

Une exploration conceptuelle et pratique de
l'électro-vibration sur des vêtements et des objets
intelligents

par

Balkiss FRIAA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 30 JUILLET 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Balkiss Friaa, 2021



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Vincent Lévesque, Directeur de mémoire
Département de génie logiciel et TI, École de technologie supérieure

M. Simon Drouin, Président du jury
Département de génie logiciel et TI, École de technologie supérieure

M. Jean-Philippe Roberge, Examinateur externe
Département de génie des systèmes, École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE "16 JUILLET 2021"

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma gratitude au professeur Vincent Lévesque, pour bien vouloir encadrer ce mémoire et pour la confiance qu'il m'a accordée. Ses remarques pertinentes, son occupation appréciable et ses judicieux conseils ont beaucoup contribué à améliorer la qualité de ce travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à mes travaux ainsi que pour le temps qu'ils ont consacré à évaluer mon mémoire.

J'aimerais aussi exprimer ma très profonde reconnaissance à mes parents Nada et Hédi, ma sœur Samar et mon frère Abderrahmen. Je les remercie tous pour leur apport moral, leur amour, et leur soutien.

Je suis également extrêmement reconnaissante à Amen Allah, qui a su me remonter le moral dans les moments difficiles et qui par sa patience, ses encouragements et son soutien continual m'a permis de mener ce travail à terme.

Je profite de cette occasion pour exprimer ma reconnaissance et adresser mes remerciements les plus sincères à mes collègues de laboratoire Shirin, Laura, Paria et toute personne qui m'a aidé et contribuer à ce travail de recherche.

Merci également à NSERC, programme de subventions à la découverte, MITACS GlobalLink et le service financier de l'ÉTS, qui m'ont permis de me concentrer sur ma maîtrise grâce à un financement substantiel.

Une exploration conceptuelle et pratique de l'électro-vibration sur des vêtements et des objets intelligents

Balkiss FRIAA

RÉSUMÉ

L'électro-vibration est une technologie qui vise l'amélioration des interfaces haptiques avec un retour tactile réaliste. Elle a été fréquemment utilisée pour fournir une plage variée de sensations tactiles aux doigts se déplaçant sur un écran tactile. Toutefois, elle ne semble pas être utilisée dans des dispositifs portables. De même, son utilisation est limitée dans les objets du quotidien permettant un retour tactile sur d'autres parties du corps.

Ce travail de recherche explore l'électro-vibration dans des dispositifs portables et des objets intelligents. Dans un premier temps, notre attention s'est portée sur les dispositifs portables et les vêtements électro-vibrants destinés à la stimulation de différentes parties du corps. Il convient de mentionner la fabrication de surfaces électro-vibrantes à partir de matériaux conducteurs flexibles, de textiles et de plaques capacitives découpées, ainsi que les idées d'applications intéressantes recueillies lors de brainstormings. Nos résultats préliminaires révèlent que la perception du stimulus électro-vibratoire varie en fonction des différentes parties du corps. En effet, les sensations tactiles générées étaient bien fortes sur la paume et le bout des doigts, et un peu moins importantes sur le poignet. Au niveau des cuisses, du cou et de l'avant-bras, les sensations étaient subtiles. Bien que les dispositifs portables et les vêtements électro-vibrant enrichissent l'expérience utilisateur et ouvrent de nouvelles voies d'interaction avec l'information, nos expérimentations dévoilent des défis considérables en termes de conception et de perception de la stimulation électro-vibratoire, qui est susceptible d'interférer avec d'autres sensations tactiles.

Dans un second temps, nous avons re-orienté notre attention vers la conception d'un objet du quotidien, en particulier un clavier électro-vibratoire stimulant la paume, qui permet, selon nos résultats préliminaires, la perception de riches sensations tactiles. Pour informer la conception de ce clavier, nous avons effectué une étude axée sur la comparaison de la perception du stimulus électro-vibratoire de deux régions de la main. Cette étude est menée à travers une expérience psychophysique qui compare les seuils absolus de détection de la paume et du bout du doigt. Les résultats révèlent que la perception des stimuli électro-vibratoires sur ces deux régions de la main ne diffère pas.

La paume constitue par conséquent un bon endroit à stimuler par électro-vibration, tout comme les bouts de doigts. La stimulation de cette zone de la main étend le champ d'application de l'électro-vibration et les objets dans lesquels elle s'inscrit.

Mots-clés: électro-vibration, dispositif portable, objet de tous les jours

A Conceptual and Practical Exploration of Electrovibration on Clothing and Intelligent Objects

Balkiss FRIAA

ABSTRACT

Electrovibration is a technology aiming to improve haptic interfaces with realistic tactile feedback. It has been frequently used to provide a varied range of tactile sensations to fingers moving across a touch screen. However, it does not appear to be used in wearable devices. Similarly, its use is limited in everyday objects that provide tactile feedback to other parts of the body.

This research work investigates electrovibration in wearable devices and smart objects. Initially, our interest was focused on wearable devices and electrovibrating garments for stimulating various body parts. This includes the fabrication of electrovibrating surfaces from flexible conductive materials, textiles, and cut capacitive plates, coupled with interesting ideas for applications collected during brainstorming sessions. Our preliminary results reveal that the perception of the electrovibratory stimulus varies according to the different parts of the body. Indeed, the tactile sensations generated were significantly strong on the palm and the fingertips, and slightly weaker on the wrist. On the thighs, neck, and forearm, the sensations were subtle. Although wearable devices and electrovibrating garments enrich the user experience and provide new ways of interacting with information, on the other hand, our experiments show considerable challenges in terms of the design and perception of electrovibratory stimulation, which may interfere with other tactile sensations.

Secondly, we oriented our interest towards the design of an everyday object, in particular an electrovibratory palm-stimulating keyboard, which according to our preliminary results, allows the perception of rich tactile sensations. To inform the design of this keyboard, we have carried out a study focused on the comparison of the perception of the electrovibratory stimulus of two regions of the hand. This study is conducted through a psychophysical experiment, which compares the absolute thresholds of detection of the palm and the fingertip. The results reveal that the perception of electrovibratory stimuli on these two regions of the hand does not differ.

The palm is thus a suitable area for electro-vibrational stimulation, as are the fingertips. Stimulation of this area of the hand extends the range of application of electrovibration and the objects in which it is applied.

Keywords: electrovibration, wearable device, everyday object

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Les sens haptiques	5
1.1.1 Physiologie de l'appareil tactile humain	5
1.1.1.1 Les mécanorécepteurs cutanés	6
1.1.1.2 Le système kinesthésique	6
1.1.1.3 La transmission de l'information sensorielle	7
1.1.1.4 Le toucher actif et le toucher passif	8
1.1.2 La psychologie cognitive de la perception	9
1.2 Introduction à l'électro-vibration	10
1.2.1 Définition et origines de l'électro-vibration	10
1.2.2 Évolution des dispositifs d'électro-vibration	11
1.2.3 Paramètres influençant la rugosité	15
1.2.3.1 La fréquence	15
1.2.3.2 La forme d'onde	15
1.2.3.3 Amplitude du signal	16
1.2.4 Paramètres influençant la perception tactile	16
1.2.4.1 Propriétés du signal d'entrée	16
1.2.4.2 Humidité des doigts	19
1.2.4.3 Propriétés de l'isolant	19
1.2.4.4 Force appliquée	20
1.2.5 Exemples d'applications de l'électro-vibration	20
1.3 Conception des interfaces haptiques	23
1.3.1 La conception de l'expérience haptique	24
1.3.2 Les dispositifs haptiques portables	25
1.3.3 Perception des vibrations dans les diverses parties du corps dans des contextes mobiles	26
1.4 Les textiles intelligents	27
1.4.1 Les capteurs de tissu intelligent	27
1.4.2 Le textile électronique	27
1.5 Conclusion	29
CHAPITRE 2 EXPLORATION DES VÊTEMENTS ET DES DISPOSITIFS PORTABLES ÉLECTRO-VIBRANTS	31
2.1 Espace conceptuel et applications envisageables	31
2.1.1 Espace conceptuel	31
2.1.2 Les applications envisageables	32
2.2 Fabrication de surfaces électro-vibrantes et stimulation des diverses parties du corps	34

2.2.1	Dispositif de base pour générer les signaux électro-vibratoires	34
2.2.2	Test de référence avec la plaque capacitive	35
2.2.3	Effet des isolants électriques proposés pour la fabrication des surfaces électro-vibrantes	37
2.2.3.1	Le film en polyamide ou film Kapton	38
2.2.3.2	La peinture isolante	39
2.2.3.3	Le dioxyde de silicium ou silice	40
2.2.4	Les matériaux conducteurs proposés pour la fabrication des surfaces électro-vibrantes	42
2.2.4.1	Les matériaux conducteurs flexibles	42
2.2.4.2	Les textiles conducteurs	43
2.2.5	La perception du stimulus électro-vibratoire sur différentes parties du corps	45
2.2.6	Méthodologie	46
2.2.6.1	Expérimentation avec matériaux flexibles	46
2.2.6.2	Expérimentation avec textiles	47
2.2.7	Interprétation des résultats obtenus	48
2.3	Fabrication de surfaces électro-vibrantes au moyen des plaques 3M coupées et les dispositifs portables possibles	49
2.3.1	Espace conceptuel	49
2.3.2	Découpage des plaques capacitives	50
2.3.3	Conception d'un bracelet électro-vibrant	52
CHAPITRE 3	EXPLORATION DES OBJETS INTELLIGENTS ÉLECTRO-VIBRANTS	55
3.1	La conception d'un clavier électro-vibrant et ses applications possibles	55
3.1.1	Conception d'un clavier électro-vibrant	55
3.1.2	Posture de la main en écrivant et les applications possibles d'un clavier électro-vibrant	56
3.1.2.1	Posture de la main en écrivant sur un clavier	57
3.1.2.2	Les applications possibles d'un clavier électro-vibrant	58
3.2	Développement d'un système générateur du signal électro-vibratoire	60
3.2.1	Développement électronique réalisé	60
3.2.2	Les risques associés à notre dispositif et amélioration du système de sécurité	64
3.3	Déroulement de l'expérience psychophysique	65
3.3.1	Mise en contexte et objectif de l'expérience	65
3.3.2	Participants	66
3.3.3	Méthodologie	66
3.3.4	Description des expériences	67
3.4	Analyse des données	69
3.4.1	Analyse des données basées sur les deux régions de la main	70

3.4.2	Analyse des données basées sur le genre	70
3.5	Discussion	73
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	75
ANNEXE I	CLASSIFICATION DES IDÉES DU BRAINSTORMING	77
ANNEXE II	ANALYSE DES DONNÉES BASÉES SUR LES DEUX RÉGIONS DE LA MAIN, EN EXCLUANT LE PARTICIPANT 8 ET LE PARTICIPANT 13	81
	BIBLIOGRAPHIE	83

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Les différents mécanorécepteurs cutanés et leurs caractéristiques	7
Tableau 3.1 Les seuils de détection absolu pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume	71
Tableau 3.2 Les seuils de détection absolu du bout du doigt pour les deux genres : Homme et Femme	72
Tableau 3.3 Les seuils de détection absolu de la paume pour les deux genres : Homme et Femme	73

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Les récepteurs tactiles et les fibres nerveuses dans la peau glabre	8
Figure 1.2	Principe de l'électro-vibration	10
Figure 1.3	Les écrans électrostatiques a) Le premier écran tactile électrostatique avec une matrice de 180 électrodes et une fine couche d'isolation, b) Écran électrostatique développé en utilisant la microfabrication lithographique	12
Figure 1.4	Première utilisation d'un écran tactile commercial pour procurer des sensations électro-vibratoires	13
Figure 1.5	Système d'affichage visuo-haptique de surface multi-utilisateur	14
Figure 1.6	Système électrostatique à base de stylo (EV-Pen)	14
Figure 1.7	REVEL : Système basée sur l'électro-vibration inverse	15
Figure 1.8	Effet de la fréquence du signal sur la rugosité du stimulus	16
Figure 1.9	a) Exemple de gestes ancrés : La sélection dans un menu, ou un doigt est statique tandis qu'un autre se déplace en rotation pour sélectionner un élément. b) Exemple de manipulation asynchrone à deux mains : la main dominante sert à dessiner; la main non dominante contrôle l'orientation	22
Figure 1.10	Vêtements interactifs avec le projet Jacquard	29
Figure 2.1	Exemples conceptuels d'interactions a) accidentnelles et b) délibérées avec la manchette électrovibrante d'une chemise. La surface électrovibrante est représentée en vert	33
Figure 2.2	Illustration du dispositif de base pour générer des signaux électro-vibratoires	36
Figure 2.3	Test de référence avec la plaque 3M	37
Figure 2.4	Plaque aluminium isolé avec un film en polyamide	38
Figure 2.5	Plaque d'aluminium isolée avec la peinture isolante	39
Figure 2.6	Plaque d'aluminium isolé avec le dioxyde de silicium	40

Figure 2.7	Les matériaux conducteurs flexibles : a) feuille en aluminium et b) feuille en cuivre	42
Figure 2.8	Surfaces électro-vibrantes flexibles : a) feuille en aluminium et b) feuille en cuivre recouvertes avec la peinture isolante	43
Figure 2.9	Les textiles : a) Feuille conductrice (Velostat), b) Tissu conducteur tissé et c) Tissu conducteur tricoté	44
Figure 2.10	Les textiles électro-vibrants : a) Feuille conductrice (Velostat), b) Tissu conducteur tissé et c) Tissu conducteur tricoté recouverts avec la peinture isolante	45
Figure 2.11	Décollage de la peinture pour la feuille conductrice - Velostat	48
Figure 2.12	Une chaîne de plaques capacitatives découpées	50
Figure 2.13	Composition d'un écran tactile capacitif	51
Figure 2.14	Bracelet électro-vibrant pour stimuler le poignet	53
Figure 3.1	Clavier électro-vibrant pour stimuler la paume	56
Figure 3.2	Prototype composé d'un clavier et deux plaques capacitatives	57
Figure 3.3	La posture de la main en écrivant sur un clavier	58
Figure 3.4	Ajout d'un amplificateur OPA703 pour une sortie bipolaire	61
Figure 3.5	Un bracelet de mise à la terre antistatique	62
Figure 3.6	Un capteur de force (couplage d'une cellule de pesée et un convertisseur analogique-numérique ADC	63
Figure 3.7	Écran tactile SCT3250	63
Figure 3.8	Le montage expérimental	67
Figure 3.9	Retour visuel affiché afin de maintenir la force appliquée entre 0,1 et 0,6 N	68
Figure 3.10	Clavier avec deux boutons spécifiques : ALTERNER et ENREGISTRER	68
Figure 3.11	Exemple de données récoltées par la méthode de l'escalier adaptatif "un en haut, deux en bas"	70

Figure 3.12	Le seuil de détection absolu pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume	71
Figure 3.13	Diagramme des seuil de détection absolu pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume	72
Figure 3.14	Le seuil de détection absolu du bout du doigt pour les deux genres : Homme et Femme	72
Figure 3.15	Le seuil de détection absolu de la paume pour les deux genres : Homme et Femme	73

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Hz	La fréquence en Hertz
V	Mesure de la tension électrique en Volt
N	Unité de force en Newton
A	Unité de mesure de l'intensité d'un courant électrique en Ampère
Ω	La résistance en Ohms
M	Unité de longueur en Métre

INTRODUCTION

L'électrovibration génère des sensations tactiles riches, en modulant la friction entre la peau et une surface conductrice isolée et alimentée par des signaux haute tension variant dans le temps. Cette technologie a été largement utilisée pour produire des sensations lors du glissement d'un doigt sur un écran tactile (Bau, Poupyrev, Israr & Harrison, 2010), et a également été appliquée aux interactions avec des objets de tous les jours (Bau & Poupyrev, 2012). Ce retour tactile contribue à l'amélioration de l'expérience utilisateur et de la perception humaine dans des applications interactives. Également, il favorise la performance utilisateur lors des interactions gestuelles. Cette technologie offre de vastes possibilités d'application, notamment pour des outils destinés aux malvoyants, des livres interactifs pour enfants et des surfaces visuelles augmentées avec un retour tactile.

Notre objectif initial était la conception de dispositifs portables et de vêtements électro-vibrants visant la stimulation de différentes parties du corps, par le biais de matériaux conducteurs flexibles, de textiles et de plaques capacitatives découpées. Nous considérons que ces dispositifs permettent la création d'interfaces dynamiques, riches et satisfaisantes, ainsi que de faire évoluer les formes d'interaction avec l'information. Les expériences menées révèlent des défis considérables en termes de conception et de perception de la stimulation électro-vibratoire. En revanche, il apparaît que la paume de la main permet une bonne perception du stimulus électro-vibratoire.

Notre second objectif était la conception d'un clavier électro-vibrant, destiné à la stimulation de la paume de la main, dont la sensibilité semble être très élevée selon nos résultats préliminaires. Pour informer la conception de ce clavier, nous avons mené une étude plus approfondie sur la perception du stimulus électro-vibratoire à la paume et au bout du doigt, en mesurant le seuil de détection absolu pour chaque emplacement. Notre hypothèse est que la paume permet une forte perception des sensations tactiles générées.

Le premier chapitre de ce mémoire présente une revue de littérature pertinente au sujet des sens haptiques, de l'électro-vibration, des dispositifs haptiques portables et des textiles intelligents.

Le deuxième chapitre explore les dispositifs d'électro-vibration portables stimulant différentes parties du corps. En particulier, nous décrivons la fabrication de surfaces électro-vibrantes en employant des matériaux conducteurs flexibles, des textiles et des plaques capacitives découpées.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une mise en œuvre d'un clavier électro-vibrant stimulant la paume, qui révèle une perception marquée des sensations tactiles, conformément aux résultats préliminaires que nous avons obtenus. De plus, nous rapportons une étude comparative entre la perception du stimulus électro-vibratoire sur la paume et sur le bout du doigt.

Finalement, nous couvrons la conclusion et les travaux futurs.

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette maîtrise apportent des contributions importantes dans le domaine de l'haptique. Tout d'abord, sur le plan conceptuel. En effet, nous avons exploré un espace conceptuel de dispositifs portables, de vêtements et d'objets électro-vibrants ainsi que leurs applications possibles. Ensuite, au niveau du prototypage, à savoir la fabrication de surfaces électro-vibrantes susceptibles d'être utilisées dans les vêtements, les bijoux et les objets du quotidien. Enfin, au niveau de l'évaluation. En effet, nous avons commencé par réaliser une série de tests préliminaires dans le but de démontrer l'effet des surfaces électro-vibrantes ainsi que des différentes parties du corps sur la perception tactile. Nous avons ensuite mené une étude psychophysique plus approfondie, qui consiste à comparer la perception tactile de deux endroits de la main, soit la paume et le bout du doigt.

Bien que de grands défis restent encore à surmonter afin d'explorer l'électro-vibration dans des dispositifs portables et des objets de tous les jours, ce travail de recherche représente une étape importante afin de comprendre les différents facteurs qui doivent être pris en considération lors de la conception, et qui contribuent à l'amélioration et à la performance des dispositifs électro-vibrants.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce travail de recherche concerne l'électro-vibration dans le cadre d'un dispositif portable et des objets de tous les jours. Il est donc indispensable d'étudier les paramètres influençant la perception du stimulus électro-vibratoire, et de présenter des notions en relation avec les sens haptiques et les dispositifs portables.

Dans la Section 1.1, nous étudions les sens haptiques. Ensuite, dans la Section 1.2, nous présentons une introduction à l'électro-vibration. Nous nous concentrerons particulièrement sur l'évolution des dispositifs électro-vibratoires, aussi sur les paramètres qui influencent la rugosité du stimulus, et ceux qui influencent la perception du stimulus. Nous énumérons également quelques applications intéressantes. Nous examinons la conception des interfaces haptiques dans la Section 1.3, à savoir la conception d'expériences haptiques, les dispositifs haptiques portables et la perception des vibrations produites sur diverses parties du corps dans des contextes mobiles. Enfin, nous abordons les textiles intelligents dans la Section 1.4 et une conclusion dans la Section 1.5.

1.1 Les sens haptiques

1.1.1 Physiologie de l'appareil tactile humain

La perception haptique implique un codage des informations motrices par l'intermédiaire des récepteurs articulaires et vestibulaires, et par l'activation des mécanorécepteurs (Goldstein, 1996). La peau contient un nombre important de récepteurs, dont chacun joue un rôle différent et qui répondent à diverses stimulations telles que la température, le toucher et la douleur, grâce au système somesthésique (Goldstein, 1996; Gescheider, Wright & Verrillo, 2010).

1.1.1.1 Les mécanorécepteurs cutanés

D'après Goldstein (1996) et Gescheider *et al.* (2010), les mécanorécepteurs cutanés de type I sont repartis superficiellement dans la peau, tandis que les mécanorécepteurs de type II sont distribués en profondeur (Figure 1.1). La taille du champ récepteur qui représente la région sensorielle à stimuler, diffère selon les zones cutanées. En effet, les récepteurs de type I sont de petite taille aux limites bien définies, tandis que les récepteurs de type II sont de grandes dimensions.

Chaque type de mécanorécepteurs joue un rôle différent. Les corpuscules sensibles au glissement de Meissner et les corpuscules sensibles aux vibrations de Pacini sont à adaptation rapide RA (Rapidly Adapting). En effet, ils réagissent dès que la peau est stimulée, puis s'arrêtent rapidement même si la stimulation continue. Cela signifie que les mécanorécepteurs à adaptation rapide répondent de façon brève aux stimuli; leur réponse diminue si le stimulus est maintenu (Goldstein, 1996; Gescheider *et al.*, 2010).

Les disques de Merkel nous renseignent sur la forme et la texture des objets touchés. Quant aux corpuscules de Ruffini, ils présentent une sensation à une force ponctuelle. Ces derniers sont à adaptation lente SA (Slowly Adapting). En effet, ils répondent tant que la peau est stimulée. En d'autres termes, les mécanorécepteurs à adaptation lente continuent à réagir tant que le stimulus est présent. (Goldstein, 1996; Gescheider *et al.*, 2010).

Le Tableau 1.1 représente les différents mécanorécepteurs cutanés ainsi que leurs caractéristiques.

1.1.1.2 Le système kinesthésique

La sensation kinesthésique concerne la perception des mouvements du corps et des membres. Elle présente une sensation proprioceptive et profonde au moyen des propriocepteurs qui existent dans les muscles, les tendons et les articulations. D'autre part, elle permet la caractérisation cinématique des mouvements relatifs aux membres (Zeng, 2012). Le retour

Tableau 1.1 Les différents mécanorécepteurs cutanés et leurs caractéristiques
Adapté de Goldstein (1996)

Mécanorécepteur	Corpuscules de Meissner	Corpuscules de Pacini	Disques de Merkel	Corpuscules de Ruffini
Adaptation	Rapide (RA1)	Rapide (RA2)	Lente (SA1)	Lente (SA2)
Sensation	Déformation	Vibration	Pression	Force ponctuelle
Surface du champ récepteur	Réduite (13 mm ²)	Large (101 mm ²)	Réduite (11 mm ²)	Large (59 mm ²)
Fréquence d'excitation	30 - 40 Hz	10 > 500 Hz	0.3 – 100 Hz	0.3 – 100 Hz

extéroceptif concerne la perception des phénomènes extérieurs du corps humain, tels que le poids d'un objet ou les chocs. Quant au retour proprioceptif, il concerne les phénomènes internes du corps tels que la position des membres (Zeng, 2012).

1.1.1.3 La transmission de l'information sensorielle

Selon Goldstein (1996), les mécanorécepteurs cutanés transmettent une information au système nerveux central sur la sensation induite lors du contact d'un objet. Le parcours de la voie nerveuse commence par capter une stimulation cutanée par les récepteurs tactiles puis va envoyer des potentiels d'action le long d'axones qui entrent dans la corne dorsale de la moelle épinière pour transmettre l'information au cerveau. Quant au système kinesthésique, les propriocepteurs transmettent des signaux au système nerveux. Ces signaux sont traités dans la région somatosensorielle du cortex cérébral et permettent la perception d'une sensation kinesthésique.

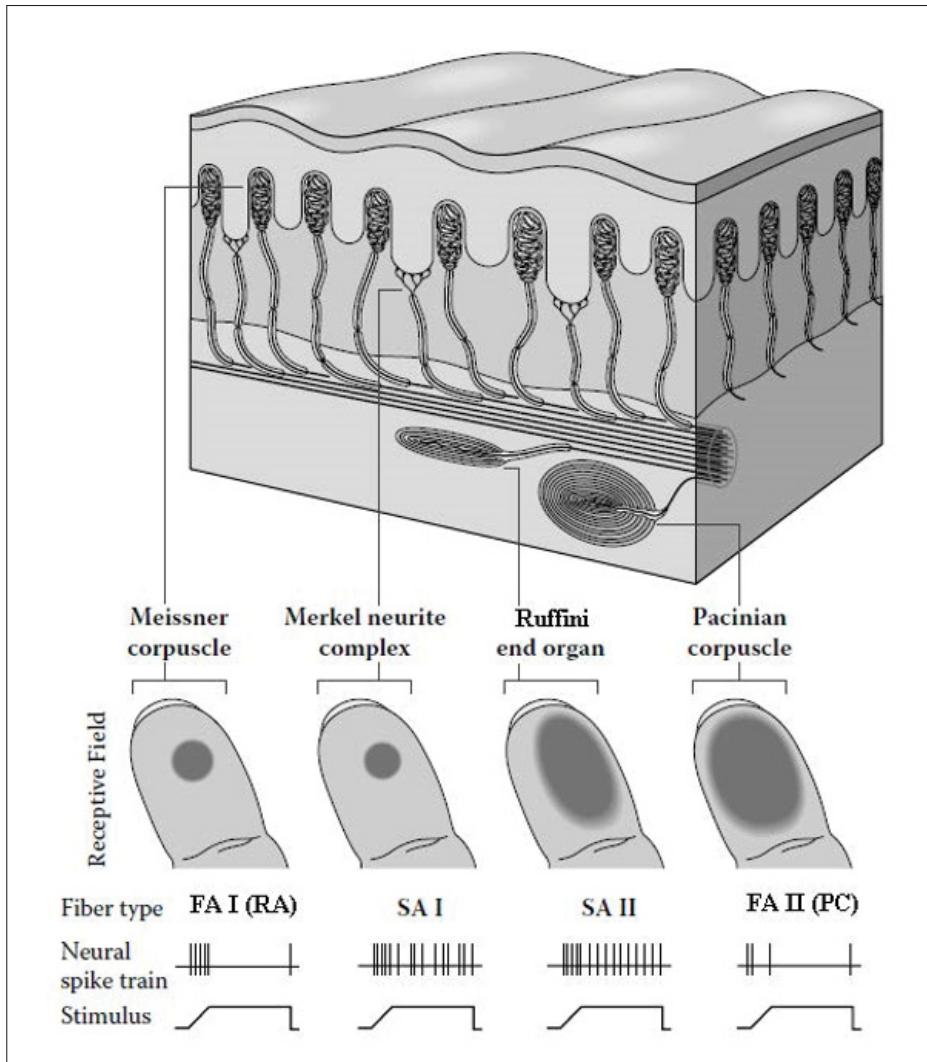


Figure 1.1 Les récepteurs tactiles et les fibres nerveuses dans la peau glabre

Tirée de Gescheider *et al.* (2010)

1.1.1.4 Le toucher actif et le toucher passif

Selon Gescheider *et al.* (2010), la principale différence entre le toucher actif et le toucher passif est que le toucher actif est lié à l'objet touché, et il stimule les récepteurs non seulement de la peau, mais aussi des articulations et des tendons activés lorsqu'il y a un déplacement d'un doigt ou d'une main sur un objet. Quant au toucher passif, il est caractérisé par des expériences sensorielles qui se produisent lorsque l'observateur ne bouge pas.

1.1.2 La psychologie cognitive de la perception

D'après Jones & Tan (2013), les techniques psychophysiques permettent de caractériser la relation entre le signal de l'interface haptique portable et l'effet ressenti par l'utilisateur. Ils assurent également la définition des seuils nécessaires à la perception des éléments tactiles. Le seuil absolu présente la valeur minimale du stimulus qui peut provoquer une sensation juste perceptible, alors que le seuil différentiel présente la quantité minimale de variation du stimulus permettant de produire une sensation différente. La psychologie traditionnelle offre diverses méthodes pour mesurer le seuil absolu, ainsi que le seuil différentiel, tel que la méthode de stimuli constants, la méthode des limites et la méthode d'ajustement.

Quant aux méthodes les plus modernes, l'étude de Jones & Tan (2013) mentionne :

- **la théorie de détection de signal TDS :** Elle permet de différencier entre le critère de sensibilité et le critère de jugement des participants.
- **les méthodes adaptatives :** Elles permettent de faire une bonne estimation des seuils en un nombre moindre d'essais en diminuant le nombre de ceux-ci dans une région plutôt éloignée du seuil.
- **loi de Stevens :** Elle permet d'identifier et de quantifier la relation entre la magnitude de la sensation et la magnitude du stimulus sur le plan physique. Elle permet également l'identification des différentes échelles de mesure.
- **l'échelle multidimensionnelle MDS :** Elle permet d'étudier le phénomène de changement d'une dimension du stimulus qui modifie également l'expérience sensorielle d'autres dimensions.

Une optimisation de la consommation d'énergie de l'interface haptique portable est possible en ajustant l'intensité du signal au minimum perceptible, en connaissant les seuils de détection.

1.2 Introduction à l'électro-vibration

Dans cette section, nous abordons la définition et les origines de l'électro-vibration, ainsi que l'évolution des dispositifs électro-vibratoires. Ensuite, nous présentons les paramètres influençant la rugosité du stimulus rendu sur la surface tactile. De même, nous exposons les paramètres qui influencent la perception tactile de l'électro-vibration. Finalement, nous fournissons des exemples d'applications de cette technologie.

1.2.1 Définition et origines de l'électro-vibration

L'électro-vibration est une technologies de retour tactile prometteuse qui consiste à moduler les forces latérales agissant entre le bout du doigt et un matériau conducteur préalablement porté à un fort potentiel électrique (Figure 1.2). Ces forces sont aussi appelées forces électrostatiques (Bau *et al.*, 2010) .

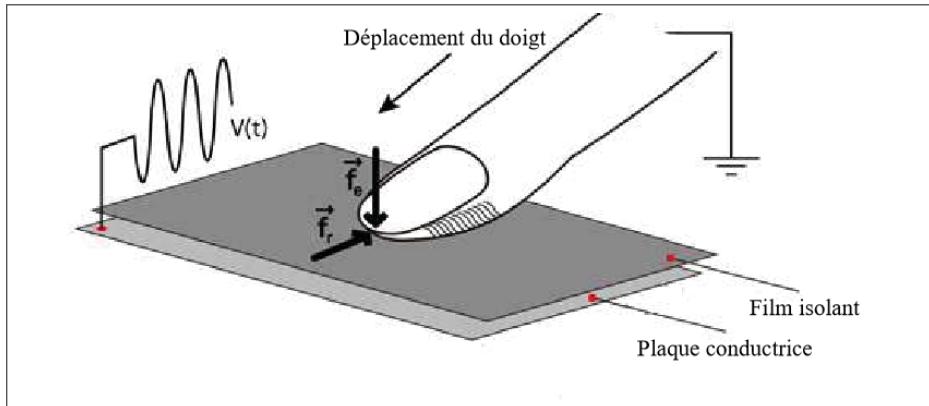


Figure 1.2 Principe de l'électro-vibration
Tirée de Bau *et al.* (2010)

Le phénomène d'électro-vibration a été découvert accidentellement par Mallinckrodt, Hughes & Sleator Jr (1953). Ils ont rapporté que si un doigt humain est déplacé sur une surface métallique lisse recouverte d'une fine couche isolante et connectée au côté non mis à la terre à un signal électrique (60 Hz, 110 V), cette surface procure une sensation ca-

outchouteuse caractéristique. La sensation résulte de la force de frottement de cisaillement modulée par l'attraction électrostatique entre l'électrode métallique et le tissu conducteur de la peau.

Selon Kim, Kang, Kim, Lim & Ryu (2015), cette technologie présente de nombreuses propriétés intéressantes telles qu'une faible consommation d'énergie, un fonctionnement silencieux et une mise en œuvre facile dans différentes tailles d'écrans tactiles sans actionneur mécanique. Cependant, elle souffre de problèmes tels qu'une intensité perçue non uniforme due à des impédances environnementales variables, telles que la température, l'humidité ou l'hydratation de la peau pendant l'interaction avec la surface électro-vibrante. En outre, un risque de choc électrique est possible, suite au niveau de courant qui peut varier considérablement en fonction de l'impédance totale, telle que celle de la peau sèche par rapport à la peau humide.

1.2.2 Évolution des dispositifs d'électro-vibration

Strong & Troxel (1970) ont montré la présence des sensations de texture sur un écran électro-tactile constitué d'une matrice de 180 électrodes recouvertes d'une fine couche diélectrique comme isolant (Figure 1.3a). Ces sensations sont générées grâce au frottement induit par la force d'attraction électrostatique.

Tang & Beebe (1998) ont montré la présence des sensations tactiles sur un écran électrostatique composé d'une couche de silicium recouverte d'une couche de polyimide par centrifugation. L'écran électrostatique est développé en utilisant la micro fabrication lithographique (Figure 1.3b). Ces sensations sont générées avec des impulsions de tension allant de 200 à 600 V. Leur étude démontre que la perception au bout du doigt était adhésive.

Bau *et al.* (2010) et Linjama & Mäkinen (2009) ont démontré qu'un écran tactile capacitif commercial permet de fournir l'électro-vibration. Cet écran est constitué d'un substrat en verre revêtu d'une couche conductrice en d'oxyde d'indium et d'étain (ITO) et d'une couche isolante en dioxyde de silicium (SiO₂) (Figure 1.4). Sachant que le corps humain est un

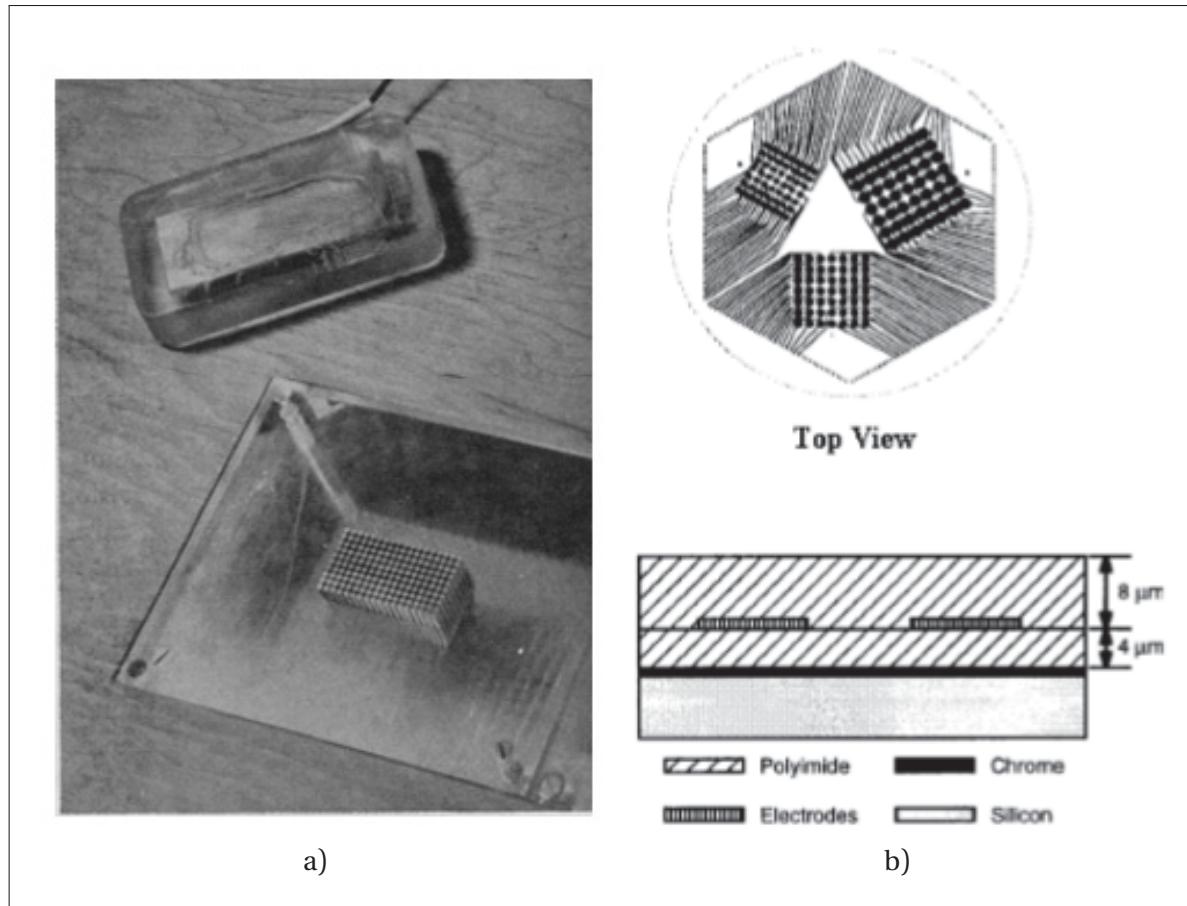


Figure 1.3 Les écrans électrostatiques a) Le premier écran tactile électrostatique avec une matrice de 180 électrodes et une fine couche d'isolation, b) Écran électrostatique développé en utilisant la microfabrication lithographique
Tirées de a) Strong & Troxel (1970) et b) Tang & Beebe (1998)

conducteur électrique, lorsqu'une tension alternative est appliquée à la couche conductrice de l'écran, le glissement d'un doigt sur la surface de cet écran engendre une force d'attraction entre eux. Ceci s'explique de l'induction de charges avec des signes opposés sur la couche isolante du substrat en verre et sur le doigt. Ils ont également observé que la mise à la terre directe accroît considérablement l'intensité de la sensation tactile. Cette mise à la terre peut être réalisée en portant un bracelet antistatique ou encore en se tenant assis ou debout sur un tapis relié à la terre.



Figure 1.4 Première utilisation d'un écran tactile commercial pour procurer des sensations électro-vibratoires
Tirée de Bau *et al.* (2010)

Nakamura & Yamamoto (2016) ont conçu un système d'affichage visuo-haptique de surface multi-utilisateurs. Le système combine le système de rétroaction haptique électrostatique multi-utilisateur, et un système de détection intégré. Afin de générer des sensations différentes et de détecter la position du doigt sans matériel supplémentaire, ils ont fourni le signal d'actionnement haptique aux multiples pavés de contact au lieu de la surface tactile elle-même (Figure 1.5). Pour cela, ils ont appliqué une tension haptique basse fréquence et une tension de détection haute fréquence à chaque pavé.

Wang, Ren, Sarcar & Sun (2016) ont introduit le système électrostatique à base de stylo (EV-Pen), où ils ont appliqué un signal d'entrée au stylo capacitif. Le retour haptique est généré entre le stylo mobile et l'écran tactile capacitif (Figure 1.6).

Bau & Poupyrev (2012) ont proposé REVEL, basé sur le principe de l'électro-vibration inverse. En effet, la tension est appliquée au doigt de l'utilisateur plutôt qu'à la couche conductrice de l'écran touché. Ce qui crée un champ électrique oscillant autour de ses doigts. Ils ont utilisé un générateur de signaux en contact avec le corps de l'utilisateur, et il existe une grande flexibilité quant à l'endroit où ce générateur peut être placé. Le

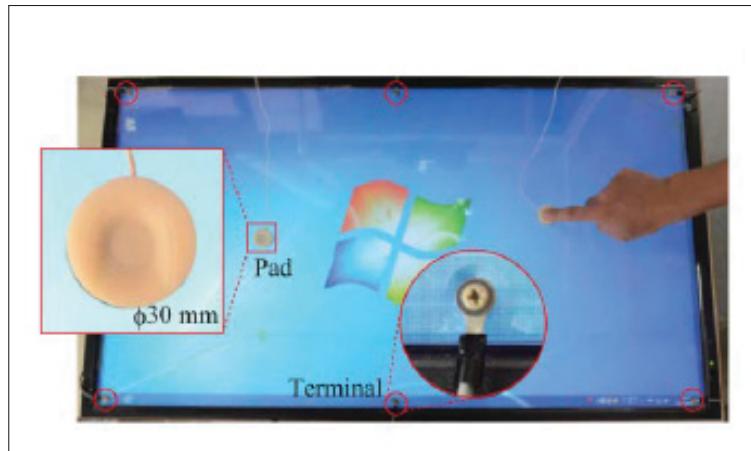


Figure 1.5 Système d'affichage visuo-haptique de surface multi-utilisateur
Tirée de Nakamura & Yamamoto (2016)

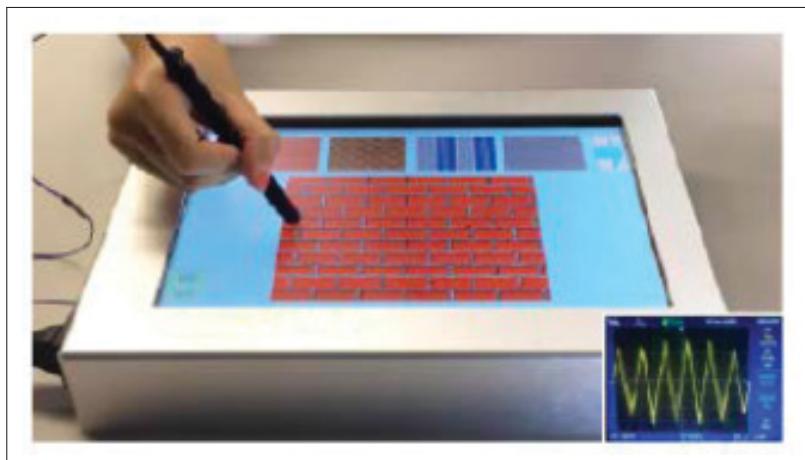


Figure 1.6 Système électrostatique à base de stylo (EV-Pen)
Tirée de Wang *et al.* (2016)

générateur de signaux ainsi que l'objet physique auquel ils ont ajouté des sensations tactiles doivent être couplés électriquement à une référence : la terre. L'approche la plus simple pour établir une masse commune consiste à mettre l'utilisateur à la terre à l'aide d'un câblage explicite, tel qu'un bracelet. Par conséquent, REVEL permet de changer la sensation tactile des surfaces tactiles réelles en les augmentant de textures tactiles virtuelles (Figure 1.7).



Figure 1.7 REVEL : Système basée sur l'électro-vibration inverse
Tirée de Bau & Poupyrev (2012)

1.2.3 Paramètres influençant la rugosité

1.2.3.1 La fréquence

La plage de fréquence pour la sensation sur la peau se situe entre 10 Hz et 500 Hz (Bau *et al.*, 2010). Les faibles fréquences nous donnent l'impression de sentir des bosses éloignées. Tandis que les hautes fréquences nous donnent l'impression de sentir des bosses rapprochées (Figure 1.8), (Levesque & Cruz-Hernandez, 2015; Bau *et al.*, 2010).

Les corpuscules de pacini, qui sont les plus sensibles aux vibrations à 250 Hz, représentent les principaux mécanorécepteurs responsables de la détection du stimulus électro-vibratoire (Vardar, Güçlü & Basdogan, 2017a).

1.2.3.2 La forme d'onde

Vardar, İşleyen, Saleem & Basdogan (2017b) ont étudié la perception de la rugosité sur les écrans électrostatiques. Pour générer des textures virtuelles, ils ont utilisé des ondes d'impulsion unipolaires à basse fréquence avec différentes formes d'onde (sinusoïdale, carrée, en dent de scie, triangle) avec une période spatiale variant de 0,6 à 8 mm. Les

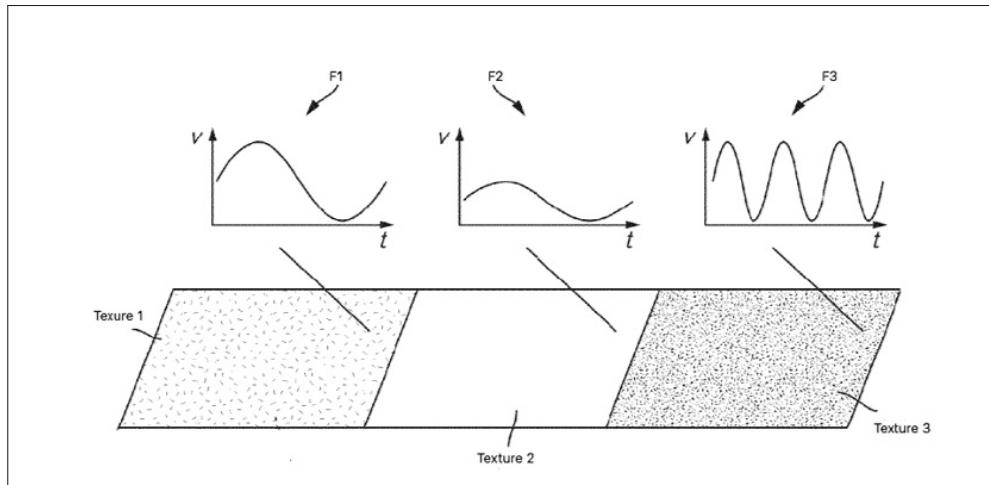


Figure 1.8 Effet de la fréquence du signal sur la rugosité du stimulus

Tirée de Levesque & Cruz-Hernandez (2015)

Résultats de leur étude ont montré que les participants percevaient l'onde carrée comme la plus rugueuse tandis que leur perception haptique des autres formes d'onde n'était pas significativement différente les unes des autres.

1.2.3.3 Amplitude du signal

L'amplitude du signal ne présente aucun effet sur la perception de la texture. Cependant, elle permet l'augmentation de l'intensité des sensations. En effet, lorsque l'amplitude augmente, la sensation devient plus forte. Afin d'assurer la sécurité des utilisateurs, il est conseillé de ne pas monter trop haut en amplitude et de respecter une certaine plage de voltage selon les caractéristiques de l'isolant utilisé.

1.2.4 Paramètres influençant la perception tactile

1.2.4.1 Propriétés du signal d'entrée

Kaczmarek, Nammi, Agarwal, Tyler, Haase & Beebe (2006) ont étudié l'effet des propriétés du signal d'entrée sur la perception de l'électro-vibration. En explorant les différences de

détection des tensions d'entrée positives, négatives et bi-phasiques (polarité qui s'inverse en permanence entre positive et négative). Ils ont démontré que les impulsions négatives et bi-phasiques sont mieux perçues que les impulsions positives. Ils ont proposé que cette disparité puisse être due aux propriétés électriques asymétriques de la peau humaine. Également, ils ont proposé d'utiliser des impulsions négatives pour les écrans tactiles contenant une couche isolante et basés sur l'électro-vibration, car leurs seuils sensoriels sont plus stables que pour les formes d'onde incorporant des impulsions positives. Cette stabilité des seuils pourrait être expliquée par le fait que les impulsions négatives sont moins exposées aux variations des propriétés diélectriques de la peau telles que les changements de la transpiration des participants, de la température ambiante et de l'humidité, que les autres formes d'onde.

Bau *et al.* (2010) ont mesuré les seuils sensoriels d'électro-vibration en utilisant des entrées sinusoïdales avec différentes fréquences. Leur étude démontre que la tension de seuil en fonction de la fréquence évolue en suivant une courbe en U.

Kang, Kim, Choi, Kim & Ryu (2016) ont présenté trois méthodes de signaux de tension d'entrée qui permettent le fonctionnement à basse tension d'un écran d'électro-vibration, tout en préservant la sensation perceptuelle et la force des stimuli d'électro-vibration. La première méthode utilise la modulation d'amplitude d'un signal porteur haute fréquence. La deuxième méthode utilise un Décalage CC (courant continu). Cette méthode est basé sur le fait que l'amplitude de la force d'attraction électrostatique est proportionnelle au carré du niveau de tension appliqué. La troisième méthode utilise une combinaison des deux méthodes. Les résultats expérimentaux ont montré que seule la méthode Décalage CC permet une augmentation significative de la force de frottement statique entre le bout du doigt et la surface de l'écran d'électro-vibration. L'augmentation de la force de frottement statique était proportionnelle au carré du niveau RMS (Root Mean Square), du signal de tension appliqué. Cependant, toutes les trois méthodes ont augmenté la force de frottement dynamique de manière significative, ce qui a été jugé lié à l'effet haute fréquence. En effet, l'effet haute fréquence réduit les charges de fuite selon Meyer, Peshkin & Colgate (2013).

Ils ont mené deux études psychophysiques, la première étude a montré que les trois méthodes proposées peuvent réduire considérablement l'amplitude crête à crête (p-p) d'un signal de tension, tout en générant des électro-vibrations perceptuellement aussi fortes que celles produites par la méthode conventionnelle. Quant à la deuxième étude, elle démontre que les trois méthodes proposées et la méthode conventionnelle peuvent fournir des stimuli perceptuellement similaires malgré leurs différentes formes de signaux et amplitudes de tension (Kang *et al.*, 2016).

Wijekoon, Cecchinato, Hoggan & Linjama (2012) ont étudié l'intensité perçue du frottement modulé généré par l'électro-vibration. Ils ont créé un prototype de système expérimental afin d'évaluer la perception par l'utilisateur des stimuli d'électro-vibration sinusoïdaux sur une surface plane. Leurs résultats expérimentaux ont montré que l'intensité perçue était logarithmiquement proportionnelle à l'amplitude du signal de tension appliqué. L'intensité la plus élevée a été trouvée à 80 Hz, ce qui correspond à 160 Hz comme modulation de frottement.

Vardar *et al.* (2017a) ont mené une étude sur l'effet de la forme d'onde sur la perception tactile de l'électro-vibration sur les écrans tactiles. Grâce à des expériences psychophysiques avec huit participants, ils ont d'abord mesuré les seuils de détection des stimuli d'électro-vibration générés par des tensions sinusoïdales et carrées à 7 fréquences (15, 30, 60, 120, 240, 480 et 1920 Hz). Les résultats expérimentaux de leurs expériences ont montré que la sensibilité tactile en forme de U a été bien identifiée à travers les fréquences. Cependant, pour les fréquences inférieures à 60 Hz, l'onde carrée présente des seuils sensoriels plus bas par rapport à l'onde sinusoïdale. Pour des fréquences plus élevées, les seuils sensoriels étaient similaires.

Ils ont émis l'hypothèse que la différence de sensation des formes d'onde dans les basses fréquences est due à la dépendance à la fréquence des propriétés électriques de la peau humaine et de la sensibilité tactile humaine. Afin de valider leur hypothèse et observer s'il y avait un autre facteur physique susceptible d'affecter la perception d'électro-vibration,

ils ont mené une deuxième expérience avec un autre groupe de huit participants. Ils ont recueilli des données de force et d'accélération du bout des doigts des participants pendant qu'ils exploraient un écran tactile affichant des stimuli d'électro-vibration à des tensions de seuil. Ils ont analysé les données collectées dans le domaine fréquentiel en prenant en compte les courbes de sensibilité tactile humaine (Vardar *et al.*, 2017a).

Les résultats suggèrent que les corpuscules de Pacini étaient les principaux canaux psychophysiques dans la détection des signaux d'entrée à onde carrée testés dans cette étude. De plus, leurs résultats ont montré que les données d'accélération et de force mesurées sont affectées par la vitesse de balayage des doigts (Vardar *et al.*, 2017a).

1.2.4.2 Humidité des doigts

Tang & Beebe (1998) ont démontré que l'humidité diminue la force de perception de l'électro-vibration. En effet, lorsque le temps de contact entre le doigt et la surface d'affichage augmente, une couche de sueur conductrice entre l'écran tactile et la peau s'accumule. Ceci engendre la formation d'un champ électrique entre les électrodes et la couche de sueur plutôt qu'entre les électrodes et la peau. Par conséquent, la force électrostatique sur la peau diminue considérablement. Également, la couche de sueur possède des caractéristiques physiques qui peuvent empêcher la formation d'une force de cisaillement entre le bout du doigt et l'écran tactile, et dégrader la sensation.

1.2.4.3 Propriétés de l'isolant

Agarwal, Nammi, Kaczmarek, Tyler & Beebe (2002) ont étudié l'effet de l'épaisseur diélectrique sur la perception haptique pendant la stimulation électrostatique. Leurs résultats ont montré la mise en place d'une couche supérieure en poyamide de 4.7, 7.3 et 15.9 m comme isolant diélectrique, avait peu d'effet sur les tensions de seuil de la sensation.

1.2.4.4 Force appliquée

Guo, Zhang, Wang, Lu, Jiao & Xu (2019) ont étudié l'influence de la force normale appliquée sur l'amplitude de la perception d'électro-vibration. Ils ont mené une expérience d'estimation de la magnitude pour observer comment la perception d'électro-vibration est liée à la force normale appliquée, allant de 0,5 à 5 N.

Leurs résultats montrent que l'amplitude de la perception d'électro-vibration augmentait avec l'augmentation de la force normale appliquée. De même, le frottement induit par la force électrostatique augmente avec la force normale appliquée (Guo *et al.*, 2019).

1.2.5 Exemples d'applications de l'électro-vibration

L'électro-vibration peut être utilisée dans de nombreuses applications.

Le rendu haptique présenté par Ilkhani, Aziziaghdam & Samur (2017) consiste à collecter des données de surface à partir de textures réelles à l'aide d'un accéléromètre, puis à les reproduire sur un écran tactile. Les résultats des expériences psychophysiques de cette étude ont démontré une grande similitude entre les textures virtuelles et les textures réelles.

Bau *et al.* (2010) ont mis en œuvre plusieurs applications importantes telles que l'enrichissement des éléments conventionnels de l'interface graphique avec un retour tactile. En effet, il suffit de passer le doigt sur une liste de courriels pour découvrir ceux qui sont nouveaux ou importants. De même, ils ont mis en évidence la création de couches d'informations non visuelles par le biais de la rétroaction tactile. Par exemple, l'image visuelle d'un champ d'étoiles pourrait être complétée par une image tactile de l'intensité du rayonnement ressenti par le passage d'un doigt sur les zones d'intérêt.

Également, Bau *et al.* (2010) ont mis en œuvre deux applications potentielles de l'électro-vibration avec le toucher à plusieurs doigts. La première application était les gestes ancrés, qui représentent des gestes où un doigt définit un point de référence, tandis qu'un autre doigt est utilisé pour la manipulation (Figure 1.9a). Un exemple de cette application est la

transformation des formes, où un doigt définit un point de référence statique, tandis qu'un doigt en mouvement spécifie la quantité de transformation telle que l'étirement, la rotation ou le zoom. Dans toutes ces opérations, Bau *et al.* (2010) assurent l'ajout du retour tactile au doigt mobile. Ce retour haptique permet d'améliorer le réalisme des environnements visuels. Également, il accroît l'efficacité de l'interface, car les usagers peuvent s'appuyer sur des indications haptiques familières pour accomplir leurs tâches d'interaction.

Quant à la deuxième application, il s'agit de la manipulation asynchrone à deux mains. En effet, ce sont des gestes qui utilisent une séparation asymétrique du travail entre les deux mains (Figure 1.9b). Par exemple, une main non dominante pourrait effectuer une manipulation grossière, telle que l'orientation d'une feuille de papier, tandis que la main dominante effectue une interaction plus précise, telle que l'écriture. Comme dans l'exemple précédent, un ou plusieurs doigts sont statiques, tandis qu'un ou plusieurs sont engagés dans le mouvement et dotés d'un retour tactile (Bau *et al.*, 2010) .

Le développement des outils pour les malvoyants présente aussi une application potentielle de l'électro-vibration. Dans ce contexte, Israr, Bau, Kim & Poupyrev (2012) ont développé une application pour les malvoyants pour interpréter et créer des informations tactiles 2D à l'aide de l'électro-vibration. Ils ont affiché des points, des lettres en braille et des formes pour moduler l'amplitude et la fréquence des signaux de la tension d'entrée. Les résultats de ces expériences montrent que les participants reconnaissaient facilement les points et les formes. Cependant, la reconnaissance des lettres était difficile.

Levesque, Cruz-Hernandez, Weddle & Birnbaum (2016) ont mis en œuvre une application inspirée de livres pour les enfants en ajoutant des caractéristiques tactiles telles que des tissus, de la fourrure et des pièces mobiles. Le livre virtuel a mis l'accent sur l'électro-vibration en ajoutant cinq pages interactives, telles que des animaux aux textures différentes, de la fourrure douce aux écailles; un bloc de glace qui peut être frotté en révélant un monstre; une voiture suspendue qui peut être libérée en coupant ou en sciant des cordes,

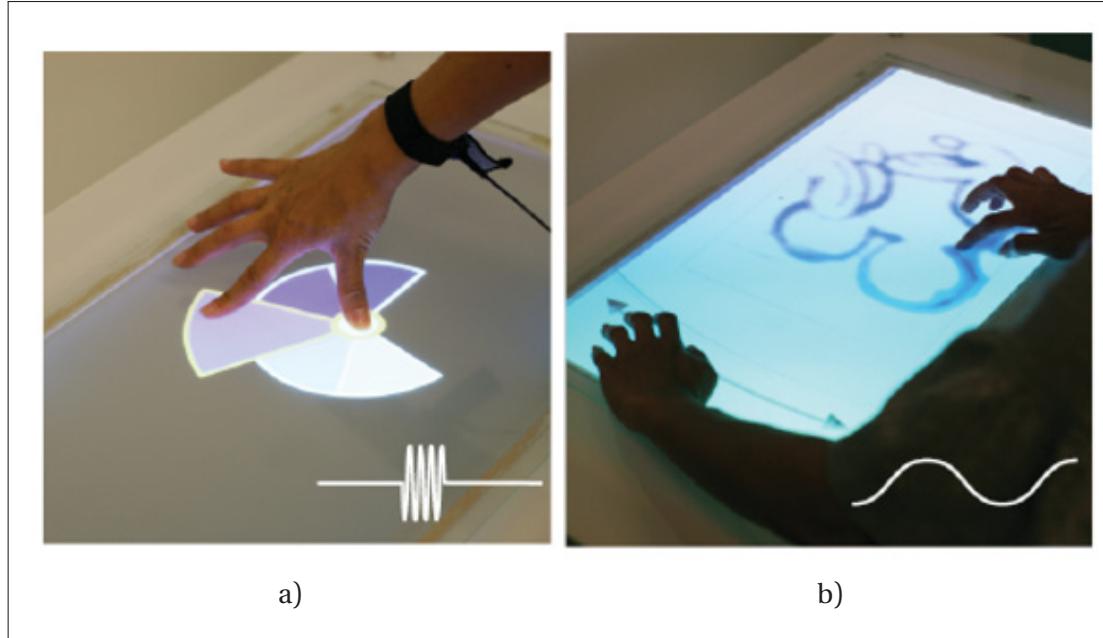


Figure 1.9 a) Exemple de gestes ancrés : La sélection dans un menu, où un doigt est statique tandis qu'un autre se déplace en rotation pour sélectionner un élément. b) Exemple de manipulation asynchrone à deux mains : la main dominante sert à dessiner ; la main non dominante contrôle l'orientation
 Tirées de Bau *et al.* (2010)

un personnage glissant qui effleure la page lorsqu'elle est déplacée, et un coffre-fort qui peut être ouvert en tournant un cadran.

La particularité de cette application est que l'activation de la rétroaction est commandée en tirant sur un ruban au lieu d'appuyer sur un bouton, permettant ainsi de produire une rétroaction de frottement (Levesque *et al.*, 2016).

Bau & Poupyrev (2012) ont étendu l'utilisation de l'électro-vibration au-delà des écrans tactiles et ont exploré les applications du retour tactile sur des objets du monde réel. Ils utilisent le principe de l'électro-vibration inverse, qui consiste à injecter un faible signal électrique n'importe où sur le corps de l'utilisateur, créant un champ électrique oscillant autour de ses doigts. En glissant les doigts sur la surface de l'objet, l'utilisateur perçoit des textures tactiles virtuelles très distinctes qui augmentent l'objet physique.

En tant qu'applications, Bau & Poupyrev (2012) ont proposé les surfaces augmentées tel que le retour tactile sur un écran mural projeté. D'autres concepts ont également été proposés, tels que l'ajout de textures tactiles aux impressions physiques, la communication de messages personnalisés et privés sur des écrans tactiles publics et des applications d'assistance (par exemple, guider une personne malvoyante avec un guide tactile contre un mur).

1.3 Conception des interfaces haptiques

Selon Norman (2013), le degré de portabilité d'une interface haptique est fortement lié à sa conception. En effet, l'utilisateur doit être capable de déterminer les différentes actions possibles et comprendre comment le produit est sensé être utilisé, ainsi que les différents contrôles et paramètres. Afin de garantir que les produits répondent réellement aux besoins de l'homme tout en étant compréhensibles et utilisables, l'interaction entre la technologie et l'individu est très importante.

D'autre part, il faut satisfaire non seulement aux exigences d'ingénierie, de fabrication et d'ergonomie, mais aussi à l'ensemble de l'expérience telle que l'esthétique de la forme et à la qualité de l'interaction. La bonne conception commence par une bonne compréhension de la psychologie de l'utilisateur et de la technologie. La conception centrée sur l'utilisateur présente une approche qui donne la priorité aux besoins, aux capacités et au comportement de l'homme, puis à une conception adaptée à ces besoins (Norman, 2013).

Selon Norman (2013), la découvrabilité consiste à comprendre le fonctionnement d'un produit lors d'une interaction. Elle résulte de l'application appropriée de quatre concepts psychologiques fondamentaux :

- **l'affordance** : Présente les interactions possibles entre l'homme et l'environnement.
- **les signifiants** : Permettent de signaler des choses qui doivent être perceptibles.
- **la cartographie** : Décrit la relation entre les éléments présents au sein de deux groupes différents.

- **la rétroaction :** Communique les résultats d'une action ; doit être informative, planifiée et hiérarchisée.

1.3.1 La conception de l'expérience haptique

Afin d'approcher la technologie et l'expérience utilisateur, la pensée conceptuelle présente un moyen puissant. Selon Schneider, MacLean, Swindells & Booth (2017), il existe trois activités de design qui reflètent la pensée conceptuelle. D'abord, il y a la préparation du problème. En effet, les tâches créatives, comme la conception, sont souvent définies comme la recombinaison d'idées existantes avec une touche de nouveauté par le créateur. Ensuite, les esquisses présentent un langage fondamental de conception, sont rapides et permettent d'exploiter l'ambiguïté. D'autre part, elles permettent une nouvelle vision partielle du design ou du problème proposé. Enfin, la collaboration permet de générer des idées plus variées que le travail individuel.

Selon Schneider *et al.* (2017), l'expérience haptique est de nature holistique. Elle implique le toucher, la vision et le son, qui sont intégrés verticalement. Plusieurs points doivent être pris en considérations :

- en tant qu'implications pour la mise en œuvre, les composantes haptiques doivent être directement liées à la mécanique interne du système.
- la génération de différentes sensations permet d'améliorer la conception.
- l'importance du temps. En effet, sans rétroaction rapide les expériences haptiques s'effondrent.
- les contraintes et le contexte inconnu. En effet, d'autres modalités peuvent imposer des contraintes qui peuvent ne pas toujours être connues.
- l'adaptation et la personnalisation. En effet, les concepteurs adaptent leurs solutions à chaque application et les utilisateurs finaux bénéficient de la personnalisation.

D'après Schneider *et al.* (2017), la conception de l'expérience haptique nécessite un système collaboratif avec une équipe multidisciplinaire. Le concept culturel lors de la conception de l'expérience haptique est indispensable. Plusieurs points doivent être pris en considération :

- la compréhension des exigences. En effet, les clients et les concepteurs ont du mal à articuler et à comprendre les objectifs.
- l'évaluation des expériences haptiques. En effet, afin d'assurer la validité des expériences, des tests d'acceptabilité et de déploiement doivent être effectués.
- la propriété intellectuelle. En effet, la technologie haptique et les composants d'origine sont souvent des technologies secrètes.
- l'expérience utilisateur et la marque. En effet, les expériences tactiles procurent des avantages intangibles et permettent de surmonter les risques et les coûts.

Afin d'obtenir une meilleure conception haptique, les recommandations de développement de Schneider *et al.* (2017) sont de :

- développer des interfaces haptiques adaptables. Pour ce faire il faut que les interfaces haptiques soient adaptées à leurs contextes de manière automatique ou à l'aide du concepteur, d'un client ou d'un utilisateur final.
- exploiter la virtualisation, qui représente certains types d'itérations ou de tests qui peuvent être réalisés plus efficacement avec des simulations logicielles ou des évaluations participatives.
- établir une infrastructure conceptuelle plus riche. En effet, un langage de conception haptique est indispensable pour la communication entre les membres de l'équipe multidisciplinaire et les clients.

1.3.2 Les dispositifs haptiques portables

Les dispositifs haptiques portables ont été développés afin de permettre à l'utilisateur d'avoir une interaction plus réaliste et plus naturelle. Elles permettent également de nou-

velles formes de communication, de coopération et d'intégration entre l'homme et les robots.

Selon Pacchierotti, Sinclair, Solazzi, Frisoli, Hayward & Prattichizzo (2017), le niveau de portabilité des dispositifs haptiques dépend de :

- **le facteur forme :** Le dispositif haptique portable doit être adapté à la partie du corps à laquelle il sera attaché.
- **le poids :** Le dispositif haptique portable doit être adapté à la force du support musculo-squelettique de la partie du corps sur laquelle il est porté.
- **la dégradation :** Provoquée par les dispositifs haptiques portables : Les dispositifs portables doivent pouvoir s'adapter naturellement au corps humain sans l'altérer ni interférer avec ses actions. D'autre part, ils doivent pouvoir fonctionner sans nécessiter d'action volontaire supplémentaire.
- **le confort :** Afin d'être confortables, les dispositifs portables doivent être adaptables aux différentes tailles de membres.

1.3.3 Perception des vibrations dans les diverses parties du corps dans des contextes mobiles

Karuei, MacLean, Foley-Fisher, MacKenzie, Koch & El-Zohairy (2011), ont étudié la sensibilité de plusieurs sites corporels vis-à-vis des signaux vibrotactiles. Ils ont réduit le nombre de sites corporels à ceux qui conviennent le mieux aux applications mobiles et haptiques portables, notamment le poignet, les bras, les cuisses, les pieds, la poitrine, le ventre et la colonne vertébrale. Ces emplacements ont servi aux systèmes tactiles portables tels que les ceintures, les bandes dorsales, les bracelets de poignet et de bras, les chaussures tactiles et surtout les téléphones portables dans les poches. Ils ont comparé ces sites corporels, en utilisant cinq intensités de vibration, en présence ou en absence d'une charge de travail visuelle, en étant assis sur une chaise ou bien en marchant sur un tapis roulant, et en connaissant ou non l'emplacement des prochains stimuli. Ils ont également examiné les différences

entre les genres. Les résultats montrent que les participants ont choisi les poignets pour les applications de notification, les bras et les poignets pour le guidage directionnel, et la colonne vertébrale comme emplacement le plus approprié pour les signaux vibrotactiles pendant l'exercice. Un autre résultat remarquable est que les cuisses étaient parmi les sites les moins efficaces et les moins préférés des stimuli testés; pourtant, la poche avant est un endroit courant pour ranger un téléphone portable.

1.4 Les textiles intelligents

Pendant les dernières décennies, les textiles ont évolué, passant de textiles servant simplement à nous vêtir à des textiles intelligents, interactifs et réagissant à leur environnement.

1.4.1 Les capteurs de tissu intelligent

Selon Castano & Flatau (2014), Les capteurs de tissu intelligents sont des tissus dotés de propriétés de détection et sensibles à de multiples stimuli physiques et chimiques. De plus, les transducteurs de tissu intelligents sont des tissus traités ou modifiés pour servir en tant que des capteurs ou des actionneurs. Ils fournissent des fonctionnalités pour mesurer ou influencer l'environnement ou le sujet dans lequel ils sont employés.

1.4.2 Le textile électronique

Un textile électronique est un type de tissu contenant des composants électroniques intégrés par tissage. Comme ils font partie du tissu, ils sont beaucoup moins visibles et, surtout, ils ne risquent pas de s'emmêler ou de s'accrocher dans l'environnement. Un textile électronique combine l'expressivité visuelle et haptique des textiles avec l'utilité des éléments électroniques afin de permettre aux utilisateurs de créer des artefacts textiles expressifs, interactifs et fonctionnels (Weng, Chen, He, Sun & Peng, 2016).

Sketch and stitch (Hamdan, Voelker & Borchers, 2018), ainsi que Projet Jacquard (Poupyrev, Gong, Fukuhara, Karagozler, Schwesig & Robinson, 2016) présentent deux articles significatifs de la littérature portant sur les textiles électroniques.

Selon Hamdan *et al.* (2018), Sketch and Stitch présente une méthode révolutionnaire permettant de créer des textiles électroniques. Il s'agit d'un système de broderie interactif qui permet de créer des textiles électroniques rapidement et de façon itérative en dessinant sur le tissu. Le système comprend un téléphone intelligent, un bouton sans fil, un ordinateur, et une machine à broder. Il exécute deux logiciels personnalisés pour la capture et la numérisation de croquis et un outil de broderie exclusif pour convertir les images en points. Les utilisateurs capturent un motif avec le bouton, le vérifient sur l'écran d'un ordinateur, puis il sera envoyé vers la machine à broder pour la couture.

Selon Poupyrev *et al.* (2016), le projet Jacquard présente une méthode de création des textiles interactifs flexibles, légers et peu coûteux, en utilisant des fils personnalisés hautement conducteurs et une technologie de tissage. Ces fils ont été fabriqués à partir d'alliages de cuivre mince isolés avec le polyuréthane, ils possèdent des propriétés mécaniques comparables aux propriétés des textiles standards et une bonne résistance. En plus d'être dans des emplacements bien définis selon l'application, l'interactivité des textiles doit être parfaitement intégré au tissu et non en tant que complément externe. Pour ce faire, le projet jacquard utilise une technique de tissage 3D avancée afin de localiser avec précision les zones interactives et de les masquer complètement en les rendant invisibles ou de les rendre visibles et tactiles en les combinant avec des formes tactiles.

En tant qu'applications du projet Jacquard, Poupyrev *et al.* (2016) ont introduit des vêtements intelligents. En effet, une certaine zone du vêtement peut devenir une zone interactive sensible au toucher (Figure 1.10). Cette interface est ensuite connectée à des téléphones portables intégrant la reconnaissance de gestes de base, tels que glisser, maintenir et tapoter. Ces gestes sont alors associés à des tâches courantes telles que répondre à un appel télé-

phonique, passer un appel téléphonique à un numéro spécifié, ou encore appeler un service.

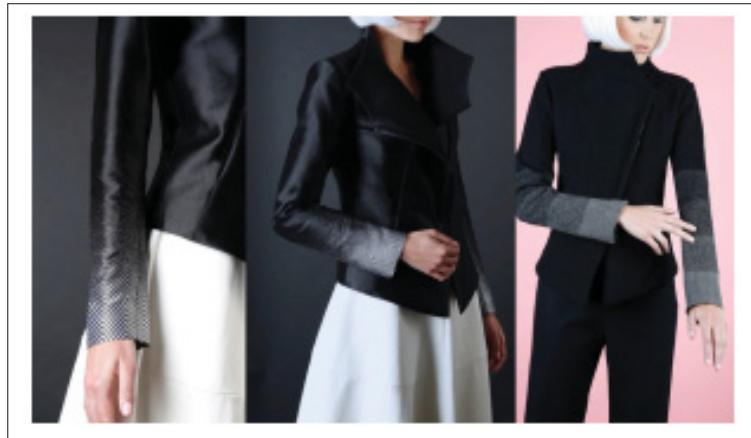


Figure 1.10 Vêtements interactifs avec le projet Jacquard
Tirée de Poupyrev *et al.* (2016)

Les environnements interactifs et l'Internet des Objets représentent également une application intéressante des textiles interactifs, puisqu'ils permettent, par exemple, le commandement d'un lecteur mobile qui diffuse de la musique ou le contrôle d'une ampoule électrique, en changeant ses couleurs, en l'allumant ou en l'éteignant (Poupyrev *et al.*, 2016).

1.5 Conclusion

Les études menées jusqu'à présent révèlent les propriétés intéressantes de l'électro-vibration, qui permet de générer de vastes sensations tactiles sur des écrans tactiles sans recourir à des actionneurs mécaniques. Elles exploitent également les bénéfices des dispositifs portables, qui permettent des interactions plus réalistes et naturelles, de même que les textiles intelligents qui sont interactifs et réagissent à leur environnement. Cependant, la littérature n'exploite pas l'électro-vibration dans les dispositifs et les vêtements portables. De même, elle n'envisage pas les objets électro-vibrants qui stimulent diverses parties du corps. En effet, cette technologie est fréquemment utilisée que pour fournir une large gamme de sensations tactiles aux doigts se déplaçant sur un écran tactile, et elle est peu utilisée sur les

objets du quotidien. Nous pensons aussi qu'un objet portable électro-vibrant permet des applications prometteuses et des formes innovantes de communication et de transmission d'informations.

CHAPITRE 2

EXPLORATION DES VÊTEMENTS ET DES DISPOSITIFS PORTABLES ÉLECTRO-VIBRANTS

L'électro-vibration représente l'une des technologies haptiques les plus prometteuses, étant donné sa facilité de réalisation, sans nécessiter d'actionneurs mécaniques. Elle permet de générer des sensations tactiles riches, en modulant la friction entre le bout du doigt d'un utilisateur et la surface d'un écran tactile (Bau *et al.*, 2010). Bien que l'électro-vibration permette des interactions naturelles et intuitives, les applications qui peuvent en bénéficier sont limitées, puisqu'elle n'est pas explorée dans les dispositifs portables et les vêtements, et elle ne stimule que le bout du doigt.

Dans ce chapitre, nous proposons d'étendre l'électro-vibration aux dispositifs portables tels que les bracelets, les bijoux et les vêtements. Dans la Section 2.1, nous présentons l'espace de conception et les applications possibles des dispositifs portables. Dans la Section 2.2, nous abordons la fabrication de surfaces électro-vibrantes et la stimulation de diverses parties du corps. Finalement, dans la Section 2.3, nous évoquons la fabrication de surfaces électro-vibrantes au moyen des plaques capacitatives coupées et les dispositifs portables possibles.

2.1 Espace conceptuel et applications envisageables

Nous présentons dans cette section un espace conceptuel de dispositifs d'électro-vibration portables, ainsi que des applications possibles.

2.1.1 Espace conceptuel

L'exploration de l'électro-vibration dans des dispositifs portables permet de créer des interfaces dynamiques, riches et satisfaisantes. En effet, la génération de sensations tactiles

variées, stimulant diverses régions du corps a le potentiel d'améliorer l'expérience de l'utilisateur et d'offrir de nouvelles façons d'interagir avec l'information.

Nous proposons deux formes d'interaction qui sont susceptibles de se produire avec des objets électro-vibrants portables, tels que des bijoux, des bracelets et des vêtements. La première consiste à interagir délibérément, en faisant glisser une partie de la main contre la surface externe d'un objet électro-vibrant (Figure 2.1b). La seconde consiste à interagir accidentellement avec les objets portables, en se déplaçant naturellement et en effleurant la peau d'une partie du corps contre leur surface interne électro-vibrante (Figure 2.1a). Les interactions délibérées sont mieux adaptées aux zones facilement accessibles avec la main, comme le poignet, l'avant-bras ou les cuisses. De nombreux objets peuvent servir comme surfaces électro-vibrantes pour ces types d'interactions, comme les bracelets, la manchette de vestes et les brassards. Les interactions accidentelles nécessitent une friction contre les parties mobiles du corps, comme le poignet contre un bracelet ou une manchette de veste, le cou contre le col, les cuisses contre le pantalon, un doigt contre une bague, ou les oreilles contre les lunettes.

Dans de nombreux cas, les interactions qui sont typiquement accidentelles peuvent également être déclenchées par des mouvements délibérés. Nous pensons que les vêtements électro-vibrants pourraient permettre de nouvelles formes de communication et de transmission d'informations, seuls ou en combinaison avec des technologies d'entrée portables telles que les tissus tactiles.

2.1.2 Les applications envisageables

Des idées d'applications potentiellement intéressantes et prometteuses ont été collectées lors de séances de brainstorming organisées avec les membres de notre groupe de recherche. Citons, par exemple, la possibilité de toucher un bracelet ou le revers d'une veste pour obtenir des indications de direction et d'orientation lors d'une promenade pour les per-

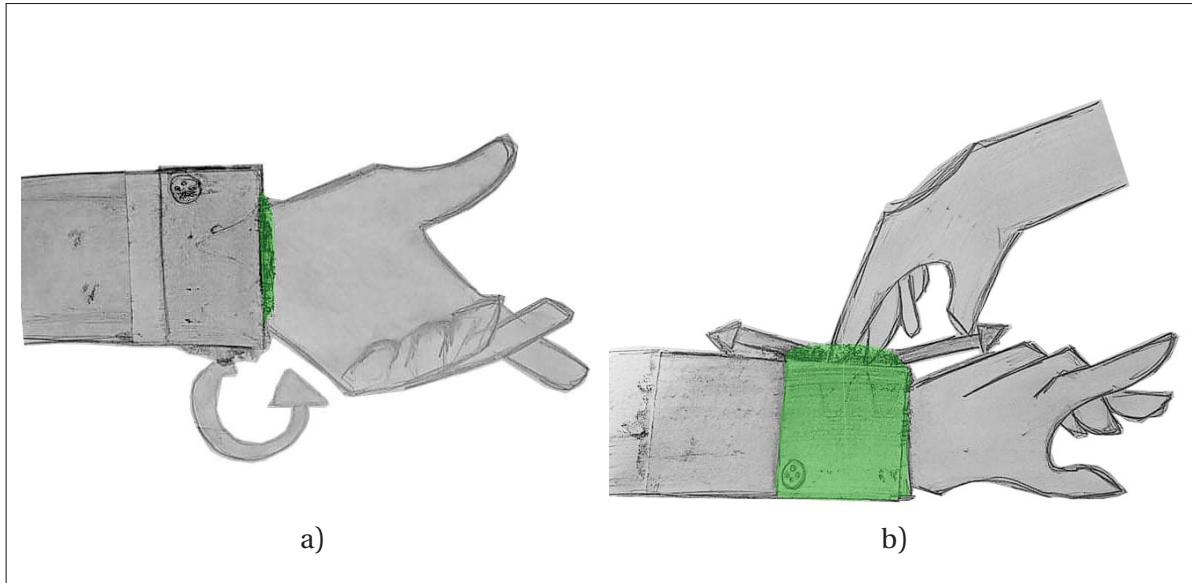


Figure 2.1 Exemples conceptuels d'interactions a) accidentnelles et b) délibérées avec la manchette électrovibrante d'une chemise. La surface électrovibrante est représentée en vert

sonnes malvoyantes. De même, la surface électro-vibrante d'un pantalon ou d'une chemise peut subtilement et secrètement informer un usager dans une réunion professionnelle, de l'importance d'une notification ou d'un courriel reçu, sans déranger les autres. Dans cette optique, Anderson, Grossman, Wigdor & Fitzmaurice (2015) ont présenté une approche de l'interaction subtile ainsi qu'un cadre qui permet de classer les interfaces subtiles.

La rétroaction tactile dans les jeux vidéo représente également une application appréciable, fournissant une immersion et un réalisme accrus, particulièrement avec les appareils portables et les vêtements. En effet, il est possible de toucher la surface électro-vibrante d'un vêtement pour sentir une blessure ou pour localiser un ennemi. Une autre application significative proposée est le couplage d'un retour visuel avec un retour tactile réel portant sur diverses surfaces électro-vibrantes d'une veste, dans le but de fournir des informations sur les caractéristiques du tissu lors d'un achat en ligne.

Nous estimons que l'exploration de l'électro-vibration dans les dispositifs et vêtements portables offre des interactions beaucoup plus riches et gratifiantes, y compris dans les

conditions de mouvement de l'utilisateur, sans être bruyantes ou gênantes. Grâce aux caractéristiques intéressantes de l'électro-vibration, telles que la faible consommation d'énergie, le fonctionnement silencieux et la facilité de la mise en œuvre dans des formats fins, évitant ainsi l'encombrement des actionneurs mécaniques. Cependant, pour assurer une expérience harmonieuse, nous considérons qu'il serait approprié que les dispositifs et les vêtements portables soient souples et flexibles afin de s'adapter aux comportements mécaniques du corps humain.

2.2 Fabrication de surfaces électro-vibrantes et stimulation des diverses parties du corps

La souplesse, la flexibilité et l'aspect lisse des matériaux conducteurs sélectionnés pour la fabrication des dispositifs électro-vibrants portables constituent des facteurs déterminants. Le choix de l'isolant électrique appliqué est aussi important, puisqu'il doit être assez fin, lisse et homogène pour que les sensations générées puissent être perçues et que la sécurité de notre dispositif soit garantie.

2.2.1 Dispositif de base pour générer les signaux électro-vibratoires

Un dispositif de base pour générer des signaux électro-vibratoires est constitué des éléments suivants (Figure 2.2) :

- **un générateur de fréquence** : Permet de générer un signal de 2 V, avec des fréquences de 15 à 500 Hz et une forme d'onde sinusoïdale.
- **un amplificateur de tension (modèle TREK 2205)** : Permet d'obtenir une tension de 100 V, qui est une tension suffisante pour être perceptible. Cet amplificateur possède un multiplicateur de 50, qui permet de multiplier la tension 2 V du générateur par 50 afin d'obtenir les 100 V visés.
- **un oscilloscope avec sonde haut-voltage** : Permet un retour visuel sur le signal de sortie.

- **une résistance :** La résistance limite le courant à 5 mA en cas de court-circuit, afin d'assurer la sécurité de notre dispositif.
- **un bracelet de mise à la terre antistatique :** Ce bracelet sera relié au poignet du participant.
- **une plaque conductrice et un isolant électrique :** La plaque conductrice et l'isolant électrique servant de surface électro-vibrante.

Il est primordial de minimiser l'impact des chocs électriques, en particulier pour les vêtements et les dispositifs portables. Pour y parvenir, la sécurité de notre dispositif a été améliorée par l'ajout d'un interrupteur à pédale. En effet, en cas de choc électrique, le participant peut retirer facilement son pied de la pédale pour interrompre l'alimentation. De plus, nous avons ajouté un interrupteur d'arrêt d'urgence pour désactiver l'amplificateur à tout moment.

2.2.2 Test de référence avec la plaque capacitive

Afin de comprendre à quoi correspondent les sensations obtenues sur le doigt avec l'électro-vibration, nous avons commencé par faire un test de référence avec la plaque capacitive 3M, qui est un écran tactile commercial (SCT 3250) utilisé dans l'électro-vibration (Figure 2.3). Tous les tests que nous allons faire ultérieurement vont être évalués en se basant sur les sensations fournies par cette plaque. Les tests ont été réalisés par moi-même (P1), et ma partenaire de recherche Laura RAJKOWSKI (P2). Les deux participantes seront invitées à déplacer leurs doigts sur la surface de la plaque capacitive et donner leurs retours par rapport aux sensations obtenues. La plaque a été soumise à un signal sinusoïdal d'une amplitude de 100 V et d'une fréquence de 50 Hz. Nous adapterons ce signal pour tous les essais ultérieurs.

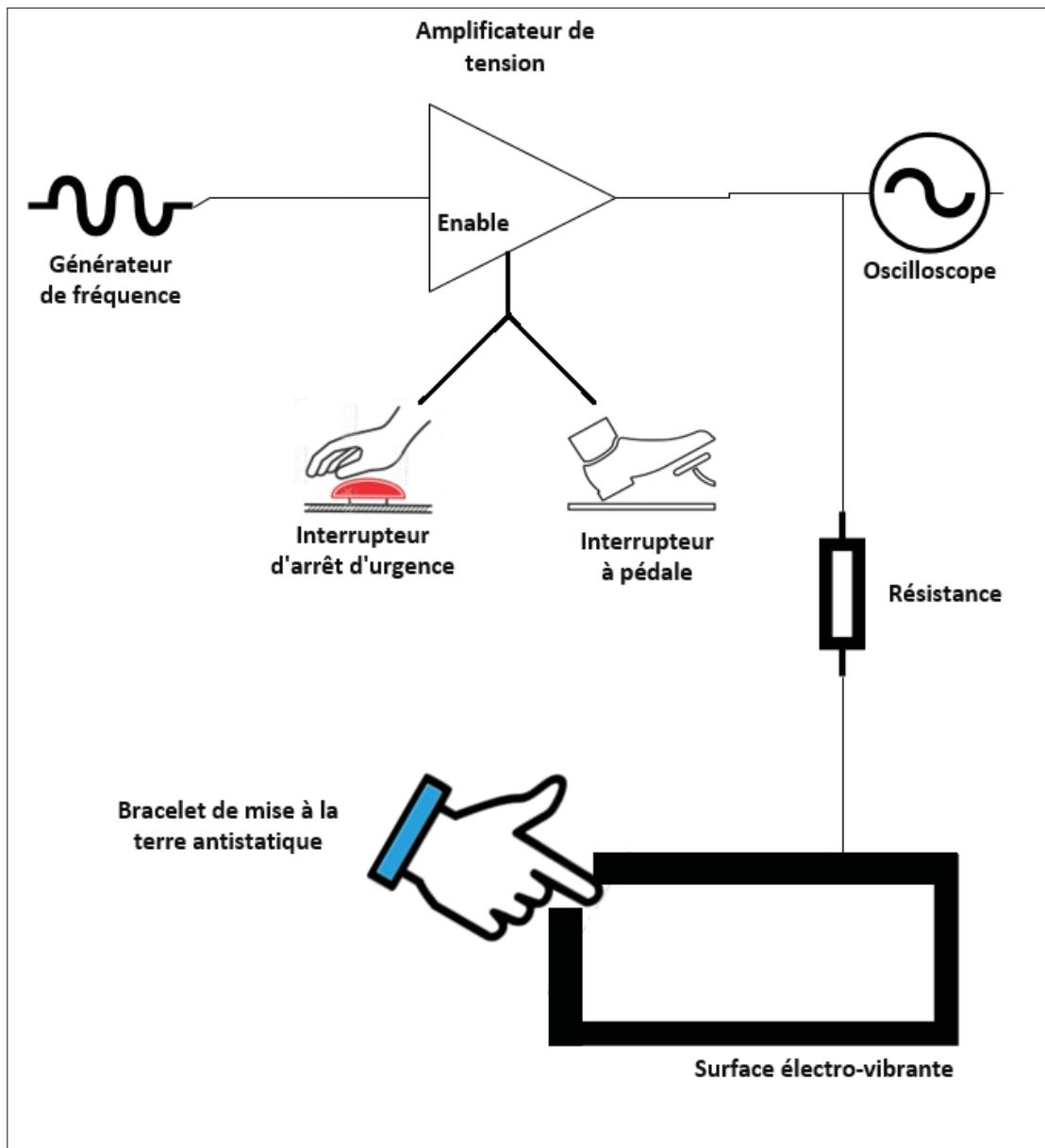


Figure 2.2 Illustration du dispositif de base pour générer des signaux électro-vibratoires

Suite aux tests réalisés, nous avons constaté qu'une plaque capacitive excitée avec un signal sinusoïdal d'amplitude 100 V et de fréquence 50 Hz permet une sensation bien claire et une différence de texture bien distinguable pour les deux participantes.

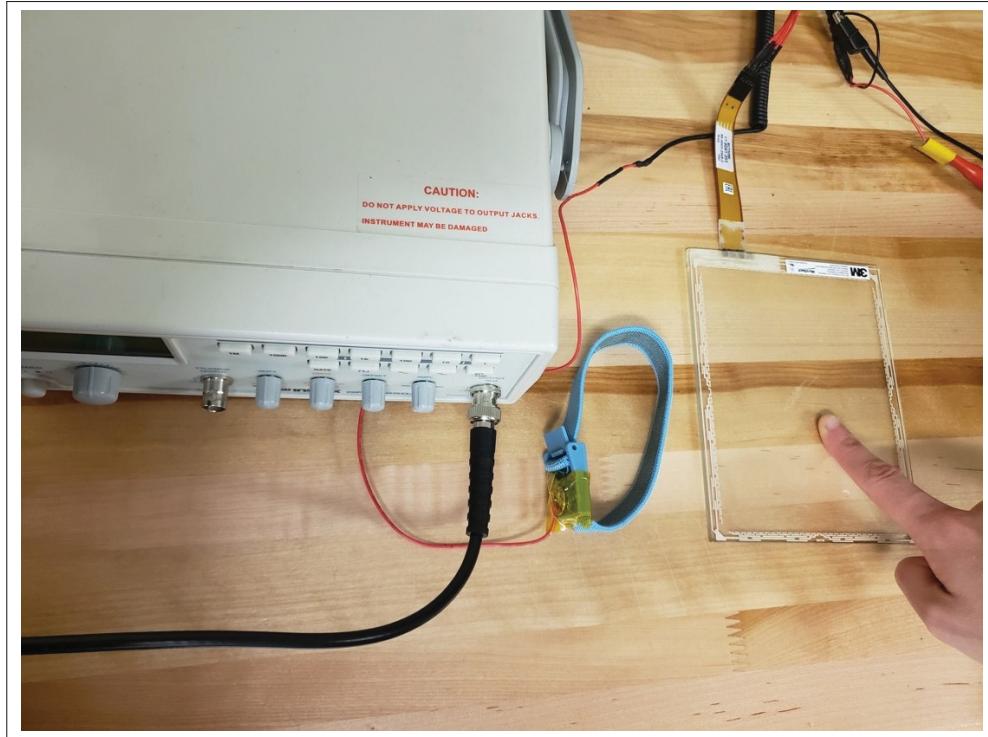


Figure 2.3 Test de référence avec la plaque capacitive 3M

2.2.3 Effet des isolants électriques proposés pour la fabrication des surfaces électro-vibrantes

Dans le but d'étudier l'effet de l'isolation électrique sur la perception tactile et ainsi fabriquer des surfaces électrovibrantes, nous avons choisi comme isolants le film polyamide et la peinture isolante. La peinture isolante représente le matériau isolant utilisé pour Revel (Bau & Poupyrev, 2012).

Le choix s'est porté sur ces isolants car ils sont très présents sur le marché et peuvent être utilisés pour réaliser des prototypes rapides. Ils sont également de faible épaisseur et s'adaptent à de nombreuses surfaces. Notre choix s'est également porté sur le dioxyde de silicium, qui est l'isolant utilisé pour les plaques capacitatives commerciales.

2.2.3.1 Le film en polyamide ou film Kapton

Le film en polyamide présente un film fin et souple avec des propriétés d'isolation électrique intéressantes. Il se présente sous forme d'un papier adhésif de plusieurs épaisseurs dont l'épaisseur la plus fine est $25 \mu m$ (Figure 2.4). Sa souplesse lui permet de s'adapter à plusieurs formes.



Figure 2.4 Plaque d'aluminium isolée avec un film en polyamide

Nous avons utilisé le film en polyamide comme isolant d'une plaque d'aluminium et d'une plaque de cuivre avec trois épaisseurs différentes : 0.0635 mm, 0.0381 mm et 0.0254 mm, qui représentent les épaisseurs les plus minces trouvées sur le marché. Les plaques étaient excitées avec un voltage de 100 V et une fréquence de 50 Hz, afin de stimuler le bout du doigt. La tension a été progressivement augmentée jusqu'à 200 V.

Les résultats préliminaires obtenus avec le film en polyamide comme isolant montrent que les deux participantes n'étaient pas capables de sentir des différences de textures. Même en allant vers de hauts voltages de 200 V, les textures restent difficiles à distinguer et la sensation est très subtile par rapport à la plaque capacitive. Cet isolant ne semble pas donner de bons résultats dans notre cas. Cependant, il pourra être utile dans des applications où il est possible d'aller vers de plus hauts voltages. Nous remarquons aussi qu'il n'y avait pas de différence entre la plaque d'aluminium et la plaque de cuivre au niveau des sensations générées.

2.2.3.2 La peinture isolante

La peinture isolante est disponible dans le marché sous forme de vaporisateur ou de pot et elle s'adapte à plusieurs types de surfaces (Figure 2.5).

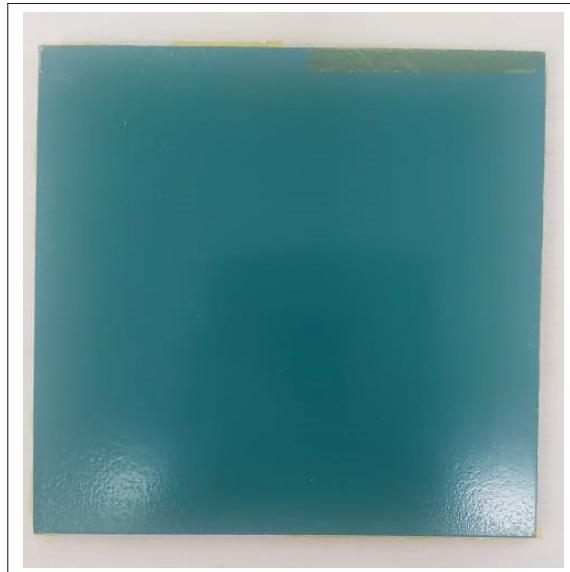


Figure 2.5 Plaque d'aluminium isolé avec la peinture isolante

Nous avons utilisé la peinture isolante en tant qu'isolant d'une plaque de cuivre et d'une plaque d'aluminium. Afin de varier l'épaisseur de la couche isolante, nous avons appliqué deux couches de peinture au début, et une seule couche par la suite. Les plaques étaient excitées avec un voltage de 100 V et une fréquence de 50 Hz, afin de stimuler le bout du doigt. La tension a été progressivement augmentée jusqu'à 160 V.

Les résultats préliminaires obtenus montrent que la peinture isolante nous permet de ressentir des sensations similaires à la plaque capacitive. Idéalement, il faut appliquer une couche très fine et uniforme afin de pouvoir ressentir des sensations différenciables. Nous remarquons aussi que la plaque d'aluminium et la plaque de cuivre se ressemblent au niveau des sensations.

Bien qu'il a été démontré que la perception haptique de l'électro-vibration augmente avec l'accroissement de la force appliquée, même jusqu'à des forces de 5N (Guo *et al.*, 2019). Il convient de mentionner que, selon les tests que nous avons effectués, il s'est avéré que lorsque nous appuyions très fort, il était difficile de percevoir les sensations générées. La force optimale qui permet la perception du stimulus électro-vibratoire est comprise entre 0,1 N et 0,6 N (Adams, Johnson, Lefèvre, Lévesque, Hayward, André & Thonnard, 2013).

2.2.3.3 Le dioxyde de silicium ou silice

C'est un composant chimique de formule SiO₂. Il s'agit d'un bon isolant électrique avec une résistivité allant de 10^{12} à 10^{16} Ω, pour les formes cristallines ¹. Il est possible de le déposer sous forme d'une ou de plusieurs couches sur un matériau et son épaisseur peut aller de 50 nanomètres à quelques µm (Figure 2.6). Il est souvent utilisé en microélectronique et il présente l'isolant utilisé pour la plaque capacitive, (Bau *et al.*, 2010). Le dépôt d'une couche de dioxyde de silicium peut être réalisé au moyen d'une machine de dépôt par évaporation sous vide.



Figure 2.6 Plaque d'aluminium isolé avec le dioxyde de silicium

¹ http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Dioxyde_de_silicium&oldid=182730934

Le dioxyde de silicium est l'isolant utilisé pour la plaque capacitive avec une couche de 1 micromètre d'épaisseur. Dans le laboratoire LACIME de l'ETS, et avec l'aide de M. Normand Gravel, nous avons réalisé des tests avec le dioxyde de silicium, en l'appliquant sur des plaques conductrices d'aluminium et de cuivre. Trois épaisseurs de couche de dioxyde de silicium ont été déposées sur chaque plaque : 10 nanomètres, 100 nanomètres et 230 nanomètres. Nous étions incapables de déposer la même épaisseur que la plaque capacitive vu que les équipements disponibles à l'ÉTS ne permettent de déposer que des épaisseurs comprises entre 10 et 230 nanomètres. Les épaisseurs déposées étaient trop fines pour assurer l'isolement électrique des plaques, nous avons vérifié, au moyen d'un multimètre, et avant de commencer tout test si le courant électrique passe à travers les plaques après le dépôt, et nous avons remarqué que toutes les plaques avec le dioxyde de silicium laissent passer le courant. Il est donc dangereux de faire les tests. Le passage du courant électrique à travers les plaques pourrait être dû non seulement à la finesse de la couche isolante, mais aussi à la non-uniformité de la surface des plaques. En effet, selon la personne experte qui a réalisé le dépôt, les plaques n'étaient pas parfaitement lisses au niveau microscopique. Concernant le processus de dépôt de l'isolant, les couches de silicium se déposent tout d'abord au niveau des surfaces les plus creuses, d'où le dépôt n'est pas nécessairement homogène, ce qui explique la possibilité de n'avoir pas de dépôt dans les zones où la plaque est plus épaisse à l'échelle microscopique. Pour toutes ces raisons, nous avons abandonné l'idée d'utiliser cet isolant. Cependant, pour des applications futures avec le dioxyde de silicium, il est conseillé de lisser les plaques parfaitement et de déposer une couche de 1 micromètre pour bien isoler, en utilisant les équipements adéquats.

Le film en polyamide ainsi que le dioxyde de silicium ne semblent pas répondre à nos besoins. En effet, en ce qui concerne le film en polyamide, les sensations étaient imperceptibles même en allant jusqu'à 200 V. Quant au dioxyde de silicium, il laisse passer le courant électrique, son utilisation semble donc être dangereuse. Quant à la peinture isolante, elle permet l'obtention de sensations similaires à celles procurées par la plaque capacitive.

Elle permet également grâce à sa simplicité d'adaptation l'isolation de plusieurs types de matériaux conducteurs, en particulier les matériaux flexibles et les textiles.

2.2.4 Les matériaux conducteurs proposés pour la fabrication des surfaces électro-vibrantes

Les dispositifs portables et les vêtements électro-vibrants sont soumis à des exigences de sécurité et de flexibilité indispensables pour pouvoir être utilisés à proximité du corps humain. Notre choix s'est porté sur des matériaux flexibles et des textiles conducteurs pour bénéficier de leurs propriétés intéressantes, et ainsi fabriquer des surfaces électro-vibrantes.

2.2.4.1 Les matériaux conducteurs flexibles

Comme matériaux flexibles, nous avons choisi le papier cuivré, qui se présente sous forme de ruban ou de feuilles souvent recouvertes d'adhésif. Nous avons également choisi la feuille d'aluminium (Figure 2.7).

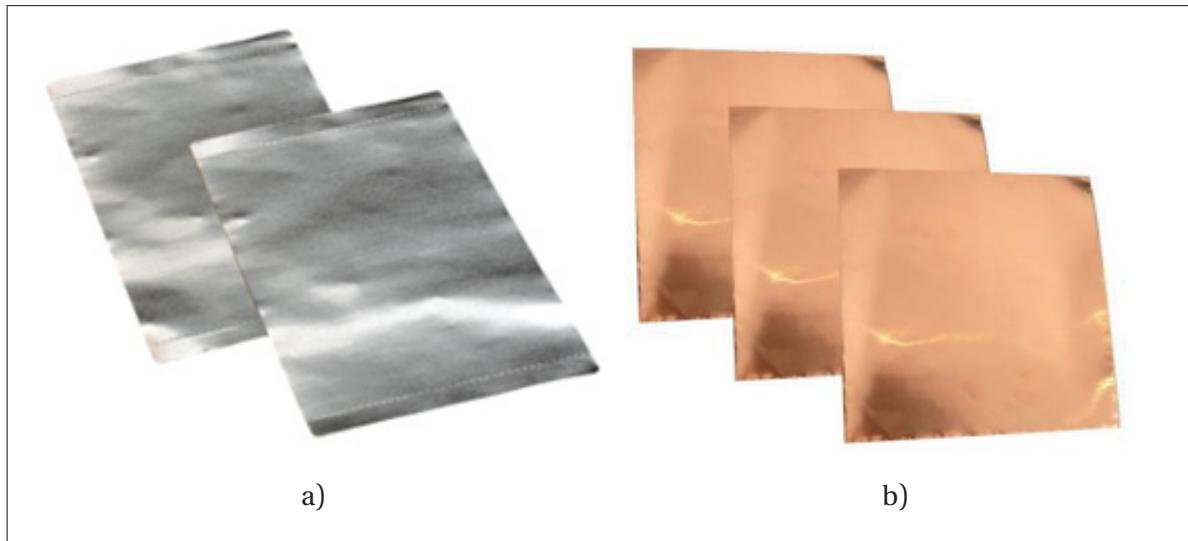


Figure 2.7 Les matériaux conducteurs flexibles : a) feuille en aluminium et b) feuille en cuivre

Afin d'obtenir des surfaces flexibles électro-vibrantes, les deux feuilles conductrices étaient recouvertes par une fine couche de peinture isolante, et soumises à une tension électrique

d'amplitude 100 V et de fréquence 50 Hz (Figure 2.8). Cette tension assure une sensation bien claire et une différence de texture bien distinguable lors de l'utilisation de plaque capacitive, en stimulant le bout du doigt.

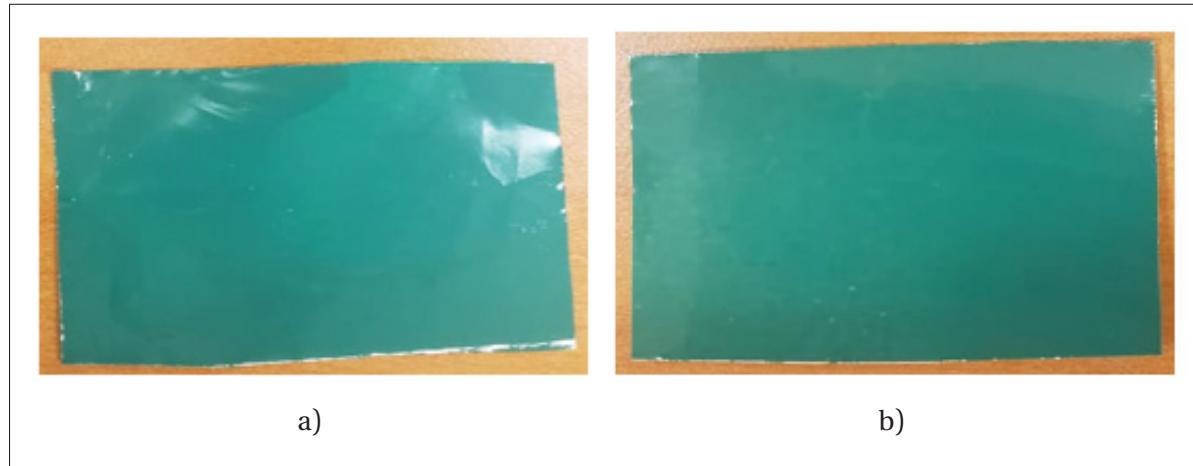


Figure 2.8 Surfaces électro-vibrantes flexibles : a) feuille en aluminium et b) feuille en cuivre recouvertes avec la peinture isolante

2.2.4.2 Les textiles conducteurs

Les textiles conducteurs sont des textiles capables de conduire l'électricité. Ils peuvent être réalisés en introduisant des brins métalliques lors de la construction du textile, ou avec des fils conducteurs grâce à un revêtement métallique. Il existe aussi des textiles semi-conducteurs qui sont formés en mélangeant des textiles normaux avec des poudres métalliques ou à base de carbone, (Castano & Flatau, 2014).

En tant que textiles conducteurs, nous avons choisi :

- **la feuille conductrice (Velostat) :** La feuille conductrice (Velostat) est sensible à la pression. Elle est principalement utilisée pour la conception de capteurs tactiles flexibles (Figure 2.9a), (Dzedzickis, Sutinys, Bucinskas, Samukaite-Bubniene, Jakstys, Ramanavicius & Morkvenaite-Vilkonciene, 2020) .

- **le tissu conducteur tissé :** Le tissu conducteur tissé est un tissu hautement conducteur, composé de cuivre et de polyester nickelé (Figure 2.9b). Il possède une résistance inférieure à 1 ohm par pied dans n'importe quelle direction à travers le textile. Il est utilisé principalement pour les capteurs tactiles capacitifs².
- **le tissu conducteur tricoté :** Le tissu conducteur tricoté est un tissu conducteur en jersey tricoté et composé de 63% de coton, 35% de fil argenté et 2% d'élasthanne (Figure 2.9c). Il possède une résistance qui diffère selon les directions : 46 Ω par pied à travers les rangées, qui est la direction la plus extensible, et 460 Ω par pied à travers les colonnes, qui est la direction la moins extensible. Ce tissu peut être utilisé pour la réalisation des capteurs tactiles capacitifs et d'autres interfaces textiles³.

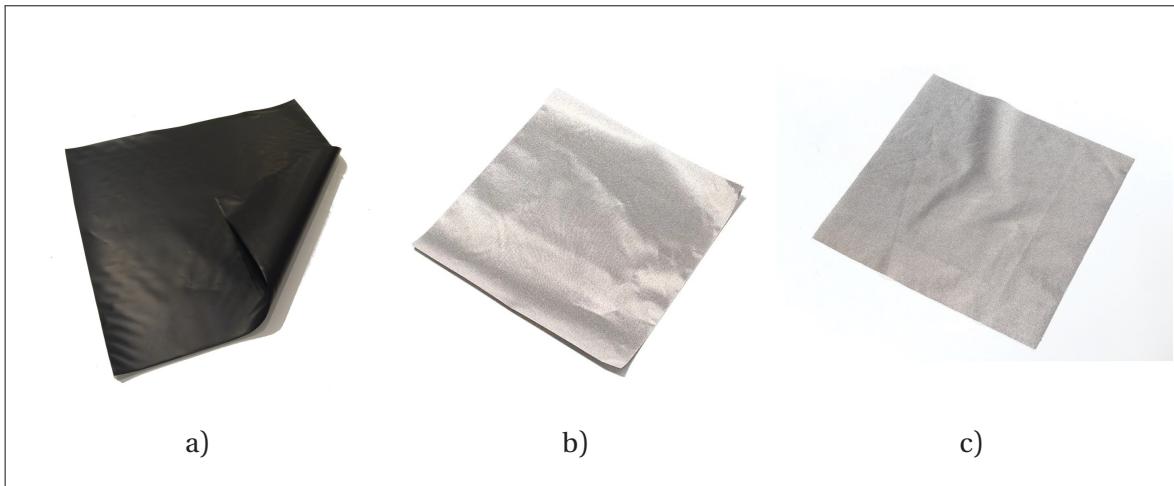


Figure 2.9 Les textiles : a) Feuille conductrice (Velostat), b) Tissu conducteur tissé et c) Tissu conducteur tricoté

Pour réaliser des textiles électro-vibrants, nous avons appliqué une fine couche de peinture isolante sur la feuille conductrice Velostat, le tissu conducteur tissé et le tissu conducteur tricoté, puis nous les avons soumis à une tension électrique d'une amplitude de 100 V et d'une fréquence de 50 Hz (Figure 2.10).

² <https://www.adafruit.com/product/1168>

³ <https://elmwoodelectronics.ca/products/knit-jersey-conductive-fabric-20cm-square>

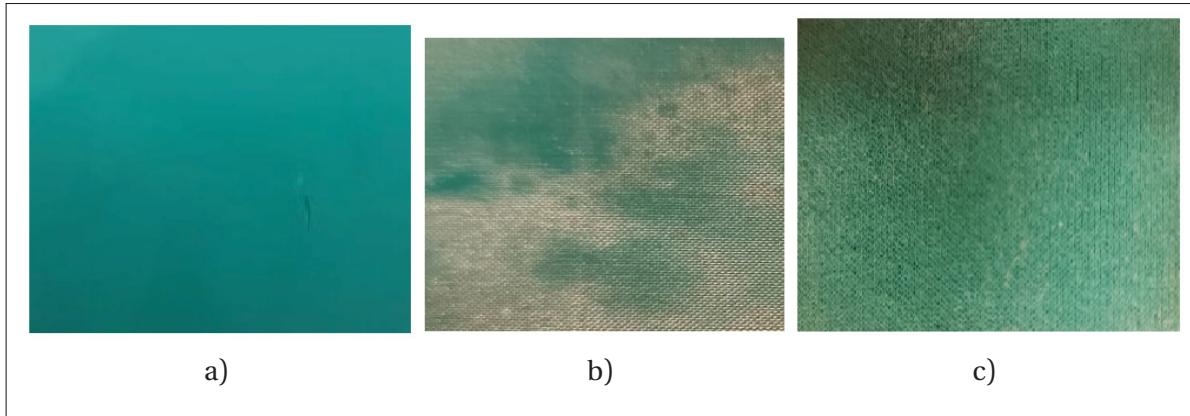


Figure 2.10 Les textiles électro-vibrants : a) Feuille conductrice (Velostat), b) Tissu conducteur tissé et c) Tissu conducteur tricoté recouverts avec la peinture isolante

2.2.5 La perception du stimulus électro-vibratoire sur différentes parties du corps

Les différentes zones du corps humain sont des moyens privilégiés avec lesquels nous manipulons l'environnement réel. En effet, notre sensibilité au toucher et notre capacité à ressentir des sensations sont indispensables à notre existence et jouent un rôle fondamental dans la vie quotidienne. L'exploration des différentes parties du corps pour communiquer un retour haptique, permet d'envisager de nouvelles formes de communication ainsi que la transmission de grandes quantités d'informations en toute simplicité et de manière intuitive. Nous envisageons l'utilisation de dispositifs portables et de vêtements électro-vibrants pour stimuler notamment le bout de l'index, la paume, le poignet, l'avant-bras, les cuisses et le cou. Le choix s'est porté sur ces emplacements étant donné qu'ils sont facilement accessibles pour être exploités par la main lors des interactions délibérées. De même, ils représentent les emplacements où nous souhaitons fournir un retour haptique selon les applications recueillies.

Une deuxième série d'expériences a été menée pour déterminer les propriétés des surfaces électro-vibrantes et comment elles peuvent être perçues sur différentes parties du corps.

2.2.6 Méthodologie

Afin de comprendre la sensibilité au stimulus électro-vibratoire des diverses parties du corps, nous avons réalisé des tests avec des surfaces électro-vibratoires fabriquées au moyen des matériaux conducteurs flexibles et des textiles, découpés aux mêmes dimensions, puis isolés en appliquant une fine couche de peinture isolante. Les tests étaient réalisés par moi et ma partenaire de recherche. Il a été demandé aux deux participantes de frotter les surfaces électro-vibrantes contre les différentes parties de leur corps, à savoir le bout de l'index, la paume, le poignet, l'avant-bras, les cuisses et le cou. L'objectif est de déterminer si le stimulus électro-vibratoire est perçu sur les différentes parties du corps avec les différentes surfaces utilisées.

2.2.6.1 Expérimentation avec matériaux flexibles

Dans le but d'étudier l'effet de différentes parties du corps sur la perception tactile de l'électro-vibration, les deux participantes étaient invitées à frotter les surfaces flexibles électro-vibrantes, soit la feuille d'aluminium et la feuille de cuivre isolées par de la peinture isolante, contre les différentes parties du corps, à savoir le bout de l'index, la paume, le poignet, l'avant-bras, les cuisses et le cou. Puis, elles donnent leur retour sur les sensations ressenties.

Les résultats préliminaires obtenus montrent qu'au niveau de surfaces flexibles électro-vibrantes, aucune différence prononcée ne semble exister entre la feuille d'aluminium et la feuille de cuivre. En effet, la paume et le bout de l'index représentent les parties où la sensibilité était la plus forte pour les deux cas, tandis que la sensibilité du poignet était légèrement moins forte. Quant à l'avant-bras, aux cuisses et au cou, la perception était trop faible, et il s'est produit des chocs électriques sans danger, qui sont probablement dûs à la surface de contact importante ou à la présence de poils. Il convient de mentionner que des travaux supplémentaires seront nécessaires pour mieux comprendre ce phénomène et en identifier la cause exacte.

2.2.6.2 Expérimentation avec textiles

Pour cette expérimentation, les deux participantes étaient invitées à frotter les textiles électro-vibrants contre les différentes parties du corps, à savoir le bout de l'index, la paume, le poignet, l'avant-bras, les cuisses et le cou. Ensuite, elles donnent leur retour par rapport aux sensations ressenties.

Les résultats préliminaires obtenus avec des textiles électro-vibrants montrent que pour la feuille conductrice Velostat (Figure 2.10a), les sensations produites étaient similaires aux sensations générées par les surfaces flexibles électro-vibrantes, pour toutes les parties du corps. Les plus sensibles étaient la paume et le bout de l'index. Le poignet était moins sensible. Au niveau de l'avant-bras, des cuisses et du cou, la sensation était très faible et il y avait souvent des chocs électriques probablement dûs à la surface de contact importante ou à la présence de poils .

Le tissu conducteur tissé et le tissu conducteur tricoté ne procurent aucune sensation. En effet, Il est important de noter que leur surface n'était pas suffisamment lisse pour permettre aux parties du corps de s'y frotter adéquatement.

Les textiles électro-vibrants semblent présenter quelques lacunes, notamment lors de l'application de la peinture isolante. Au niveau du tissu conducteur tissé, nous remarquons que la peinture isolante ne se fixe pas. En effet, elle se décolle et crée ainsi des zones non-isolées sur la surface du tissu, même lorsque plusieurs couches de peinture sont appliquées (Figure 2.10b). Également, la surface du tissu tricoté conducteur ne semblait pas suffisamment lisse pour permettre une application convenable de la peinture. Nous remarquons en outre que le tissu absorbe la peinture et qu'il devient rigide (Figure 2.10c).

Un des grands défis de la feuille conductrice Velostat est que la peinture isolante se détache avec le temps (Figure 2.11), ce qui conduit à des chocs électriques et risque de présenter un danger lors de l'utilisation.



Figure 2.11 Décollage de la peinture pour la feuille conductrice - Velostat

2.2.7 Interprétation des résultats obtenus

Le film en polyamide et le dioxyde de silicium ne semblent pas répondre à nos besoins. En effet, pour le film en polyamide, la sensation était imperceptible même à 200 V, car le film était trop épais. Quant au dioxyde de silicium, il permet le passage du courant électrique. Son utilisation est donc dangereuse. Cependant, la peinture isolante permet d'obtenir des sensations similaires à celles obtenues par la plaque capacitive, et est adaptable à plusieurs types de surfaces conductrices.

Nos résultats préliminaires révèlent que la perception des différentes sensations tactiles dépend fortement de la partie du corps stimulée, tant pour les surfaces flexibles électro-vibrantes, notamment la feuille d'aluminium et la feuille de cuivre, que pour les textiles électro-vibrants, en particulier la feuille conductrice Velostat. En effet, la paume et le bout de l'index représentent les parties où la sensation est la plus forte, et la différence de texture est clairement différenciable. Au niveau du poignet, la perception était moins importante. Concernant l'avant-bras, les cuisses et le cou, la surface de contact était la plus grande et la sensation était très faible et difficilement perceptible. De plus, il y avait beaucoup de chocs électriques désagréables. Ces chocs peuvent être dus à la présence de poils. De plus, ces zones sont moins riches en mécanorécepteurs que la paume ou le bout des doigts.

Bien que la peinture isolante constitue une alternative intéressante, qui autorise un large choix de matériaux flexibles et de textiles conducteurs, elle comporte certains inconvénients.

Tout d'abord, elle ne permet pas d'obtenir une surface parfaitement lisse, car il existe des ondulations qui empêchent les différentes parties du corps de se déplacer aisément. Ensuite, le contrôle de l'homogénéité de la surface peinturée est très difficile, ce qui entraîne la présence de zones non couvertes, source de chocs électriques. Enfin, la peinture isolante semble être une option inappropriée pour certains textiles conducteurs, qui absorbent la peinture et se durcissent, et d'autres qui repoussent la peinture de manière à ce qu'elle ne se fixe pas sur la surface.

Les plaques capacitatives garantissent la perception de stimuli électro-vibratoires. Quoique le recours à des plaques capacitatives coupées de tailles différentes restreigne la flexibilité au niveau de la conception de dispositifs électro-vibratoires portables, nous estimons que cette alternative est davantage fiable et ouvre la voie à des applications prometteuses.

2.3 Fabrication de surfaces électro-vibrantes au moyen des plaques 3M coupées et les dispositifs portables possibles

Disposer d'écrans tactiles de tailles et de formes variées est réalisable grâce au découpage. Le plus important est de bien assurer la génération de sensations tactiles. Dans cette section, nous présentons un espace conceptuel, le processus de découpage de plaques capacitatives, ensuite la conception d'un bracelet électro-vibrant stimulant le poignet, au moyen des plaques ainsi découpées.

2.3.1 Espace conceptuel

Les plaques capacitatives découpées représentent une alternative avantageuse en termes de facilité de fabrication et de perception du stimulus électro-vibratoire. Leur emploi peut être proposé dans le cadre de dispositifs portables, tels que les bijoux. Par exemple, un bracelet avec une plaque capacitive découpée pourrait être conçu pour stimuler le poignet. La conception d'une chaîne de plaques découpées et attachées entre elles, dont chacune procure une sensation particulière au poignet, pourrait être une autre possibilité (Figure 2.12).

Cette alternative possède toutefois des restrictions. En effet, les plaques capacitatives découpées sont rigides et leur emploi dans des dispositifs portables et des vêtements peut se révéler inconfortable, et ne permet pas des interactions fluides avec le corps.

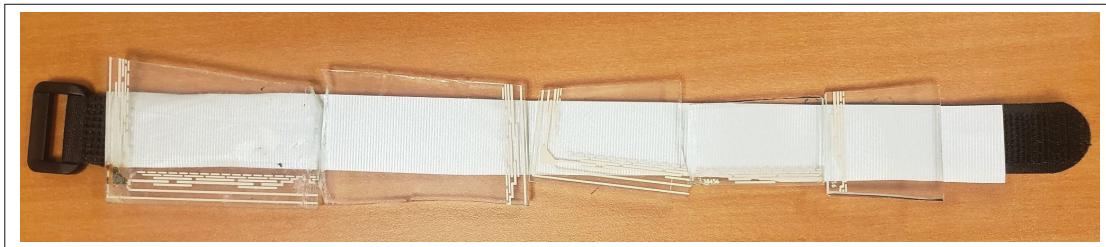


Figure 2.12 Une chaîne de plaques capacitatives découpées

2.3.2 Découpage des plaques capacitatives

La compréhension de la composition et du fonctionnement d'un écran tactile capacitif est indispensable pour réussir à le découper convenablement. Un écran tactile capacitif 3M est constitué d'une fine couche d'électrodes située au-dessous d'une surface en verre dotée d'un revêtement protecteur (Figure 2.13). Cette technologie est intrinsèquement fiable grâce à sa structure mono-couche entièrement en verre. Le contact d'un doigt avec la surface supérieure du verre, qui est couplée avec la couche conductrice, située sous le revêtement de protection, permet d'activer le toucher⁴.

Nous avons effectué divers essais pour couper les plaques capacitatives et déterminer la manière de générer le stimulus électro-vibratoire au moyen de ces plaques coupées. Nous avons commencé par gratter les extrémités de la plaque à l'aide de papier de verre, car ces extrémités contiennent la fine couche d'électrodes. Seules les extrémités de la plaque servent d'endroit où nous pouvons attacher le fil de connexion nécessaire à l'obtention de différentes sensations. La fixation du fil de connexion à une autre région de la plaque

⁴ <https://multimedia.3m.com/mws/media/609508O/appbrief-exercise-equip.pdf>

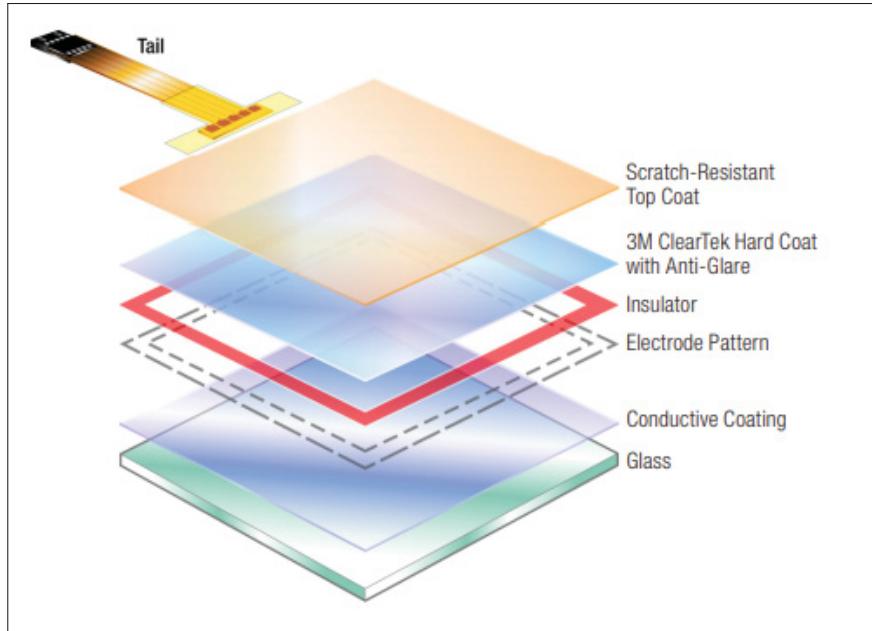


Figure 2.13 Composition d'un écran tactile capacitif⁵

empêche toute sensation. Ensuite, pour déterminer comment attacher le fil de connexion à la plaque, nous avons envisagé deux alternatives :

- **adhésif époxy conducteur en argent** : Il s'agit d'un adhésif argenté électriquement conducteur doté de bonnes propriétés mécaniques. Il peut servir d'alternative à la soudure pour le collage de composants électroniques sensibles à la chaleur ou pour la réalisation de connexions conductrices lorsque la soudure n'est pas envisageable, notamment lors du collage sur du verre, des métaux tendres ou des plastiques. L'époxy ne durcit pas à température ambiante : il est nécessaire de le faire durcir dans un four à une température et une durée bien déterminées.
- **film en cuivre avec adhésif conducteur** : Il s'agit d'une bande à double conductivité permettant la circulation du courant à travers les deux côtés de l'adhésif. Il pourra être facilement collé sur le verre et faire une surface à souder.

⁵ <https://multimedia.3m.com/mws/media/609508O/appbrief-exercise-equip.pdf>

Une fois le fil de connexion attaché à la plaque capacitive, au moyen de l'une des alternatives mentionnées, il convient de l'isoler électriquement pour le protéger. Nous avons pour cela utilisé le film en polyamide, simplement pour couvrir la partie en verre contenant la connexion. Nous avons également vérifié que toutes les autres parties de la plaque sont bien sécurisées et qu'il n'y a pas de danger de choc électrique, ni de blessure.

Il est possible de disposer d'écrans tactiles de différentes tailles et formes grâce à la découpe. Le plus important est de veiller à ce que le fil de connexion soit bien attaché à l'extrémité où se trouvent les électrodes grattées, rechercher la meilleure option pour l'attacher, et le protéger à l'aide d'un isolant électrique.

Notre première idée de dispositif portable électro-vibrant était un bracelet stimulant le poignet, réalisé avec des plaques capacitives coupées. L'idée consiste à déterminer l'effet des interactions délibérées et accidentnelles, au niveau du poignet, sur la perception de différentes textures.

2.3.3 Conception d'un bracelet électro-vibrant

Afin de développer un bracelet électro-vibrant, nous avons commencé par concevoir un cadre pour le bracelet en utilisant le logiciel Z-Suite pour l'impression 3D. Ensuite, nous avons attaché deux rubans adhésifs permettant d'élargir et de rétrécir le bracelet selon la taille du poignet de chacun. Également, une plaque capacitive a été découpé à des dimensions adéquates pour pouvoir être insérée dans le cadre (Figure 2.14). Nous avons connecté la plaque découpée à notre dispositif de génération d'électro-vibrations à l'aide d'un fil fixé avec de l'époxy argenté conducteur. Cette alternative est plus avantageuse, dans la mesure où elle ne permet pas le détachement du fil. Nous avons ensuite isolé le fil avec un film polyamide. Le bracelet a été alimenté par un signal sinusoïdal d'une amplitude de 100 V et d'une fréquence de 50 Hz.



Figure 2.14 Bracelet électro-vibrant pour stimuler le poignet

Nous avons effectué deux tests avec le bracelet électro-vibrant. Le premier consiste à interagir délibérément avec le bracelet, tandis que le second consiste à bouger naturellement. Nous avons constaté que les sensations produites tant par les déplacements naturels du poignet contre le bracelet que par les interactions délibérées étaient subtiles et difficilement distinguables d'autres sensations tactiles comme, par exemple, le frottement du cadre du bracelet ou du ruban adhésif sur la peau. En outre, des chocs électriques se produisaient occasionnellement. L'hypothèse concernant l'apparition de ces chocs électriques est la suivante : la peau des deux parties de la main, à savoir le poignet et le doigt, possède des propriétés différentes. En effet, la surface de contact du poignet est plus grande et, de plus, elle est plus souvent pileuse que la peau du bout du doigt.

L'électro-vibration dans des vêtements et des dispositifs portables sollicitant diverses parties du corps offre des interactions plus enrichissantes et gratifiantes. Toutefois, la conception de ces dispositifs soulève plusieurs défis. Il est important de noter que la peinture isolante ne garantit pas une surface d'électro-vibration parfaitement lisse et homogène, conduisant à des difficultés de déplacement des parties du corps sur la surface, et donc à des problèmes de perception du stimulus électro-vibratoire. D'autre part, les plaques décou-

pées capacitatives semblent présenter une solution plus fiable que la peinture isolante pour la conception de dispositifs d'électro-vibration portables. Néanmoins, pour le bracelet destiné à la stimulation du poignet, il était difficile de distinguer les sensations du stimulus électro-vibratoire d'autres sensations comme le frottement du cadre ou du ruban contre la peau.

La perception du stimulus électro-vibratoire sur différentes parties du corps révèle que la paume procure une sensation très forte et une différenciation de textures distinctes. Par conséquent, nous avons envisagé la conception d'un objet de tous les jours destiné à stimuler cette partie de la main, à savoir un clavier électro-vibrant.

CHAPITRE 3

EXPLORATION DES OBJETS INTELLIGENTS ÉLECTRO-VIBRANTS

Les vêtements et les dispositifs portables électro-vibrants sont sources de défis tant au niveau de la conception, que la perception du stimulus électro-vibratoire, qui interfère avec d'autres sensations tactiles. Notre objectif s'est donc re-orienté vers la conception d'un objet électro-vibrant de la vie quotidienne, plus précisément un clavier sollicitant la paume, qui procure, selon nos résultats préliminaires, une sensation très forte. Ce clavier électro-vibrant sert à générer des sensations tactiles riches sur la paume, simultanément à la saisie avec les doigts.

Dans ce chapitre, nous envisageons la conception d'un clavier électro-vibrant stimulant la paume. Nous proposons également une étude comparative sur la perception du stimulus électro-vibratoire au bout du doigt et sur la paume. Dans la Section 3.1, nous présentons la conception d'un clavier électro-vibrant et ses applications possibles. Par la suite, dans la Section 3.2, nous illustrons le développement d'un système de génération de signaux électro-vibratoires. Dans la Section 3.3, nous décrivons le déroulement de l'expérience psychophysique. Nous présentons une analyse des données dans la Section 3.4. Finalement, une discussion dans la Section 3.5.

3.1 La conception d'un clavier électro-vibrant et ses applications possibles

3.1.1 Conception d'un clavier électro-vibrant

Afin d'explorer la sensibilité de la paume, nous avons pensé à concevoir un clavier électro-vibrant. Le principe consiste à se servir d'un clavier ordinaire pour taper avec les doigts, et d'y ajouter une surface tactile qui permet de percevoir des sensations variées sur la paume, simultanément à l'écriture. Le clavier électro-vibrant se compose d'un clavier (Logitech K380), disposé sur une fine plaque en bois servant de support. Également, deux plaques

capacitives qui stimulent la paume sont attachés à la plaque au moyen de deux cadres conçus par impression 3D (Figure 3.1).

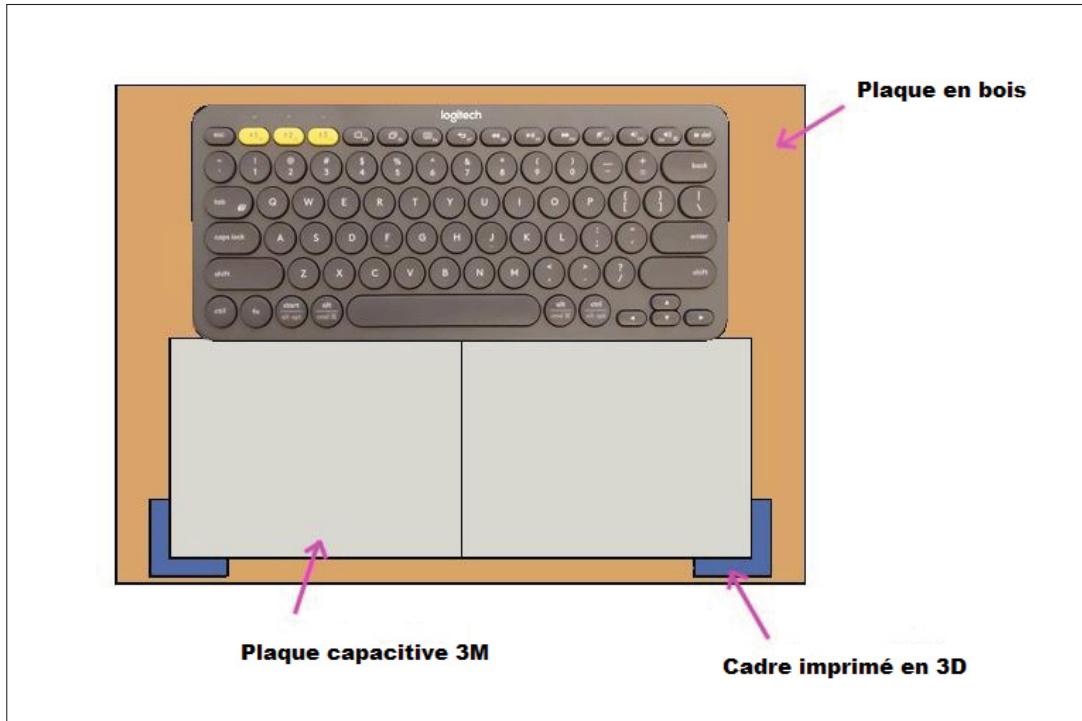


Figure 3.1 Clavier électro-vibrant pour stimuler la paume

Nous avons réalisé des essais préliminaires au moyen d'un prototype composé d'un clavier et de deux plaques capacitatives (Figure 3.2), dans le but de comprendre la possibilité d'explorer une surface électro-vibrante avec la paume pendant l'écriture. Nous avons constaté que la paume permet la perception des sensations tactiles générées. De plus, le clavier électro-vibrant présente une forme ergonomique qui correspond aux interactions et aux conditions de travail de l'utilisateur.

3.1.2 Posture de la main en écrivant et les applications possibles d'un clavier électro-vibrant

Dans le but de déterminer la posture de la main en écrivant, et de définir une application pour le clavier électro-vibrant, nous avons réalisé un Brainstorming sur la plate-forme



Figure 3.2 Prototype composé d'un clavier et deux plaques capacitive

Zoom avec les membres de notre groupe de recherche. Ce Brainstorming permet d'abord de bien comprendre la façon dont les personnes se servent du clavier. Ensuite, il permet de répertorier un large choix d'applications possibles du clavier électro-vibrant et les classer selon des critères spécifiques. Dans l'annexe I, nous avons classifié les applications selon le besoin de capturer la position de la main, le toucher occasionnel ou habituel de l'écran tactile et la possibilité de percevoir des sensations sur la paume tout en écrivant.

3.1.2.1 Posture de la main en écrivant sur un clavier

La première question posée aux participants du brainstorming portait sur la manière dont ils utilisent leurs claviers : posent-ils leur paume sur la table ? Ou bien la tiennent-ils à la verticale ? La plupart des participants ont indiqué qu'ils posaient leurs paumes sur la table en écrivant, vu que c'est la posture la plus pratique et la plus confortable (Figure 3.3).

Cependant, nous avons constaté, suite à des recherches, que la flexion et l'extension de la main sont fortement déconseillées pendant l'écriture et qu'il est préférable de maintenir la

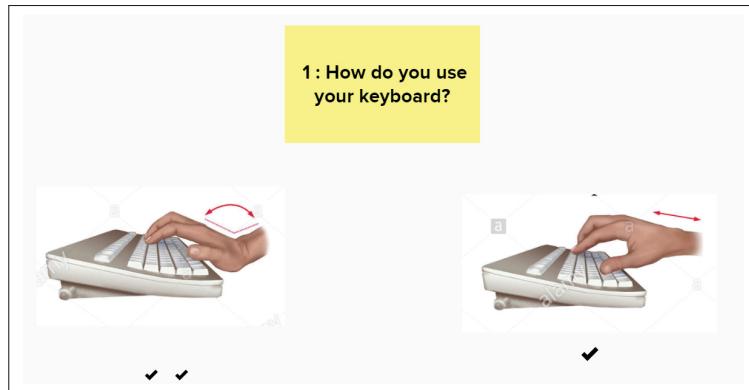


Figure 3.3 La posture de la main en écrivant sur un clavier

main en position droite. En effet, la flexion répétée du poignet vers le haut ou vers le bas comprime les structures du canal carpien du poignet, ce qui provoque des douleurs et des blessures.

3.1.2.2 Les applications possibles d'un clavier électro-vibrant

La deuxième question que nous avons posée aux participants au brainstorming était la suivante : Dans quels circonstances est-il possible de ressentir des textures différentes sur la paume de la main tout en tapant avec les doigts sur un clavier ?

- **les notifications :** La source de la notification ainsi que son importance varient. Or, la détermination de la provenance et de l'importance de ces notifications reste impossible tant que nous ne les affichons pas, et cette opération peut s'avérer parfois inutile, dérangeante et gaspilleuse de temps. L'une des idées d'application d'un clavier électro-vibrant peut consister à déterminer la source des notifications reçues ainsi que leur importance sans interruption de notre travail. En effet, tout en écrivant sur un clavier, nous pouvons déplacer la paume de la main sur les écrans tactiles et bénéficier d'un retour tactile. Les notifications de haute importance provoquent une sensation extrêmement perceptible. Celles négligeables produisent une sensation discrète.

- **communication** : La communication sur les réseaux sociaux est très courante, il arrive parfois de vouloir connaître si l'autre personne écrit ou envoyer des émoticônes rapidement lorsque nous sommes occupés. Dans cette optique, une des applications d'un clavier électro-vibrant peut être d'envoyer des émoticônes et de vérifier la consultation de notre message ou encore de connaître si l'autre personne est en train d'écrire, ceci simplement en déplaçant la paume de la main sur l'écran tactile simultanément à l'écriture sur le clavier. Cette gestuelle génère d'ailleurs des textures différentes selon la rétroaction désirée.
- **état du système** : Disposer d'informations sur l'état du système, notamment sur la batterie, la caméra et le microphone, est essentiel. Dans ce cas, un clavier électro-vibrant peut être utilisé pour transmettre un retour tactile, par exemple, une personne peut vérifier en déplaçant la paume sur un écran tactile, qui permet la perception des textures différenciables, si la caméra ou le microphone sont ouverts ou encore si la batterie est déchargée, cela en même temps qu'elle tape sur son clavier.
- **les jeux** : Le retour haptique dans les jeux vidéo est très puissant et apporte plus de réalisme. Dans ce cadre, il a été envisagé d'utiliser le clavier électro-vibrant afin de générer des textures différenciables sur la paume, qui permettent de localiser des ennemis, ou de savoir si une limite est franchie. Cela pourrait se faire en même temps que la personne tape sur son clavier.
- **cliquer et puis ajuster un paramètre avec les gestes** : Parmi les applications particulièrement intéressantes d'un clavier électro-vibrant, notons le réglage d'un paramètre avec la paume, tout en appuyant sur un bouton avec le doigt. Par exemple, une personne peut appuyer sur une image, puis grâce au mouvement de la paume sur un écran tactile, elle peut effectuer un zoom avant ou un zoom arrière, accompagné chacun d'une sensation différente. De même, elle peut modifier les dimensions ou faire une rotation de l'image.
- **autocorrection et formalité des mots** : L'autocorrection avec la paume de la main lorsque nous écrivons sur un clavier peut être très bénéfique. De même, indiquer qu'un mot est formel ou informel. À cet égard, un écran électro-vibrant peut être intéressant.

En effet, tout en écrivant, nous pouvons déplacer la paume sur un écran tactile et, suivant la sensation générée, effectuer une autocorrection ou interpréter la formalité d'un mot.

- **modification d'un document par une autre personne :** Il est extrêmement pratique de pouvoir vérifier si une autre personne est en train d'éditer notre document. En utilisant un clavier électro-vibrant, nous avons la possibilité de déterminer si une autre personne apporte des modifications au document pendant que nous sommes en train d'écrire. Ceci est réalisé en générant différentes sensations en frottant la paume de la main sur un écran tactile.
- **action déclenchée :** Un clavier à électro-vibrant sert notamment à avertir en cas de déclenchement d'une action, grâce au balayage de la paume sur un écran tactile autorisant la perception de différentes sensations.

Un clavier électro-vibrant procurant de riches sensations tactiles sur la paume durant l'écriture présente une idée innovante et très attrayante. De plus, le brainstorming réalisé éveille des idées d'applications prometteuses. Nos travaux futurs visent l'amélioration du clavier électro-vibrant conçu, ainsi que la concrétisation d'une des applications et son évaluation auprès de participants.

3.2 Développement d'un système générateur du signal électro-vibratoire

Le dispositif de base pour générer des signaux d'électro-vibration employé dans le Chapitre 2 ne permet pas de signaux programmables. Nous proposons de remplacer ce dispositif par un nano-ordinateur Raspberry PI, qui autorise la génération de signaux programmables. Nous présentons dans cette section le développement électronique réalisé, les risques associés ainsi que les améliorations du système de sécurité.

3.2.1 Développement électronique réalisé

Dans le but de générer le signal d'électro-vibration, nous avons utilisé les composants suivants :

Raspberry Pi avec une carte AD / DA haute précision : Le raspberry Pi est un nano-ordinateur que nous avons choisi pour sa petite taille et son prix raisonnable. Quant à la carte haute précision, elle permet d'ajouter des fonctions de conversion numérique/analogique et analogique/numérique de haute précision au Raspberry Pi. Cette carte possède une puce de conversion numérique-analogique à 2 canaux (DAC8552) et une puce de convertisseur analogique-numérique à 8 canaux (ADS1256) ⁶. Il faut simplement insérer cette carte d'extension au-dessus du Raspberry PI afin de générer des signaux programmables, dont nous pouvons contrôler l'amplitude, la fréquence et la forme d'onde.

Le DAC8552 nous permet de générer des signaux analogiques. Il a été conçu pour un fonctionnement à alimentation unipolaire. Nous avons ajouté un amplificateur OPA703 (Figure 3.4) afin de permettre une plage de sortie bipolaire⁷.

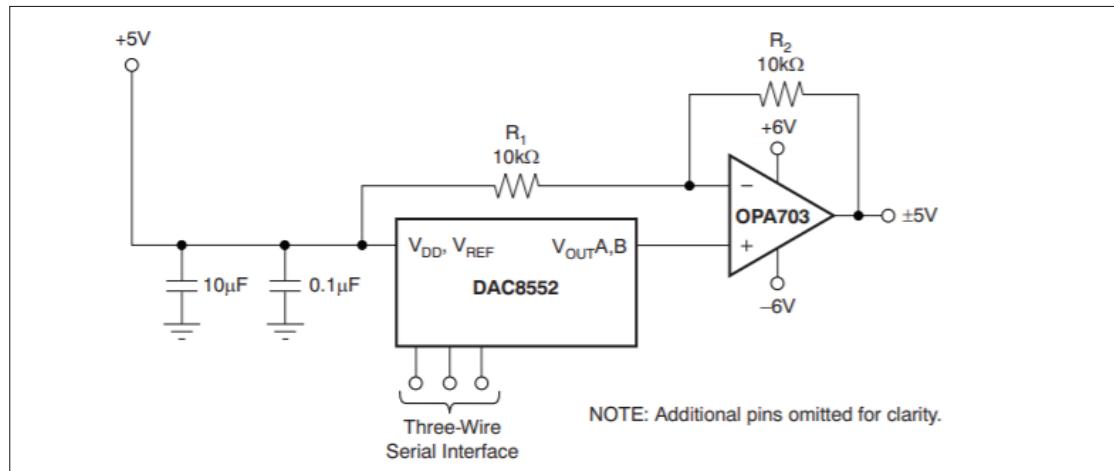


Figure 3.4 Ajout d'un amplificateur OPA703 pour une sortie bipolaire⁷

Une résistance : La résistance est utilisée pour limiter le courant à une valeur inférieure ou égale à 5 mA, qui est fixé en avance afin d'assurer la sécurité du dispositif. Étant donné

⁶ <https://www.waveshare.com/w/upload/b/b7/High-Precision-AD-DA-User-Manual.pdf>

⁷ <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac8552.pdf>

que nous travaillons avec une tension de 100 V, nous utilisons donc une résistance d'un minimum de $20 \text{ K } \Omega$.

Un bracelet de mise à la terre antistatique : Ce bracelet sera relié au poignet du participant et il est connecté à la masse (Figure 3.5). Même si notre corps peut servir naturellement de masse, il est nécessaire pour des premiers tests de fermer le circuit afin d'assurer une meilleure sécurité⁸. Également, ce bracelet permet des sensations plus fortes (Bau *et al.*, 2010).



Figure 3.5 Un bracelet de mise à la terre antistatique⁸

Un capteur de force : Il s'agit d'un couplage d'une cellule de pesée (Load Cell) et d'un convertisseur analogique-numérique (ADC) 24 bits de précision (HX711) (Figure 3.6). La cellule de pesée présente un instrument qui permet de déterminer la taille d'une charge, et avec la combinaison du HX711, qui permet la connexion avec un microprocesseur, elle est capable d'obtenir des données mesurables⁹.

⁸ <https://bob-morris.fandom.com/fr/wiki/Bracelet-antistatique>

⁹ <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/11/26/10-things-you-can-do-with-your-hx711-and-load-cell/>

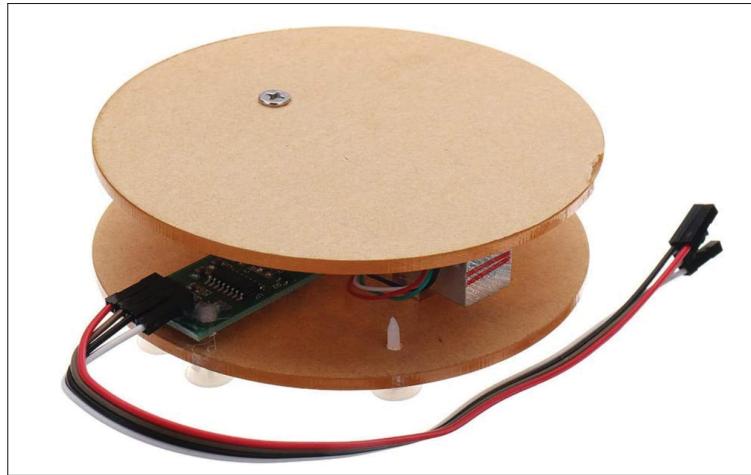


Figure 3.6 Un capteur de force (couplage d'une cellule de pesée et un convertisseur analogique-numérique ADC)

Écran tactile SCT3250 (plaqué capacitive 3M) : Il s'agit d'un écran tactile capacitif, qui est un écran de contrôle utilisant le toucher conducteur d'un doigt humain pour l'entrée (Figure 3.7)¹⁰.

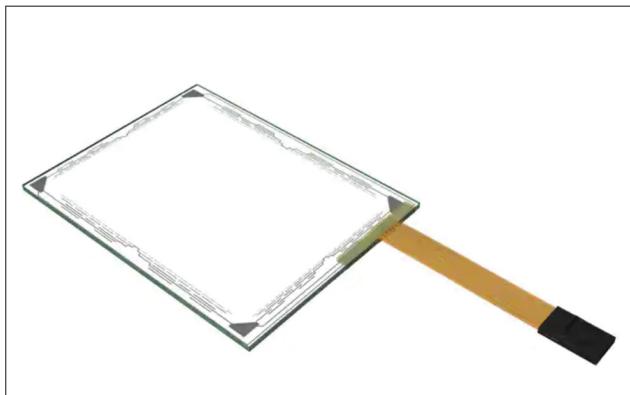


Figure 3.7 Écran tactile SCT3250¹⁰

Un oscilloscope : Permet l'affichage de la sortie. Il est utile pour les tests afin de vérifier ce qu'on envoie en sortie.

¹⁰ <https://multimedia.3m.com/mws/media/609508O/appbrief-exercise-equip.pdf>

Un amplificateur : Il s'agit d'un amplificateur de puissance modèle Trek 2205. Il permet une tension de sortie allant de 0 à ± 2 kV.

3.2.2 Les risques associés à notre dispositif et amélioration du système de sécurité

L'électro-vibration implique que le participant touche une surface sous haute tension (100 V) recouverte d'un isolant électrique. Il est donc très important de minimiser le risque de choc électrique, et de minimiser les conséquences d'un tel choc électrique pour le participant s'il devait avoir lieu. D'abord, toutes les précautions nécessaires ont été prises pour que le risque de choc électrique soit extrêmement faible. Nous utilisons une plaque capacitive, et toutes les connexions électriques entre l'amplificateur haut-voltage et cette plaque sont de plus recouvertes d'isolant électrique. Il y a donc très peu de risque que le participant entre en contact avec le courant électrique alimentant l'écran tactile.

Plusieurs mesures ont tout de même été prises pour minimiser les impacts d'un choc électrique si celui-ci devait survenir, par exemple dû à un bris de la surface isolante de l'écran tactile.

- **limite de courant :** Une résistance de $25\text{ k}\Omega$ est présente dans le circuit sortant de l'amplificateur haut-voltage afin de limiter le courant à un maximum de 5 mA au voltage maximal de 100 V. Cette limite de courant assure qu'un bref choc électrique sera sans danger pour le participant. Ce courant est beaucoup plus faible que le courant créé par une unité TENS, qui soulage la douleur avec une plage de courants pouvant aller jusqu'à 200 mA¹¹. D'autre part, le courant qui circule en posant la langue sur une batterie de 9 V est d'environ 1.3 mA, ce qui produit une sensation de picotement légère et sans danger¹². Finalement, les disjoncteurs différentiels (« residual current devices ») réduisent les risques de chocs électriques graves en interrompant l'alimentation lorsqu'une fuite de courant dépasse de 5 à 30 mA¹³.

¹¹ <https://www.TMJtherapyandsleepcenter.com/blog/current-tens-compares-house-current>

¹² <https://www.sparkfun.com/news/1385>

¹³ <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Disjoncteur&oldid=181293399>

- **absence de contraintes physiques :** Le participant est libre de retirer sa main ou son doigt de l'écran tactile à tout moment. Si un choc électrique devait survenir, le participant aurait donc immédiatement la réaction de soulever sa main de la surface et d'interrompre le contact. Tout choc électrique serait donc de très courte durée.
- **interrupteur à pédale :** Le participant devra aussi appuyer sur une pédale afin d'activer l'alimentation de l'écran. Cette pédale est connectée à l'entrée « ENABLE » de l'amplificateur et en active donc la sortie seulement lorsque la pédale est enfoncée. En plus de pouvoir retirer sa main, le participant peut donc aussi soulever son pied de la pédale afin d'interrompre l'alimentation en cas de choc électrique.
- **interrupteur d'arrêt d'urgence :**
Un deuxième interrupteur d'urgence, sous la forme d'un gros bouton poussoir, permet aussi à l'expérimentateur de désactiver l'amplificateur à tout moment.

3.3 Déroulement de l'expérience psychophysique

3.3.1 Mise en contexte et objectif de l'expérience

L'effet de l'amplitude (Wijekoon *et al.*, 2012), de la fréquence et de la forme d'onde du signal (Vardar *et al.*, 2017a), sur la perception tactile de l'électro-vibration a déjà été étudié. Cependant, il n'y a pas d'étude antérieure sur la façon dont notre perception de l'électro-vibration varie avec les différentes parties de la main.

Notre objectif est d'étudier comment notre perception du stimulus d'électro-vibration change en fonction de différentes parties de la main. Plus précisément, le but est de comparer les seuils absolus de perception de l'électro-vibration au bout du doigt avec les seuils absolus de la paume de la main pour plusieurs fréquences.

3.3.2 Participants

Nous avons effectué des expériences avec 14 participants (sept femmes, sept hommes) ayant un âge moyen de 27,5 ans. Tous étaient étudiants de l'ÉTS. Ils se désinfectent les mains avant de commencer les expériences. De plus, l'écran tactile et tous les composants du dispositif ont été nettoyés à l'alcool avant l'arrivée du participant. Les participants ont rempli et signé le formulaire de consentement et un pré-questionnaire avant les expériences. Le formulaire et le pré-questionnaire ont été approuvés par le comité d'éthique de la recherche (CÉR) de l'ÉTS.

3.3.3 Méthodologie

Nous avons réalisé des expériences utilisateurs dans une salle dédiée pour les expérimentations, afin d'étudier l'effet de l'emplacement de la main sur la perception tactile de l'électro-vibration. Cette étude, dont la méthodologie est similaire à l'étude de Vardar *et al.* (2017a), consiste à déterminer les seuils de détection absolue d'un signal sinusoïdal pour 5 fréquences (15, 30, 60, 120 et 240 Hz), en stimulant deux emplacements (le bout du doigt et la paume de la main). Ces fréquences étaient générées aléatoirement. Comme nous avons décrit précédemment, nous avons utilisé un montage expérimental comportant un écran tactile SCT3250 excité avec un signal de tension généré par un Raspberry Pi et une carte AD / DA haute précision et augmenté par un amplificateur Trek modèle 2205 (Figure 3.8).

Afin de garantir la sécurité des participants et de notre dispositif, nous avons ajouté une résistance limitant le courant à 5 mA, un interrupteur à pédale pour que le participant puisse soulever son pied et interrompre l'alimentation en cas de choc électrique et un interrupteur d'arrêt d'urgence permettant de désactiver l'amplificateur à tout moment. Les participants étaient en contact qu'avec l'écran tactile et tous les composants de notre dispositif étaient bien isolés. Également, ils ont porté un casque affichant un bruit blanc et

un bracelet antistatique, et nous avons ajouté un accoudoir pour soutenir leur bras pendant les expériences pour une posture confortable.

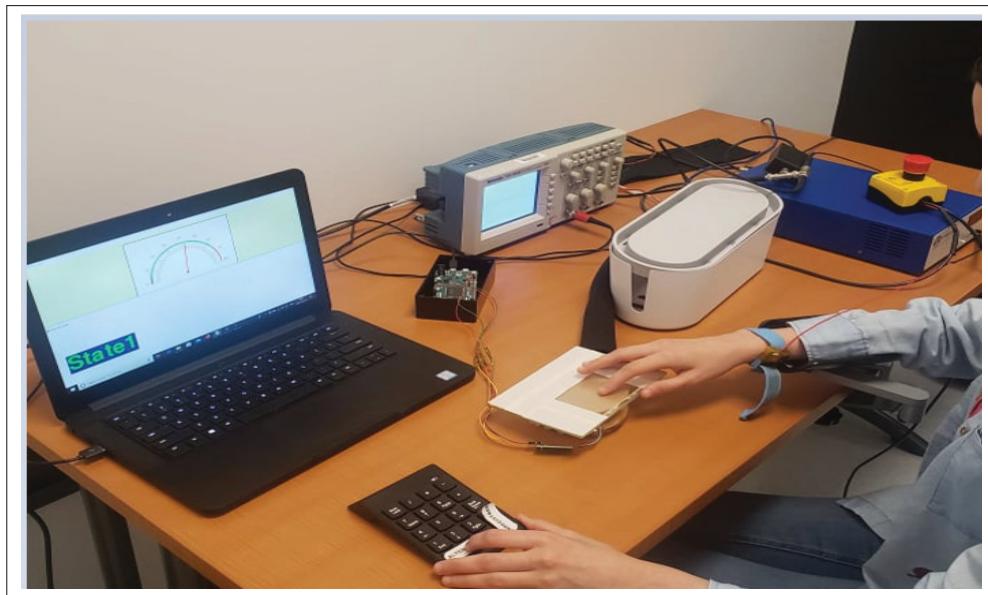


Figure 3.8 Le montage expérimental

3.3.4 Description des expériences

Nous avons invité le participant à déplacer le bout de son doigt sur l'écran tactile déposé sur la table, et avec un bouton spécifique d'un clavier « ALTERNER », il alterne entre deux états, un état contenant le stimulus d'électro-vibration, et un état ne contenant aucun stimulus. Le passage d'un état à un autre était accompagné d'un retour visuel. Un retour visuel sera également affiché afin de maintenir la force normale appliquée sur l'écran tactile entre 0.1 N et 0.6 N (Figure 3.9) qui présente une plage de force pertinente pour l'exploration tactile, selon Adams *et al.* (2013).

Lorsque le participant perçoit une texture différente, il clique sur un autre bouton spécifique du clavier « ENREGISTRER » pour enregistrer sa réponse et passer à l'essai suivant (Figure 3.10).

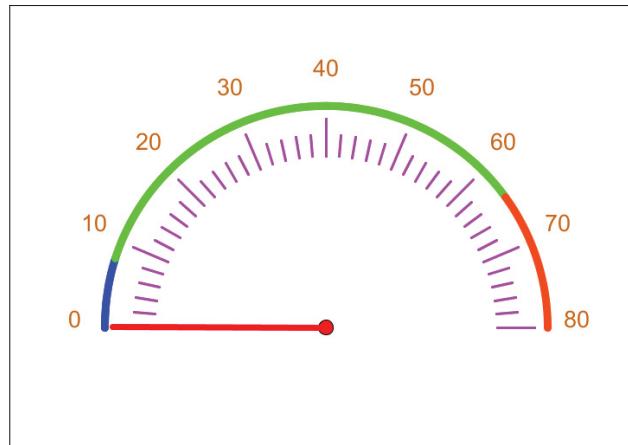


Figure 3.9 Retour visuel affiché afin de maintenir la force appliquée entre 0,1 et 0,6 N



Figure 3.10 Clavier avec deux boutons spécifiques :
ALTERNER et
ENREGISTRER

Nous commençons les tests avec une amplitude de 100 V, qui permet une sensation perceptible par tous les participants. L'amplitude de la tension du nouveau stimulus était

ajustée de façon adaptative en fonction des réponses antérieures de chaque participant. Si le participant donne deux réponses correctes l'amplitude du signal diminue de 10 V. Si le participant donne une réponse incorrecte, l'amplitude du signal augmente de 10 V. Cette méthode d'escalier adaptatif (un vers le haut/deux vers le bas) fournit une estimation précise des seuils de détection et de discrimination avec un nombre relativement faible d'essais (Bau *et al.*, 2010; Vardar *et al.*, 2017a). Nous avons assuré que pour tous les essais, l'amplitude de notre stimulus ne dépasse jamais les 100 V avec une limite de courant de 5 mA qui est sans danger sur le participant. Quant à la fréquence du signal, elle était générée aléatoirement.

L'inversion consiste à passer d'une réponse correcte à une réponse incorrecte et réciproquement. Après trois inversions, la taille des pas a été diminuée de 2 V pour obtenir une valeur de seuil bien précise. Nous avons arrêté l'expérience après 12 inversions et nous avons estimé le seuil de détection absolu comme étant la moyenne des 12 dernières inversions (Bau *et al.*, 2010). L'amplitude du stimulus d'électro-vibration, la fréquence et la réponse du participant présentent des données pertinentes que nous avons collectées tout au long des essais afin d'analyser les résultats obtenus.

Conformément à la même démarche, le participant était invité à déplacer la paume de sa main sur l'écran tactile afin de déterminer le seuil de détection absolu de cet emplacement, et de le comparer au seuil du bout du doigt. Il convient de mentionner que l'ordre de déplacement de la paume ou du bout du doigt sur l'écran tactile était aléatoire.

La Figure 3.11 présente un exemple de données récoltées par la méthode d'escalier adaptatif "un haut, deux bas".

3.4 Analyse des données

Nous présentons dans cette section les analyses de résultats portant sur la zone de la main stimulée, et ensuite les analyses basées sur le genre.

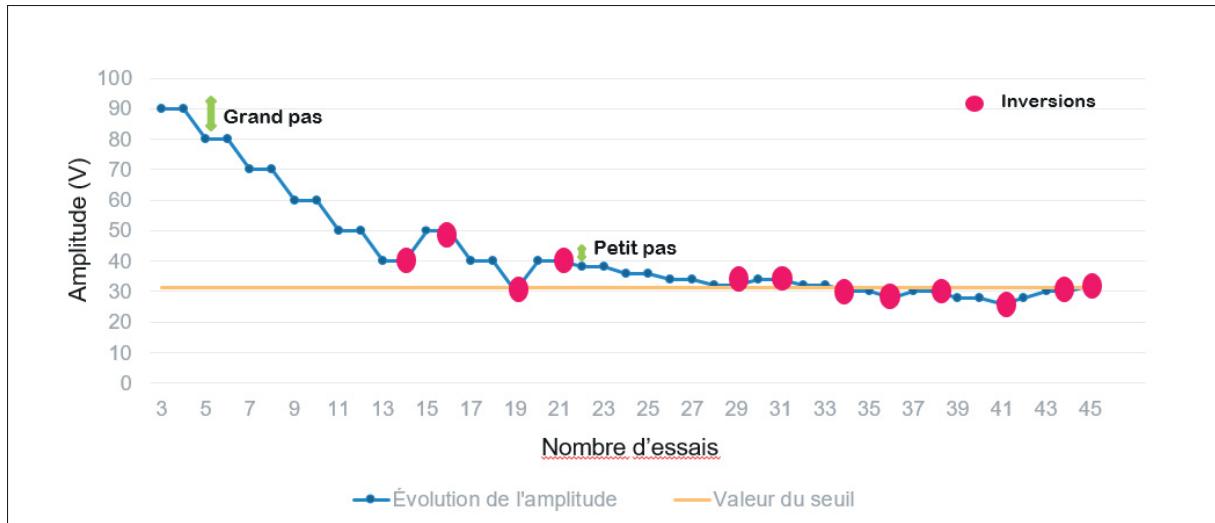


Figure 3.11 Exemple de données récoltées par la méthode de l'escalier adaptatif "un haut, deux bas"

3.4.1 Analyse des données basées sur les deux régions de la main

Le Tableau 3.1 et la Figure 3.12 montrent les seuils de détection absolus du stimulus électro-vibratoire pour chaque participant, basée sur les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume. Les données ont été analysées par ANOVA à mesures répétées avec un facteur : la différence entre le bout du doigt et la paume de la main. Les résultats montrent que la différence entre le bout du doigt et la paume n'est pas un paramètre significatif pour modifier le seuil de détection absolu ($F(1,26) = 2,252, p = 0,145$).

La Figure 3.13 représente le diagramme des seuils de détection absolu pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume

3.4.2 Analyse des données basées sur le genre

Le Tableau 3.2 et la Figure 3.14 montrent les seuils de détection absolus du stimulus électro-vibratoire au niveau du bout du doigt, pour les deux genres, hommes et femmes. Les données ont été analysées par ANOVA à mesures répétées avec un facteur : la différence entre les deux genres, hommes et femmes. Les résultats montrent que la différence entre

Tableau 3.1 Les seuils de détection absolus pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume

Participants	Bout du doigt	Paume de la main
P1	18.6	13
P2	11.6	19.6
P3	44.8	9
P4	15.8	46.8
P5	31.2	19.4
P6	5.6	6.4
P7	36.6	79.8
P8	30.8	88.2
P9	17.4	26
P10	29.8	43.6
P11	6.8	20.4
P12	6	14
P13	65	55.6
P14	13.2	76.2

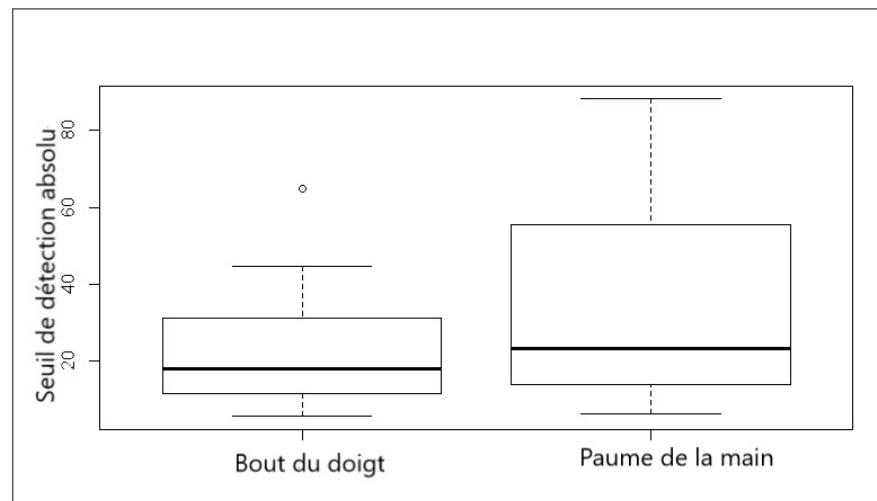


Figure 3.12 Les seuils de détection absolus pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume

le genre n'est pas un paramètre significatif pour modifier le seuil de détection absolu du stimulus électro-vibratoire au niveau du bout du doigt ($F(1,12) = 0.005$, $p = 0.943$).

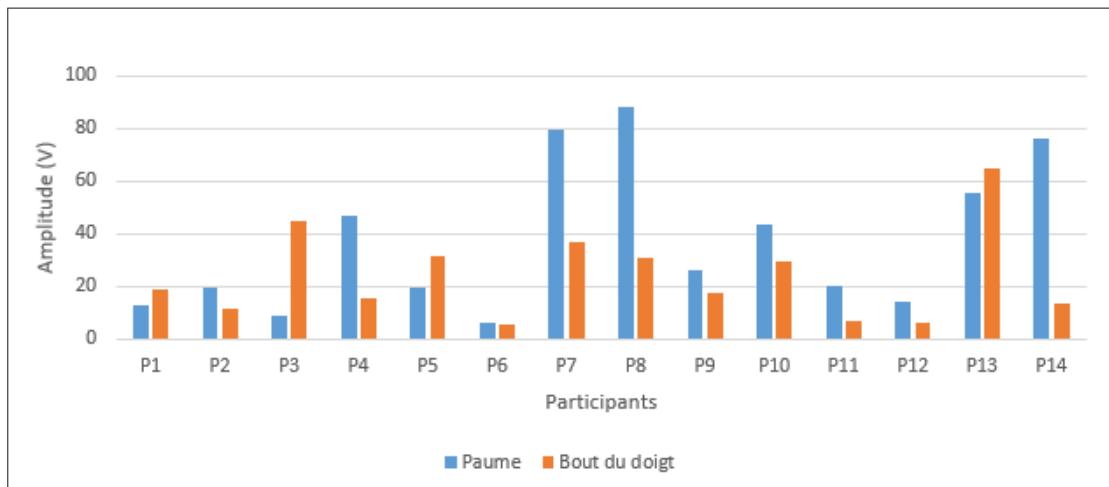


Figure 3.13 Diagramme des seuils de détection absolus pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume

Tableau 3.2 Les seuils de détection absolus du bout du doigt pour les deux genres : Homme et Femme

Homme							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Bout du doigt	30.8	17.4	29.8	6.8	6	65	13.5
Femme							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Bout du doigt	18.6	11.6	44.8	15.8	31.2	5.6	36.6

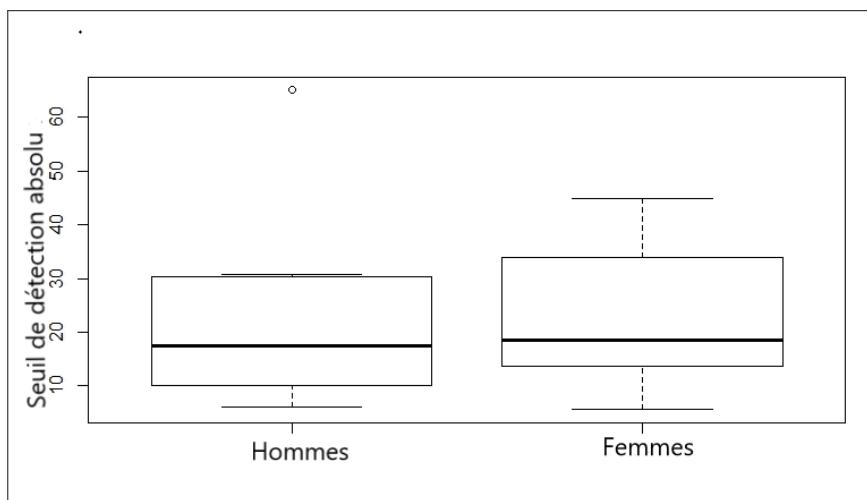


Figure 3.14 Les seuils de détection absolus du bout du doigt pour les deux genres : Homme et Femme

Le Tableau 3.3 et la Figure 3.15 montrent les seuils de détection absolus du stimulus électro-vibratoire au niveau de la paume, pour les deux genres, hommes et femmes. Les données ont été analysées par ANOVA à mesures répétées avec un facteur : la différence entre les deux genres, hommes et femmes. Les résultats montrent que la différence entre le genre homme et femme n'est pas un paramètre significatif pour modifier le seuil de détection absolu du stimulus électro-vibratoire au niveau de la paume ($F(1,12) = 1.591$, $p = 0.231$).

Tableau 3.3 Les seuils de détection absolus de la paume pour les deux genres : Homme et Femme

Homme							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Paume de la main	88.2	26	43.6	20.4	14	55.6	76.2
Femme							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Paume de la main	13	19.6	9	46.8	19.4	6.4	79.8

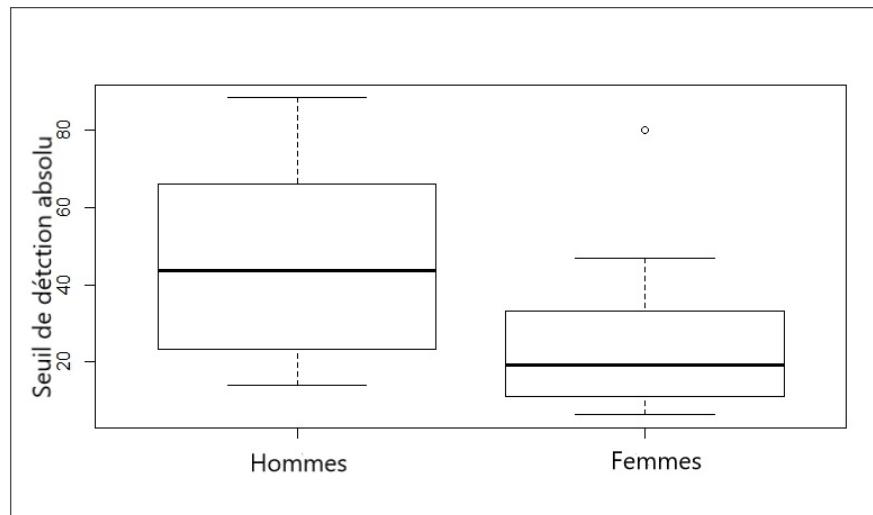


Figure 3.15 Les seuils de détection absolus de la paume pour les deux genres : Homme et Femme

3.5 Discussion

Cette étude vise à déterminer l'effet des régions de la main sur la perception tactile de l'électro-vibration. Nous avons généré des signaux sinusoïdaux avec des fréquences aléa-

toires, et fait évoluer l'amplitude en fonction des réponses des participants, selon la méthode de l'escalier adaptatif "un en haut, deux en bas", pour chaque partie de la main. Ensuite, nous avons calculé le seuil de détection absolu.

Dans le Tableau 3.1, nous récapitulons pour chaque participant, la valeur du seuil correspondant à chaque partie de la main. Dans la Section 3.4.1, nous n'avons trouvé aucun effet statistiquement significatif des différences de régions de la main sur la perception tactile de l'électro-vibration.

Cependant, il est important de noter que deux participants ont réagi différemment des autres. Le premier participant a eu une bonne perception du stimulus d'électro-vibration au bout du doigt. Néanmoins, il ne sentait pas le stimulus sur la paume de la main, même lorsque l'amplitude du signal est élevée. Le deuxième participant a mentionné qu'il était difficile d'appuyer sur la pédale, de faire glisser les parties de la main et de surveiller la force appliquée sur l'écran tactile en même temps. En éliminant ces deux participants, aucune différence significative n'a toutefois été constatée dans l'analyse des données, comme indiqué dans l'annexe II.

Dans la Section 3.4.2, nous n'avons pas trouvé d'effet statistiquement significatif de la différence de genre sur la perception du stimulus électro-vibratoire, pour le bout du doigt, ainsi que pour la paume de la main.

Les résultats de cette étude révèlent la sensibilité de la paume vis-à-vis le stimulus électro-vibratoire. Une explication possible de la sensibilité de cette partie est qu'elle est riche en mécanorécepteurs susceptibles d'être responsables de la perception du stimulus électro-vibratoire (Cabrerá, Heredia & Tsetserukou, 2020).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le présent travail de recherche propose une exploration conceptuelle et pratique de l'électro-vibration sur les vêtements et les objets intelligents. La première étape a porté sur les vêtements et les dispositifs électro-vibrants, qui stimulent différentes parties du corps, fabriqués à l'aide de matériaux conducteurs flexibles, de textiles et de plaques capacitatives découpées. Les résultats préliminaires montrent que la perception varie principalement en fonction de la zone stimulée. En effet, il a été constaté que la paume et le bout des doigts étaient les plus sensibles. Au niveau du poignet, la sensation était moins forte. Quant à l'avant-bras, aux cuisses et au cou, la sensation était subtile et ressemblait davantage à un picotement désagréable.

De nombreux défis restent à relever avant de concevoir un dispositif électro-vibrant portable, comme la difficulté de contrôler la quantité de peinture déposée, son homogénéité sur la surface du matériau conducteur et le problème de son enlèvement au fil du temps. De plus, plusieurs facteurs doivent être pris en considération lors du choix des matériaux conducteurs, particulièrement pour les textiles, car certains sont susceptibles d'absorber la peinture et de devenir rigides, tandis que d'autres repoussent la peinture de sorte qu'elle ne se fixe pas sur la surface. Le découpage des écrans tactiles semble également être une piste intéressante pour la conception d'objets électro-vibrants. Cependant, il apparaît que les sensations d'électro-vibrations se distinguent difficilement des autres sensations produites lors du déplacement de l'appareil portable contre la peau, notamment le bracelet contre le poignet.

Nous avons ensuite orienté notre intention vers la conception d'un clavier électro-vibrant stimulant la paume. Nous avons également proposé un large éventail d'applications pour ce clavier par le biais d'un brainstorming. Une étude plus approfondie a été menée pour comparer la perception des stimuli électro-vibratoires au niveau de la paume et du bout

des doigts. En analysant les données recueillies, nous avons constaté que la différence entre les régions de la main n'affecte pas la perception de ce stimulus. À la lumière des études précédentes, nous pouvons conclure que la perception du stimulus électro-vibratoire est davantage liée à d'autres paramètres tels que les propriétés du signal d'entrée, l'humidité du doigt, l'isolation électrique et la force appliquée.

À ce jour et à notre connaissance, il s'agit de la première étude explorant l'électro-vibration avec des matériaux conducteurs flexibles et des textiles, et stimulant les régions du corps autres que le bout du doigt. Les résultats obtenus contribuent non seulement à la compréhension de la sensibilité des parties du corps, mais aussi à développer des applications qui fournissent un retour tactile réaliste à des objets électro-vibrants sans exiger d'actionneurs encombrants.

Les travaux futurs peuvent viser à améliorer la conception d'objets électro-vibrants portables, destinés à simuler simultanément le bout du doigt et la paume de la main. Une optimisation de ces objets pourrait également être envisagée, afin de permettre la détection de différentes sensations et le déclenchement d'actions en même temps.

ANNEXE I

CLASSIFICATION DES IDÉES DU BRAINSTORMING

La classification des idées collectées lors du brainstorming est très importante afin de pouvoir choisir une application du clavier électro-vibrant. Nous avons fixé 3 paramètres pour classifier nos idées :

- nécessité de capter la position de la main.
- le toucher occasionnel ou habituel de l'écran tactile.
- la possibilité d'exécuter les deux tacher (frotter contre la plaque et taper sur un clavier) en même temps.

Le Tableau-A I-1 présente une classification des données selon les trois paramètres énoncés.

Tableau -A I-1 Classification des idées collectées lors du Brainstorming

	Nécessité de capter la position de la main	Le toucher occasionnel ou habituel de l'écran tactile	La possibilité d'exécuter les deux tacher en même temps
Notifications	Capter la position de la main n'est pas critique, l'utilisateur peut explorer toute la surface de l'écran tactile.	Le toucher dans ce cas est plutôt occasionnel, seulement lorsque l'utilisateur reçoit une notification.	Oui, il est possible de taper sur le clavier et d'explorer l'écran tactile au même temps.
Communication	Il est possible de capter la position de la main dans certains cas, par exemple, chaque zone dans l'écran tactile correspond à un emoji spécifique. Autrement, il n'est pas vraiment nécessaire de capter la position de la main, il suffit d'explorer toute la surface de l'écran afin de savoir si l'autre personne est en train d'écrire ou s'il a bien reçu le message.	Le toucher ici pourra être habituel, pendant toute la période que le participant communique avec les autres. Également, il pourra être occasionnel, seulement lorsque l'utilisateur veut envoyer un message rapidement, pendant qu'il exécute d'autres tâches.	Oui, il est possible de taper sur le clavier et d'explorer l'écran tactile au même temps. Et ceci pourra être très avantageux dans ce cas.
État du système	Il n'est pas nécessaire dans ce cas de capter la position de la main, il suffit de frotter la paume de la main sur toute la surface de l'écran tactile afin d'avoir un retour sur l'état du système.	Le toucher ici est occasionnel seulement lorsque le participant voulait se renseigner sur l'état du système.	Oui, il est possible de taper sur le clavier et d'explorer l'écran tactile au même temps.

	Nécessité de capter la position de la main	Le toucher occasionnel ou habituel de l'écran tactile	La possibilité d'exécuter les deux tacher en même temps
Cliquer et ajuster un paramètre avec les gestes	Il est important de capter la position de la main dans ce cas. En effet, l'ajustement d'un certain paramètre est basé sur le déplacement de la paume de la main dans une direction bien particulière, par exemple si l'utilisateur veut faire un zoom out, il déplace la main vers l'extérieur, s'il veut faire un zoom in, il déplace la paume de la main vers l'intérieur.	Le toucher ici est occasionnel, seulement lorsque le participant veut ajuster un paramètre ou effectuer une tâche particulière	Oui, il est possible de taper sur le clavier et d'explorer l'écran tactile au même temps.
Autocorrection et formalité des mots	Il n'est pas nécessaire de capter la position de la main dans ce cas. L'utilisateur pourra se servir de toute la surface de l'écran tactile afin d'avoir un retour sur la formalité du mot ou faire une autocorrection.	Le toucher ici pourra être habituel, pendant toute la période que le participant écrit. Également, il pourra être occasionnel, seulement lorsque l'utilisateur veut faire une autocorrection d'un mot spécifique ou bien il veut avoir la formalité d'un mot spécifique.	Faire les deux tâches simultanément dans ce cas est possible et très bénéfique pour l'utilisateur.

	Nécessité de capter la position de la main	Le toucher occasionnel ou habituel de l'écran tactile	La possibilité d'exécuter les deux tâches en même temps
Modification d'un document par une autre personne	Il n'est pas nécessaire de capter la position de la main dans ce cas. L'utilisateur pourra se servir de toute la surface de l'écran tactile afin de savoir si le document a été modifié par une autre personne.	Le toucher ici est occasionnel, seulement lorsque l'utilisateur voudrait savoir s'il y a une modification faite par une autre personne sur un document.	Oui, il est possible de taper sur le clavier avec les bouts des doigts et d'explorer l'écran tactile avec la paume de la main au même temps dans ce cas.
Les jeux	Il est nécessaire de capter la position de la paume de la main dans ce cas, par exemple, lorsque le participant atteint une limite ceci peut être accompagné d'une sensation de texture différente. Ou bien la région avec la sensation différente indique la présence d'un ennemi.	Le toucher ici pourra être habituel pendant toute la période du jeu.	Faire les deux tâches simultanément dans ce cas est possible et très bénéfique pour l'utilisateur.

ANNEXE II

ANALYSE DES DONNÉES BASÉES SUR LES DEUX RÉGIONS DE LA MAIN, EN EXCLUANT LE PARTICIPANT 8 ET LE PARTICIPANT 13

Le Tableau-A II-1 et la Figure-A II-1 montrent les seuils de détection absous du stimulus électro-vibratoire, basée sur les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume, excluant le participant 8 et le participant 13.

Les données ont été analysées par ANOVA à mesures répétées avec un facteur : la différence entre le bout du doigt et la paume de la main. Les résultats montrent que la différence entre le bout du doigt et la paume n'est pas un paramètre significatif pour modifier le seuil de détection absolu ($F(1,22) = 1.956, p = 0,176$).

Tableau-A II-1 Les seuils de détection absous pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume, excluant le participant 8 et le participant 13

Participants	Bout du doigt	Paume de la main
P1	18.6	13
P2	11.6	19.6
P3	44.8	9
P4	15.8	46.8
P5	31.2	19.4
P6	5.6	6.4
P7	36.6	79.8
P9	17.4	26
P10	29.8	43.6
P11	6.8	20.4
P12	6	14
P14	13.2	76.2

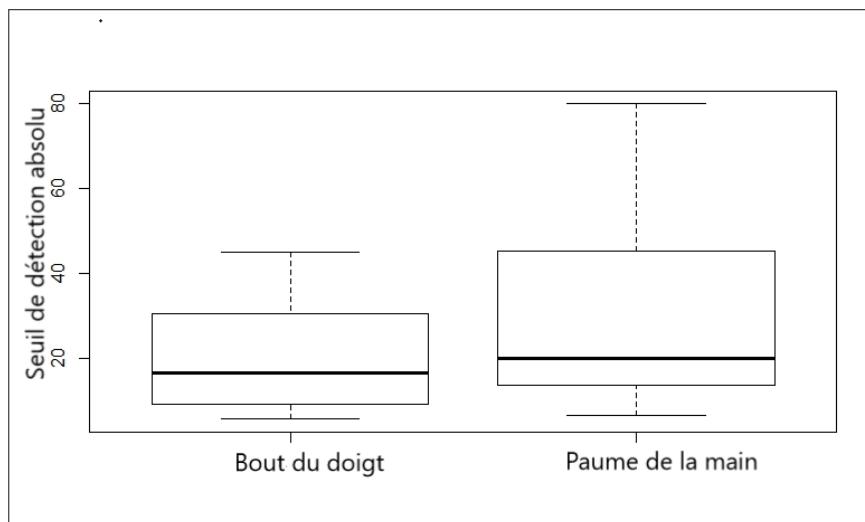


Figure-A II-1 Les seuils de détection absolus pour les deux régions de la main : le bout du doigt et la paume, en excluant le participant 8 et le participant 13

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, M. J., Johnson, S. A., Lefèvre, P., Lévesque, V., Hayward, V., André, T. & Thonnard, J.-L. (2013). Finger pad friction and its role in grip and touch. *Journal of The Royal Society Interface*, 10(80), 20120467.
- Agarwal, A. K., Nammi, K., Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E. & Beebe, D. J. (2002). A hybrid natural/artificial electrostatic actuator for tactile stimulation. *2nd Annual International IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology. Proceedings (Cat. No. 02EX578)*, pp. 341–345.
- Anderson, F., Grossman, T., Wigdor, D. & Fitzmaurice, G. (2015). Supporting subtlety with deceptive devices and illusory interactions. *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1489–1498.
- Basdogan, Cagatay et Giraud, F. e. L. V. e. C. S. A review of surface haptics : activation des effets tactiles sur les surfaces tactiles. *transactions IEEE sur haptique*, 13, 450-470.
- Bau, O. & Poupyrev, I. (2012). REVEL : tactile feedback technology for augmented reality. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(4), 1–11.
- Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. & Harrison, C. (2010). TeslaTouch : electrovibration for touch surfaces. *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 283–292.
- Cabrera, M. A., Heredia, J. & Tsetserukou, D. (2020). Tactile Perception of Objects by the User's Palm for the Development of Multi-contact Wearable Tactile Displays. *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 51–59.
- Castano, L. M. & Flatau, A. B. (2014). Smart fabric sensors and e-textile technologies : a review. *Smart Materials and structures*, 23(5), 053001.
- Dzedzickis, A., Sutinys, E., Bucinskas, V., Samukaite-Bubniene, U., Jakstys, B., Ramanavicius, A. & Morkvenaite-Vilkonciene, I. (2020). Polyethylene-Carbon Composite (Velostat®) Based Tactile Sensor. *Polymers*, 12(12), 2905.
- Gescheider, G. A., Wright, J. H. & Verrillo, R. T. (2010). *Information-processing channels in the tactile sensory system : A psychophysical and physiological analysis*. Psychology press.
- Goldstein, E. B. (1996). *Sensation and perception*.

Guo, X., Zhang, Y., Wang, D., Lu, L., Jiao, J. & Xu, W. (2019). The Effect of Applied Normal Force on the Electrovibration. *IEEE Transactions on Haptics*, 12(4), 571-580. doi : 10.1109/TOH.2019.2897768.

Hamdan, N. A.-h., Voelker, S. & Borchers, J. (2018). Sketch&stitch : Interactive embroidery for e-textiles. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13.

Ilkhani, G., Aziziaghdam, M. & Samur, E. (2017). Data-driven texture rendering on an electrostatic tactile display. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 33(9), 756–770.

Israr, A., Bau, O., Kim, S.-C. & Poupyrev, I. (2012). Tactile Feedback on Flat Surfaces for the Visually Impaired. doi : 10.1145/2212776.2223674.

Jones, L. A. & Tan, H. Z. (2013). Application of Psychophysical Techniques to Haptic Research. *IEEE Transactions on Haptics*, 6(3), 268-284. doi : 10.1109/TOH.2012.74.

Kaczmarek, K. A., Nammi, K., Agarwal, A. K., Tyler, M. E., Haase, S. J. & Beebe, D. J. (2006). Polarity effect in electrovibration for tactile display. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 53(10), 2047–2054.

Kang, J., Kim, H., Choi, S., Kim, K.-D. & Ryu, J. (2016). Investigation on low voltage operation of electrovibration display. *IEEE transactions on haptics*, 10(3), 371–381.

Karuei, I., MacLean, K. E., Foley-Fisher, Z., MacKenzie, R., Koch, S. & El-Zohairy, M. (2011). Detecting vibrations across the body in mobile contexts. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 3267–3276.

Kim, H., Kang, J., Kim, K.-D., Lim, K.-M. & Ryu, J. (2015). Method for providing electrovibration with uniform intensity. *IEEE transactions on haptics*, 8(4), 492–496.

Levesque, V. & Cruz-Hernandez, J. M. (2015). Method and apparatus for simulating surface features on a user interface with haptic effects. Google Patents. US Patent 9,196,134.

Levesque, V., Cruz-Hernandez, J. M., Weddle, A. & Birnbaum, D. M. (2016). System and method for simulated physical interactions with haptic effects. Google Patents. US Patent 9,330,544.

Linjama, J. & Mäkinen, V. (2009). E-sense screen : Novel haptic display with capacitive electrosensory interface. *HAID 2009, 4th Workshop for Haptic and Audio Interaction Design*.

- Mallinckrodt, E., Hughes, A. & Sleator Jr, W. (1953). Perception by the skin of electrically induced vibrations. *Science*.
- Meyer, D. J., Peshkin, M. A. & Colgate, J. E. (2013). Fingertip friction modulation due to electrostatic attraction. *2013 world haptics conference (WHC)*, pp. 43–48.
- Nakamura, T. & Yamamoto, A. (2016). A multi-user surface visuo-haptic display using electrostatic friction modulation and capacitive-type position sensing. *IEEE transactions on haptics*, 9(3), 311–322.
- Norman, D. (2013). *The design of everyday things : Revised and expanded edition*. Basic books.
- Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi, M., Frisoli, A., Hayward, V. & Prattichizzo, D. (2017). Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand : Taxonomy, Review, and Perspectives. *IEEE Transactions on Haptics*, 10(4), 580-600. doi : 10.1109/TOH.2017.2689006.
- Poupyrev, I., Gong, N.-W., Fukuhara, S., Karagozler, M. E., Schwesig, C. & Robinson, K. E. (2016). Project Jacquard : interactive digital textiles at scale. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4216–4227.
- Saal, H. P., Delhaye, B. P., Rayhaun, B. C. & Bensmaia, S. J. (2017). Simulating tactile signals from the whole hand with millisecond precision. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(28), E5693–E5702.
- Schneider, O., MacLean, K., Swindells, C. & Booth, K. (2017). Haptic experience design : What hapticians do and where they need help. *International Journal of Human-Computer Studies*, 107, 5–21.
- Strong, R. M. & Troxel, D. E. (1970). An electrotactile display. *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, 11(1), 72–79.
- Tang, H. & Beebe, D. J. (1998). A microfabricated electrostatic haptic display for persons with visual impairments. *IEEE Transactions on rehabilitation engineering*, 6(3), 241–248.
- Vardar, Y., Güçlü, B. & Basdogan, C. (2017a). Effect of waveform on tactile perception by electrovibration displayed on touch screens. *IEEE transactions on haptics*, 10(4), 488–499.
- Vardar, Y., İşleyen, A., Saleem, M. K. & Basdogan, C. (2017b). Roughness perception of virtual textures displayed by electrovibration on touch screens. *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 263–268.

- Wang, Q., Ren, X., Sarcar, S. & Sun, X. (2016). EV-Pen : Leveraging electrovibration haptic feedback in pen interaction. *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pp. 57–66.
- Weng, W., Chen, P., He, S., Sun, X. & Peng, H. (2016). Smart electronic textiles. *Angewandte Chemie International Edition*, 55(21), 6140–6169.
- Wijekoon, D., Cecchinato, M. E., Hoggan, E. & Linjama, J. (2012). Electrostatic modulated friction as tactile feedback : Intensity perception. *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 613–624.
- Zeng, T. (2012). *Conception et Contrôle d'un périphérique dédié à la simulation couplée kinesthésique et tactile*. (Thèse de doctorat, Lille 1).