Scilingo, N. Sgambelluri, G. Tonietti, and A. Bicchi. Integrating two haptic devices for performance enhancement. In *World Haptics 2007. Second Joint Euro-Haptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 139–144, 2007.
- [SVCF04] M. Salada, P. Vishton, J.E. Colgate, and E. Frankel. Two experiments on the perception of slip at the fingertip. In *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 146–153, 2004.
- [SWL90] M.A. Srinivasan, J.M. Whitehouse, and R.H. LaMotte. Tactile detection of slip : Surface microgeometry and peripheral neural codes. *J. of Neurophysiology*, 63(6) :1323–1332, 1990.
- [TAT<sup>+</sup>06] H.Z. Tan, B.D. Adelstein, R. Traylor, M. Kocsis, and E.D. Hirleman. Discrimination of real and virtual high-definition textured surfaces. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 3–9, March 2006.
- [TDT<sup>+</sup>06] A. Talbi, O. Ducloux, N. Tiercelin, Y. Deblock, P. Pernod, and V. Preobrazhensky. Vibrotactile using micromachined electromagnetic actuators array. *Journal of Physics : Conference Series. International MEMS Conference*, 34 :637–642, 2006.
- [TFK<sup>+</sup>06] M. Takasaki, Y. Fujii, H. Kotani, T. Mizuno, and T. Nara. Proposal of tele-touch using active type saw tactile display. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1032–1037, October 2006.

- [THC05] N.G. Tsagarakis, T. Horne, and D.G. Caldwell. Slip aestheasis : A portable 2d slip/skin stretch display for the fingertip. In *in proc. IEEE/Worlhaptics*, pages 1214–219, 2005.
- [TK06] W.M. Bergmann Tiest and A.M.L. Kappers. Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility. *Acta Psychologica*, 121 :1–20, 2006.
- [TMC97] P.M. Taylor, A. Mose, and A. Creed. The design and control of a tactile display based on shape memory alloys. In *Proc. of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1317–1323, April 1997.
- [TMK06] M. Tada, M. Mochimaru, and T. Kanade. How does a fingertip slip? visualizing partial slippage for modeling of contact mechanics. In *Eurohaptics*, pages 415–420, 3rd-6th July 2006.
- [TMM02] N. Tatara, M. Mori, and 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*, pages 42–47, 2002.
- [VJ84] A. B. Vallbo and R. S. Johansson. Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand. *Human Neurobiology*, 3(1) :3–14, 1984.
- [VPW06] R. Velázquez, E.E. Pissaloux, and M. Wiertelwski. A compact tactile display for the blind with shape memory alloys. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3905–3910, May 2006.
- [VSP<sup>+</sup>03] C. Villard, L. Soler, N. Papier, V. Agnus, A. Gangi, D. Mutter, and J. Marescaux. Rf-sim : a treatment planning tool for radiofrequency ablation of hepatic tumors. In *Seventh International Conference on Information Visualization, 2003. IV 2003*, pages 561–566, 16-18 July 2003.
- [Wan02] G. Gary Wang. Definition and review of virtual prototyping. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2(3) :232–236, 2002.
- [WF95] T. Watanabe and S. Fukui. A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 1134–1139, 1995.



- 
- [WGEP07] L. Winfield, J. Glassmire, E. Colgate, and M. Peshkin. Tpad : Tactile pattern display through variable friction reduction. In *World Haptics 2007. Second Joint EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 421–426, March 2007.
- [WH06] Q. Wang and V. Hayward. Compact, portable, modular, high-performance, distributed tactile transducer device based on lateral skin deformation. In *Proc. 14th Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems IEEE VR 2006*, pages 67–72, 2006.
- [WHS04] Q. Wang, V. Hayward, and A.M. Smith. A new technique for the controlled stimulation of the skin. In *in proc. of the Canadian Medical and Biological Eng. Soc. Conference, CMBEC*, September 9-11 2004.
- [Wie00] M. Wiesendanger. *Squeeze Film air Bearings Using Piezoelectric Bending Elements*. PhD thesis, EPFL, Switzerland, 2000.
- [WLH02] C.R. Wagner, S.J. Lederman, and R.D. Howe. A tactile shape display using reservoir motors. In *Proceedings of the 10th Symp. On Haptic Interfaces For Virtual Envir. and Teleoperator Sysys. (HAPTICS.02)*, pages 354–355, March 24-25 2002.
- [YCM98] B.D. Yang, M.L. Chu, and C.H. Menq. Stick-slip-separation analysis and non-linear stiffness and damping characterization of friction contacts having variable normal load. *Journal of Sound and Vibration*, 210(4) :461–481, 1998.
- [YGD<sup>+</sup>01] T. Yoshioka, B. Gibb, A.K. Dorsch, S.S. Hsiao, and K.O. Johnson. Neural coding mechanisms underlying perceived roughness of finely textured surfaces. *J. of Neuroscience*, 21(17) :6905–6916, 2001.
- [YMS<sup>+</sup>04] Y. Yokokohji, N. Muramori, Y. Sato, T. Kikura, and T. Yoshikawa. Design and path planning of an encountered-type haptic display for multiple fingertip contacts based on the observation of human grasping behavior. In *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1986–1991, 2004.
- [YNYH06] A. Yamamoto, S. Nagasawa, H. Yamamoto, and T. Higuchi. Electrostatic tactile display with thin film slider and its application to tactile telepresentation systems. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(2) :168–177, 2006.
- [YYYH07] H. Yokota, A. Yamamoto, H. Yamamoto, and T. Higuchi. Producing softness sensation on an electrostatic texture display for rendering diverse tactile feelings. In

*World Haptics 2007. Second Joint EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pages 584–585, 2007.

## Résumé

L'objectif de cette thèse est de proposer un périphérique tactile qui pourrait augmenter notre immersion dans un environnement virtuel en stimulant la pulpe du doigt. Ce dispositif s'inscrit dans le cadre des dispositifs haptiques. Ainsi, à partir d'une étude sur le rôle de la dynamique du toucher dans la perception de textures, nous avons proposé un dispositif tactile innovant permettant de simuler différentes textures fines. Dans cette thèse, fondamentalement pluridisciplinaire, nous avons d'abord déterminé les spécifications du cahier des charges pour obtenir un stimulateur tactile fonctionnel basé sur la génération d'un effet glissant. Après avoir identifié le phénomène responsable de cet effet glissant par vibration haute fréquence, nous avons réalisé le dimensionnement d'une plaque tactile capable de faire varier cet effet, c'est-à-dire de faire varier le coefficient de frottement perçu par l'utilisateur. Cette plaque est mise en vibration grâce à une matrice de céramiques piézoélectriques collées sur une de ses faces. Ce dimensionnement a été validé par des simulations sur un logiciel d'éléments finis, puis la configuration retenue a été réalisée. Par la suite, le contrôle de la plaque vibrante nous a permis de moduler le coefficient de frottement perçu afin d'obtenir différents motifs. Dans une dernière partie, le périphérique a été évalué. Plusieurs textures crantées ont été testées afin de connaître les capacités des utilisateurs à différencier des périodes spatiales. Cette évaluation a permis de connaître les performances de ce stimulateur tactile et de comparer ses performances à celles d'une texture réelle.

**Mots-clés:** Haptique, stimulation sensorielle, transducteur électro-acoustique, frottement, évaluation sensorielle, texture, piézoélectricité.

## Abstract

The aim of this PhD thesis is to suggest a tactile device capable of increasing our immersion in a virtual environment by stimulating the fingertip. This device belongs to the framework of haptic devices. From a study on the dynamic touch for textures perception, we propose an innovative tactile device which allows simulating various finely textured surfaces. In this PhD, fundamentally multidisciplinary, we first establish the specifications in order to get a practical tactile device based on the generation of a slippery feeling. After having identified the phenomena responsible of this slippery feeling by height frequency vibrations, we realize the design of a tactile plate able to vary this effect, namely the friction coefficient perceived by users. This plate vibrates thanks to piezo-ceramics glued onto one of the two surfaces. This design has been checked by simulation with finite elements software and then the retained configuration has been made. Thereafter the control of the vibrating plate allows us to modulate the friction coefficient

in order to obtain various patterns. In a last section, our tactile device has been evaluated according to psychophysical experiment. Several gratings have been simulated to know the abilities of the subject to discriminate spatial period on the tactile plate. The efficiency of the device has been compared with the one of the real textures.

**Keywords:** Haptic, tactile device, ultrasonic transducer, friction, sensory evaluation, texture, piezoelectricity.