Développement d'un capteur tactile multimodal

par

Alexis MASLYCZYK

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

MONTRÉAL, LE 13 OCTOBRE 2016

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Alexis Maslyczyk, 2016

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 Duchaine, Directeur de Mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de Technologie Supérieure

M. Pascal Bigras, Président du Jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de Technologie Supérieure

M. Matthew Toews, Membre du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de Technologie Supérieure

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

LE 4 OCTOBRE 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Tout d'abord je souhaite remercier Vincent DUCHAINE, mon directeur de mémoire pour m'avoir permis de réaliser ma maitrise au sein du laboratoire de Commande Robotique de l'Ecole de Technologie Supérieure de Montréal.

Je tiens à également remercier toute l'équipe du Laboratoire CoRo et plus particulièrement Jean-Philippe ROBERGE, Loan Le THUY HONG, Deen COCKBURN et Jean-Baptiste CHOSAT qui m'ont accompagné tout au long de cette expérience avec beaucoup de bienveillance.

Je désire aussi remercier Mme. HOOFT, M. HORLACHER, Mme. NEYER, M. BANTAS ainsi que le service des stages de l'UTBM et de l'ETS pour leur aide et tous leurs précieux conseils qui m'ont permis de préparer au mieux ma maitrise.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée pour ma famille et mes amis qui m'ont aidé et soutenu tout au long de cette aventure.

DÉVELOPPEMENT D'UN CAPTEUR TACTILE MULTIMODAL

Alexis MASLYCZYK

RÉSUMÉ

La restitution du sens du toucher est une caractéristique très importante chez l'humain. Contrairement à la vision ou au sens auditif, le toucher n'est pas une quantité bien définie. Le développement de capteur tactile pour la restitution du toucher s'est avéré être un enjeu très important pour le futur de la robotique. La détection tactile est cruciale pour l'interaction entre les robots et les humains ou les objets. En effet, elle permet de fournir une information pertinente pour le contrôle des forces de contact à la fois dans les interactions volontaires et involontaires avec l'environnement. Ce présent document a pour but de présenter le développement d'un nouveau capteur tactile pour la robotique. L'étude comporte le prototypage, l'optimisation et la synthèse du capteur. La technologie capacitive est utilisée pour être capable de mesurer les forces à la surface du capteur. La grande résolution spatiale du capteur permet de reconnaitre les formes et les détails des objets saisies. Outre la détection statique, le capteur est capable de repérer des événements dynamiques tels que des glissements ou des vibrations grâce au même principe de transduction que la partie statique. Enfin, l'ajout d'une unité de mesure inertielle au sein de du capteur va permettre d'estimer sa position dans l'espace et détecter d'autres types d'événements dynamiques. Toutes ces fonctionnalités réunies font du capteur un outil très complet et utile pour des applications de manipulation d'objet ou pour des interactions entre un robot et son environnement.

Mots clés: capteur tactile capacitif, détection statique, détection dynamique, unité de mesure inertielle

DEVELOPMENT OF SENSITIVE MULTIMODAL TACTILE SENSOR

Alexis MASLYCZYK

ABSTRACT

The sense of touch is a defining characteristic for human beings. Contrary to other senses like seeing and hearing, the sense of touch is not easily as quantifiable. The development of a tactile sensor for the restitution of physical contact is a challenging enterprise for the field of robotics. Tactile detection is crucial for interaction between robots, objects, and humans. As a result, the voluntary and involuntary action of touching generates important information concerning the control of forces. This document will present the development of a new multimodal tactile sensor for a robotic grasper. This study synthesizes the prototype and optimization of the sensor. The capacitative technology is used to measure forces at the surface of the sensor. Due to the high-spatial resolution, the sensor is able to recognize the forms and the details of specific objects that it manipulates. Besides static detection, the sensor is able to find and detect dynamic events, like the sensation of slippage or vibrations, with the same principle of transduction. Finally, the addition of an inertial measurement unit inside the sensor permits it to estimate its position in its environment and also detect dynamic events. All of these capabilities come together to create a complete sensor which enables a robotic grasper to interact with its surroundings. **Keywords:** tactile sensor, capacitive sensor,static tactile sensing,dynamic tactile

sensing, inertial measurement unit

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 LE SYSTÈME SENSORIEL HUMAIN 3
1.1 Les différents méchanorécepteurs 3
1.2 Introduction au capteur tactile 6
1.3 Comparaison croisée des technologies 13
1.4 Les caractéristiques du capteur idéal 13

CHAPITRE 2 CAPTEUR TACTILE POUR LA ROBOTIQUE 17
2.1 Introduction 17
2.2 Capteur statique 18
2.2.1 Principe général 18
2.2.2 Résolution et densité spatiale 19
2.2.3 Design du diélectrique 21
2.2.4 Principe d'estimation des capacités 24
2.2.5 Caractéristique de la partie statique 26
2.2.6 Étalonnage 30
2.3 Capteur dynamique 32
2.3.1 Principe 32
2.3.2 Intégration 34
2.3.3 Caractéristique de la partie dynamique 36
2.4 Optimisation du capteur 38
2.4.1 Sensibilité 42
2.4.2 Uniformité 42
2.5 Limitations et diaphonie 44
2.5.1 Perturbations dans le diélectrique 44
2.5.2 CEM et Règles de design 45
2.5.3 Communication et timing 47
2.6 Séparation des parties statique et dynamique 48
2.6.1 Utilisation d'un film piézoélectrique 49
2.6.2 Partie expérimentale 53
2.6.3 Intégration mécanique 55
2.6.4 Conclusion : Forces et faiblesses du capteur 55

CHAPITRE 3 UNITÉ DE MESURE INERTIELLE 59
3.1 Introduction 59
3.2 Configuration de la pince pour la saisie d'objet 59
3.2.1 Sous actionnement 60
3.2.2 Algorithme de système de référence de cap et d'attitude 63
3.2.3 Intégration 67

3.2.4 Angles des doigts de la pince pour la saisie 69
3.3 Discrimination des vibrations externes avec l'accéléromètre 71

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 77

ANNEXE I ANNEXE 79

BIBLIOGRAPHIE 82

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Les différents mécanorécepteurs 3

Tableau 1.2 Caractéristiques des différents mécanorécepteurs 4

Tableau 1.3 Comparaison des technologies 14

Tableau 1.4 Recommandations pour les capteurs tactiles 15

Tableau 2.1 Temps de transmissions des données avec un UART 49

Tableau 3.1 Caractéristiques de différents capteurs 68

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Les différentes terminaisons nerveuses tiré de Kleinhans (2015) 5

Figure 1.2 Principe d'un capteur magnétique 7

Figure 1.3 Design d'un capteur optique tiré de Ohka *et al.* (2005) 8

Figure 1.4 Conformable Tactile Pad de Pressure Profile Systems 10

Figure 1.5 Robotouch intégré sur la pince PR2 et les mains Twendy-One et Barrett 11

Figure 1.6 E-skin par Takao Someya Group 12

Figure 1.7 Schéma du capteur BioTac® 12

Figure 2.1 condensateur plan 18

Figure 2.2 Exemple de résolution 20

Figure 2.3 PCB coté électrode 21

Figure 2.4 Micro structure par Rana *et al.* (2016) 22

Figure 2.5 Procédé de fabrication 23

Figure 2.6 Cône du diélectrique 23

Figure 2.7 Schéma du Capsense Sigma Delta 24

Figure 2.8 Équivalence de la capacité à mesurer 25

Figure 2.9 Caractéristique de la partie statique 27

Figure 2.10 Hystérésis 27

Figure 2.11 Bruit du capteur 28

Figure 2.12 Drift en fonction de la température 29

Figure 2.13 Exemple de l'interface avec 2 doigts sur le capteur 30

Figure 2.14 Estimation de la force 31

Figure 2.15 Différentes couches du capteur 33

Figure 2.16 Montage amplificateur de charge 34

Figure 2.17 Schéma d'implémentation dans le PSoC 35

Figure 2.18 FFT du signal dynamique 36

Figure 2.19 Réponse fréquentielle 37

Figure 2.20 Effets de bords sur un condensateur plan 39

Figure 2.21 Design du motif 40

Figure 2.22 Comparaison des deux design 41

Figure 2.23 Nouveau design du capteur 41

Figure 2.24 Comparaison des aires des deux designs 42

Figure 2.25 Comparaison des réponses des deux designs 43

Figure 2.26 Comparaison de l'image tactile entre les deux designs lors d'une saisie d'une tasse par l'anse 44

Figure 2.27 Signal dynamique perturbé par la partie statique 45

Figure 2.28 Comparaison du signal dynamique lorsque des données transitent via l'I2C 48

Figure 2.29 Construction du film PVDF 51

Figure 2.30 Direction des étirements 52

Figure 2.31 Schéma d'amplification avec le PVDF piézoélectrique 54

Figure 2.32 Bande passante du film piézoélectrique 55

Figure 2.33 Intégration mécanique 56

Figure 3.1 Adaptation du doigt la pince à la forme de l'objet 60

Figure 3.2 Préhensions possibles une main sous-actionnée 3 doigts de Robotiq 61

Figure 3.3 Exemple de cas de sous-actionnement 62

Figure 3.4 Dimensions du MPU9250 de InvenSense™ 66

Figure 3.5 Capteur avec l'IMU 67

Figure 3.6 Exemple d'un léger sous actionnement 70

Figure 3.7 Exemple d'un sous actionnement maximale..... 71

Figure 3.8 Frottements d'un objet sur une surface 72

Figure 3.9 Signal dynamique du capteur avec les accéléromètres 74

Figure 3.10 Zoom du signal dynamique du capteur avec les accéléromètres..... 75

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADC	Analog to Digital Converter
AHRS	Attitude and Heading Reference System
CCD	Charge Coupled Devices
CDC	Capacitance to Digital Converters
DMA	Direct Memory Access
ETS	École de Technologie Supérieure
EMI	Electromagnetic Interference
FFA	Fast Fourier Transform
GUI	Graphic User Interface
IC	Integrated Circuits
IMU	Inertial Measurement Unit
MCU	Micro-controller Unit
PCB	Printed Circuit Board
PGA	Programmable Gain Amplifier
PSoC	Programmable System on Chip
QFN	Quad Flat No-leads package
SA	Slow Adaptive
SNR	Signal to Noise Ratio
SoC	System on Chip
Taxel	Tactile Pixel
TIA	Trans Impedance Amplifier

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

C	Capacité d'un condensateur
Q	Charge d'un condensateur
ε_0	permittivité du vide
ε_r	permittivité relative
e	Distance entre les deux armatures d'un condensateur
Hz	Hertz
F	Farad
cm	Centimètre
mm	Millimètre
um	Micromètre
N	Newton
V	Volt
A	Ampère

INTRODUCTION

La dextérité humaine est une chose fantastique : l'humain est capable de saisir une grande variété de formes et de tailles différentes, effectuer des tâches complexes et changer la préhension en fonction l' évolution de la tâche. Cela est dû en partie à la structure physique de nos mains avec plusieurs doigts et de nombreux degrés de la liberté, et en partie à nos capacités de contrôle sophistiquées. Dans une large mesure , cette capacité de contrôle est fondée sur la détection d'événement tactile et de force.

Avec les grands progrès de l'électronique et la présence de plus en plus prononcée de la robotique dans la vie quotidienne, la nécessité de la détection tactile pour interagir avec l'environnement semble être indispensable . Bien que l'interaction avec un environnement connu peut facilement être fait avec des entrées sensorielles limitées , des informations supplémentaires sont nécessaires lorsqu'on traite avec un environnement inconnu ou changer.

Ces dernières années , les chercheurs en robotique ont travaillé pour restituer un sens artificiel du toucher aux robots pour tenter de leur donner les capacités de manipulation que les humains possèdent. C'est d'abord la vision qui a reçu le plus d'attention dans la recherche. Mais elle n'est pas adaptée aux tâches de saisie, en effet la vision ne peux pas contrôler des tâches où il est question de contact et de détection de forces. Au mieux, la vision peut informer le robot sur les configurations des doigts qui sont susceptibles de réussir, mais à la fin un robot a besoin de l'information tactile.

De plus, de nombreuses tâches de saisie impliquent des scénarios où il est difficile de voir l'ensemble de l'objet, de sorte que les systèmes de vision ne peuvent souvent pas fournir toutes les informations dont le robot pourrait avoir besoin. Si un robot tente de ramasser un objet, un système de vision simple serait capable d' observer l'objet que d'un seul point de vue, et le robot n'aurait aucune idée de la forme tridimensionnelle de l'objet.

La création de mains robotiques à plusieurs doigts a intensifié l'intérêt de la détection tactile pour la manipulation, à commencer par les travaux préliminaires sur l' intégration des informations tactiles dans la manipulation (comme Salisbury 1984). Au cours de la dernière décennie, des études sur l'utilisation de la détection tactile pour le contrôle en temps réel lors de manipulation ont commencé à apparaître.

C'est avec toutes ces considérations que nous avons développé un capteur multimodal adapté pour la manipulation d'objet. Le mémoire est divisé en trois chapitres. Étant donné que la robotique s'inspire bien souvent du fonctionnement de l'être humain, le premier chapitre a pour but d'introduire le fonctionnement des mécanorécepteurs de la main humaine permettant de restituer le sens du toucher. Il donne un aperçu de la détection tactile en robotique et répond à trois questions fondamentales, qu'est-ce que l'on entend par détection tactile ? Pourquoi et comment ? Cela permet dans un second temps d'introduire les capteurs tactiles avec une brève revue de littérature présentant les différentes technologies de capteur. Enfin, le capteur idéal pour le domaine de la robotique est présenté.

Le deuxième chapitre introduit le capteur tactile développé en présentant les différentes caractéristiques de celui-ci. La caractérisation de notre capteur comporte 4 volets : dans le premier, nous apportons les notions nécessaires pour comprendre le fonctionnement de la partie statique ; le deuxième volet présente la partie dynamique ; dans le troisième, nous évaluons les possibilités d'optimisation de certains paramètres du capteur. Enfin dans le quatrième volet, une conclusion générale sur le capteur sera faite en faisant apparaitre ses limites.

Pour finir, le troisième chapitre présente de nouvelles fonctionnalités du capteur adapté à des applications de manipulation d'objet. Tout d'abord comment pouvons nous estimer la position du capteur dans l'espace pour des applications de saisie d'objet avec des préhenseurs sous-actionnés. Puis, nous verrons comment nous sommes capables de détecter de nouveaux événements tactiles grâce à l'ajout de plusieurs accéléromètres dans notre capteur.

CHAPITRE 1

LE SYSTÈME SENSORIEL HUMAIN

1.1 Les différents méchanorécepteurs

La restitution du sens du toucher est une caractéristique très importante chez l'humain. Il est en constante interaction avec l'environnement qui l'entoure. La prise d'information à partir de ses fonctions sensorielles lui permet de réagir vis-à-vis du monde extérieur et intérieur. Contrairement à la vision ou au sens auditif, le toucher n'est pas une quantité bien définie. Chez l'humain les récepteurs tactiles se trouvent sous forme de grappe autour de la peau comme le montre la figure 1.1. Lorsqu'un récepteur est stimulé, les récepteurs frottent les uns contre les autres provoquant un signal électrique. Ce signal va remonter jusqu'au cerveau ou il sera décodé et interprété sous forme d'image tactile. Parmi les 17000 récepteurs que compte le corps humain, il est possible de les différentier en plusieurs classes en fonction de leur champ de réception et de leur intensité et vitesse d'adaptation :

Tableau 1.1 Les différents mécanorécepteurs

Nom	**Location**	**Fonction**
Follicule pileux fin	Zone poilue de la peau	Réponse au déplacement du poil
Terminaisons de Ruffini	Derme de la peau velue	Réponse à une pression ou étirement de la peau
Corpuscule de Pacini	Couche profonde de la peau	Réponse aux vibrations
Corpuscule de Meissner	Derme de la peau glabre	Réponse aux mouvements et vibrations
Terminaisons nerveuses libres	Tout au long de la peau	Réponse thermique et mécanique
Disque de Merkel	Épiderme de la peau glabre	Réponse aux pressions sur la peau et aux textures

On différenciera les mécanorécepteurs en plusieurs catégories (voir tableau 1.1) : le Type I avec un champ de réception petit ; le Type II avec un champ de réception large ; les FA (adaptation

rapide ou fast adaptation en anglais) qui n'ont pas de réponse statique ; les SA (adaptation lente ou slow adaption en anglais) qui n'ont pas de réponse dynamique.

Chaque catégorie possède un champ, une bande de fréquence et une densité particulière comme le montre le tableau 1.2

Tableau 1.2 Caractéristiques des différents mécanorécepteurs

Récepteur	**Classe**	**Champ de réception (mm^2)**	**Bande de fréquence (Hz)**	**Récepteur par cm^2**
Corpuscule de Pacini	RA II	10-1000	40-800	21
Corpuscule de Meissner	RA I	1-100	3-40	140
Terminaisons de Ruffini	SA II	7-500	100-500	49
Disque de Merkel	SA I	2-100	0.4-3	70

Les Corposcules de Pacini sont en grandes parties responsables de l'adaptation rapide. Ces cellules sont très sensibles à de petits changements de stimuli et retournent une impulsion très rapide avec une période de l'ordre de 0.12ms. Pour protéger ces mécanorécepteurs d'un environnement hostille les Corposcules de Pacini se trouvent dans la couche sous-cutanée de la peau, ils permettront de détecter la rugosité d'une surface. En termes de densité spatiale, ces capteurs n'ont pas besoin d'une grosse densité spatiale pour détecter de petite vibration. Cela est attribué au faite qu'ils sont placés dans la couche profonde de la peau, et la peau va jouer le rôle de transmettre le signal au capteur. Les corpuscules de Meissner et les Follicules pileux font partie des mécanorécepteurs à adaptations modérées. Ils s'adaptent à une variation de l'ordre de la seconde et se trouvent à la surface de la peau. Pour l'adaptation lente, on va retrouver les disques de Merkel ainsi que les Terminaisons de Ruffini. Ils sont localisés proches de la peau et permettent la détection statique. La plage de détection peut varier de quelques secondes à plusieurs centaines de secondes. La détection de température par exemple fait partie des adaptations lentes.

Plusieurs stimuli peuvent être appliqués sur la peau comme la force, la taille et la position, la douceur, la dureté, la rugosité et la texture. Quand une force est appliquée sur le bout d'un

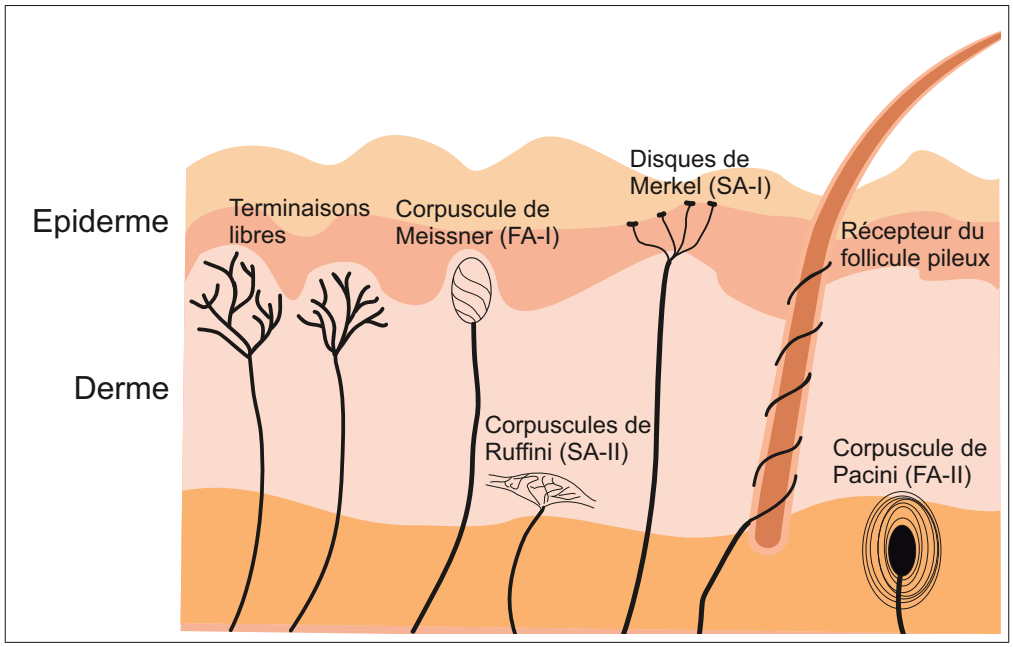


Figure 1.1 Les différentes terminaisons nerveuses tiré de Kleinhans (2015)

doigt, les récepteurs larges et rapides localisés sur le doigt vont se déclencher et indiquer une stimulation quelque part. Par conséquent les petits récepteurs FA autour de la localisation vont aussi se déclencher. Toutefois, si les stimuli sont maintenus stationnaires, les capteurs SA-I et SA-II vont présenter des réponses complémentaires. Il semblerait que les SA-II soient très sensibles aux forces tangentielles tandis que les SA-I sont sensibles aux forces normales. Pour la position et la taille, elles seront détectées par les unités FA qui permettront de quantifier la taille des stimuli. La douceur et dureté dépend des propriétés viscoélastiques de l'objet. Il semblerait que les sensations de douceur soit corrélées avec une activité des capteurs SA étant donné que cela fait appellent à la quantité de déformation. Les unités PC seront-elles aussi actives pour indiquer qu'il se passe quelque chose quelque part. Enfin, la texture et la rugosité peuvent être assimilés ou perçues par le doigt de l'humain comme des ondulations ou saillies d'une surface qui sont d'une échelle beaucoup plus petite que le bout du doigt, mais suffisamment grande pour permettre la discrimination entre la surface tactile en question et quelque chose de lisse. Pour cela il faut un mouvement latéral du doigt, les unités PC vont détecter les hautes fréquences et les unités RA décoderont les vibrations basses fréquences.

Les recherches antérieures ont mis en évidence que l'on peut diviser les unités sensorielles de la peau en trois groupes différents : mécano-sensibles, thermo-sensible et d'unités à seuil élevé. Les unités mécano-sensibles sont d'une importance vitale pour la détection tactile, tandis que le thermosensible et les unités à seuil élevé fournissent une contribution moindre pour la sensation tactile. La résolution temporelle chez l'humain pour la bande passante de vibration est de quelques Hz jusqu'à plusieurs centaines de Hz.

1.2 Introduction au capteur tactile

Les informations tactiles sont très utiles dans de nombreuses situations. Dans les tâches de manipulation, les informations tactiles sont utilisées comme paramètre de contrôle. Les informations requises comprennent les estimations des différents points de contacts, mesure des forces normales, détection de surface, localisation de glissement. La mesure des forces de contact permet le contrôle de la force de saisie, ce qui est essentiel pour le maintien d'une bonne stabilité lors d'une manipulation.

Afin de simuler les mécanorécepteurs humains présentés précédemment plusieurs technologies de capteur ont étés développées. En utilisant différent principe physique chaque technologie à ses forces et ses faiblesses. On différentiera les capteurs tactiles dynamiques permettant de détecter un mouvement comme un glissement ou une vibration par rapport aux capteurs tactiles statiques qui donnent une image de la répartition des pressions ou forces à la surface du capteur.

Il existe différentes méthodes pour mesurer une pression ou une force. Dans la plupart des cas, ces capteurs fonctionnent en utilisant des effets piézorésistifs, capacitifs, magnétiques, piézoélectriques ou optiques d'un matériau.

Mécanique

La forme la plus simple de capteur tactile est celle où la force est appliquée à un interrupteur mécanique classique pour former un capteur tactile binaire. La force nécessaire pour faire fonctionner l'interrupteur sera déterminée par les caractéristiques d'actionnement et des contraintes

externes. D'autres approches sont basées sur un mouvement mécanique activant un dispositif secondaire tel qu'un potentiomètre rotatif ou linéaire.

Piézorésistive

Les capteurs piézorésistifs, fonctionnent sur le principe selon lequel un métal conducteur change de résistance lorsqu'il est sous pression. Lorsqu'il est étiré, le métal devient plus fin et plus long, ce changement se traduit par une augmentation de sa résistance électrique. A l'inverse, lorsqu'il est compressé (sans déformation), il va s'élargir et réduire sa longueur, ce qui entraîne une diminution de la résistance électrique. Lorsque le métal est maintenu de sorte d'empêcher sa déformation permanente, le capteur peut être utilisé pour mesurer une force appliquée. Cette technologie est utilisée pour fabriquer la plupart des cellules de charge, ainsi que des capteurs de pression pour les fluides.

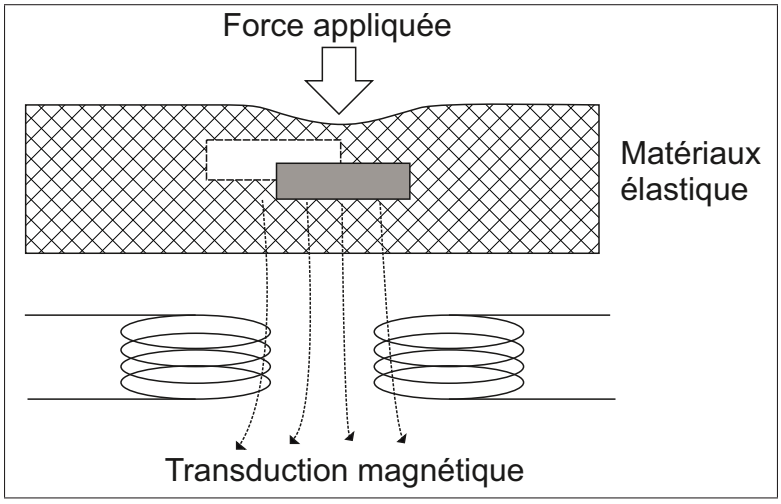


Figure 1.2 Principe d'un capteur magnétique

Magnétique

On retrouve deux approches pour la conception de capteurs tactiles basés sur la transduction magnétique. Premièrement, le déplacement d'un petit aimant par une force appliquée provoque un changement de densité de flux. Ensuite, la mesure du flux peut être effectuée soit par un effet Hall ou un dispositif magnétorésistant. La deuxième approche consiste à utiliser un transformateur et un matériau magnétoélastique qui se déforme sous la pression, et provoque un couplage

magnétique entre les enroulements du transformateur comme le présente la figure 1.2. Les capteurs magnétiques ont un certain nombre d'avantages qui incluent une grande sensibilité et une plage dynamique élevée, pas d'hystérésis mécanique mesurable, une réponse linéaire, et la robustesse physique.

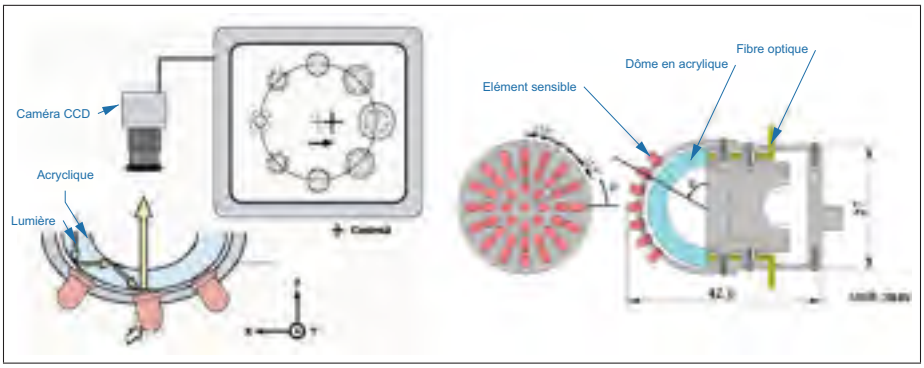


Figure 1.3 Design d'un capteur optique tiré de Ohka *et al.* (2005)

Optique

On retrouve quelques capteurs utilisant la technologie optique. En disposant correctement une source optique (généralement une LED) et un photodétecteur de telle sorte que toute force appliquée modifierait la trajectoire ou l'intensité de la lumière provenant de la source au détecteur. Un capteur de force fonctionnelle peut être créé. Il existe une variété d'orientations possibles qui sont capables de mesurer avec précision la variation de l'intensité lumineuse, et ainsi la quantité de force appliquée. Avec l'avancement de l'électronique, les émetteurs et des détecteurs sont de plus en plus petits, permettant la conception de capteurs toujours plus miniature comme le capteur développé par Ohka *et al.* (2005). Leur capteur est constitué d'un dôme et de plusieurs antennes coniques. Les éléments de détection sont assemblés comme représenté sur la figure 1.3. Une lumière est émise dans le dome en acrylique. Au centre on retrouve une caméra CCD qui va recevoir les émissions de lumière. En fonction des images acquises par la caméra, il est possible de déterminer la répartition des forces.

D'autres recherches ont été effectuées à l'Université de Tokyo pour créer un capteur tactile capable de recouvrir complètement un corps. Leur conception de détection tactile est composée

de photo-réflecteurs recouvert par la mousse d'uréthane. Les capteurs fonctionnent en mesurant la lumière diffusée par la mousse d'uréthane à la déformation d'une force. Ces photo-réflecteurs sont placés sur un ruban flexible qui est flexible et pliable pour modifier la longueur et permettant la mise en place correcte de l'élément de détection. En utilisant cette conception, la taille de ce capteur tactile a été fortement réduite par rapport à un autre capteur optique, avec seulement 3,2 mm x 1,7 mm x 1,1 mm chacune. Malheureusement, cette technologie est beaucoup trop énergivore, la consommation de chaque capteur est d'environ 50 mA donc trop élevée pour des applications embarquées.

Piézoélectrique

Les capteurs piézo-électriques produisent une charge électrique proportionnelle à une force appliquée, une pression ou une déformation. La limitation à des mesures dynamiques et la sensibilité à la température sont les principaux inconvénients de cette technologie de détection. Cependant, ils sont adaptés à la mesure des vibrations et largement utilisés en raison de leur sensibilité, la réponse en haute fréquence et la disponibilité sous diverses formes, par exemple, des matières plastiques, des cristaux (quartz), des céramiques et du fluorure de polyvinylidène. Parmi les différents matériaux piézoélectriques, le PVDF est le plus couramment utilisé pour la fabrication de capteurs tactiles, car il offre un bon compromis entre flexibilité, maniabilité et stabilité chimique (Flanagan et Wing (1993)).

Ultrason

La transduction ultrason peut aussi être utilisée pour le toucher tactile. Le principe est comparable à la technologie optique, une couche de caoutchouc mince est déformée quand un objet applique une force dessus. La valeur de cette déformation dépend de l'amplitude de la force appliquée à l'objet et la raideur du caoutchouc. Des émetteurs et récepteurs ultrasoniques sont placés sous la couche de caoutchouc. Les émetteurs vont envoyer des pulses de plusieurs Mhz à travers le caoutchouc. Ces ondes vont se propager à travers la couche puis être reflétées vers le récepteur. Généralement le temps de propagation des pulses ultrasoniques sont de l'ordre de la micro seconde. Les microphones sont connus pour être utiles pour détecter les bruits qui se produisent sur des surfaces au début du mouvement et pendant glissement. Un capteur qui

détecte les événements de contact grâce aux émissions ultrasonores au point de contact a été développé par Milighetti *et al.* (2006).

Capacitive

Les capteurs capacitifs sont généralement constitués d'un condensateur, dans lequel la distance entre les plaques ou la surface effective est modifiée lorsqu'une force est appliquée (décalage de leur position relative). L'un des grands avantages des capteurs capacitifs est qu'ils peuvent être très petits, permettant de construire des réseaux de capteurs denses et également d'acquérir des mesures dynamiques. Plusieurs exemples de capteurs tactiles capacitifs sont rapportés dans Schmidt *et al.* (2006).

Figure 1.4 Conformable Tactile Pad de Pressure Profile Systems

Nous retrouvons dans le commerce beaucoup de capteurs tactiles basés sur la mesure de capacité. Pressure Profile Systems commercialise des capteurs de pression pour différentes applications. Ils offrent une grande palette de capteur dépendamment des caractéristiques recherchées comme par exemple le pad tactile figure 1.4 pouvant aller jusqu'à 50psi. On peut citer aussi Robotouch qui est un capteur désigné pour la robotique. Il offre plusieurs avantages grâce à la technologie capacitive sa taille est compacte il résiste à des pressions élevées et possède une bonne immunité au bruit. Enfin, les capteurs Robotouch peuvent être intégrés sur n'importe quelle pince ou main robotique comme sur la figure 1.5 où les capteurs sont montés sur différents modèles de pinces et mains.

Figure 1.5 Robotouch intégré sur la pince PR2 et les mains Twendy-One et Barrett

Autres capteurs

Beaucoup de recherches ont été faites dans la création de systèmes MEMS (Microsystème électromécanique), qui permettent d'augmenter la résolution des capteurs. En créant des structures au niveau microscopique, de très petits capteurs peuvent être créés, permettant ainsi une résolution du capteur très élevé le tout dans un encombrement très réduit.

Parmi les récentes recherches, un film de nanoparticules par Ravi Saraf F. et Vivek Maheshwari à l'Université du Nebraska a été créé de seulement 100 nm d'épaisseur. Le film n'a pas la même robustesse, flexibilité, ou la capacité de détecter la température de la peau humaine, mais est un grand pas en avant dans la résolution spatiale. Le capteur a une résolution d'environ 40 micromètres suffisamment élevée pour sentir des cellules individuelles. Ce capteur pourrait un jour être utilisé par des chirurgiens pour aider à trouver des tumeurs pendant les interventions chirurgicales.

Il y a maintenant quelques années, une peau électronique composée de transistors en caoutchouc et organiques sensible à la pression a été développée par le chercheur japonais Takao Someya et son équipe. Ces capteurs sont ensuite plongés dans un film plastique mince pour créer une matrice, comme le montre la Figure 1.6. Cette peau artificielle pourrait également être utilisée pour les prothèses, mais les capteurs ont encore besoin d' amélioration pour être en mesure de détecter des faibles pressions que la peau humaine peut détecter.

Figure 1.6 E-skin par Takao Someya Group

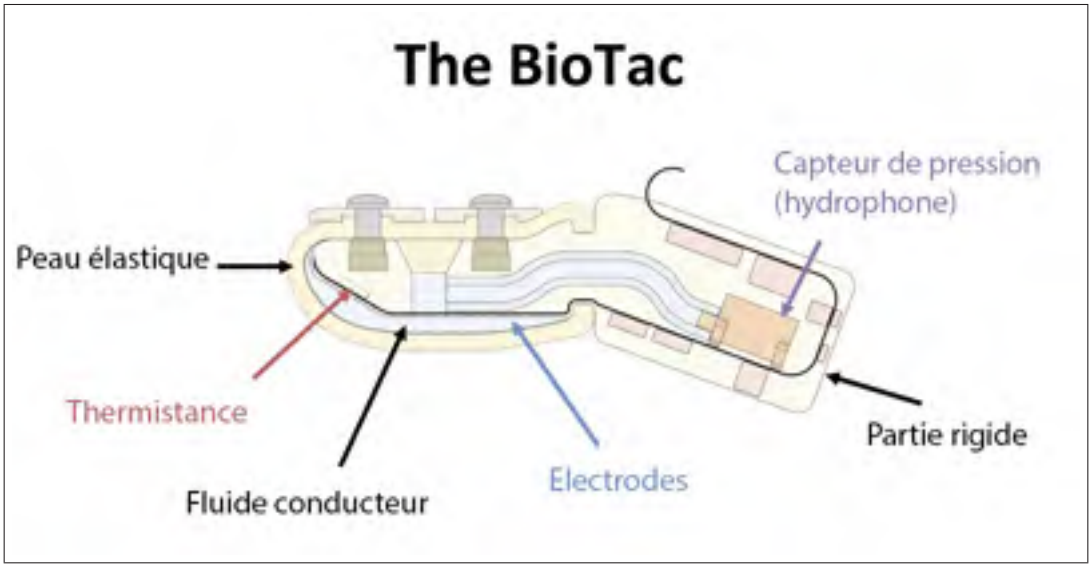


Figure 1.7 Schéma du capteur BioTac®

Avec les évolutions de ces dernières années, les lacunes des capteurs tactiles ont été rendues plus apparentes. Ceci a permis de développer des capteurs plus complets. Dans les capteurs multimodales (combinant pression et vibration) il existe à ce jour peu de capteurs. SynTouch a

développé un réseau de capteurs en forme de doigt BioTac® , comme présenté sur la figure 1.7 qui fournit des informations simultanées sur les forces de contact, microvibrations et des flux thermiques, imitant les capacités sensorielles cutanées complètes du doigt humain. Le capteur mesure la pression par le biais de la mesure d'impédance entre deux électrodes dans lequel un fluide semi-conducteur entre les deux couches est disposé. Le même fluide semi-conducteur est utilisé pour la détection dynamique qui est obtenue avec un capteur de pression hydrophones qui détecte les vibrations transmises par le fluide. Des thermistances sont placées à certains endroits pour mesurer la température à la surface du doigt. Le capteur est un des plus complets mais sa fabrication et ses réglages restent toutefois assez complexes.

1.3 Comparaison croisée des technologies

Pour notre application, notre capteur requiert une précision élevée, une bonne sensibilité et une stabilité importante. En comparant toutes ces technologies de capteurs, il semble que la technologie capacitive offre une plus grande stabilité que les autres technologies. Ils sont également plus faciles à calibrer et moins sensibles à l'usure que les capteurs résistifs, qui souffrent au fur et mesurer du temps comme récapituler dans le tableau 1.3. La complexité de design des capteurs optique et ultrason ne nous permettent pas d'obtenir un capteur suffisamment compact pour notre application. Les capteurs magnétiques proposent beaucoup d'avantages néanmoins ils ne fonctionnent que dans un environnement contenant peu de champ magnétique hors dans le domaine de la robotique on retrouve souvent de nombreux moteurs électriques et autres actuateurs qui serait susceptibles de perturber le capteur. Enfin, la technologie piézoélectrique ne permet de détecter que des événements dynamiques (vibration, glissement).

1.4 Les caractéristiques du capteur idéal

La main de l'homme dispose d'une large gamme de capteurs qui prennent en charge plusieurs formes différentes de contact . Bien qu'il serait souhaitable de créer un dispositif robotique avec des capacités de détection similaire, en particulier pour des applications médicales les recherches peinent à développer un capteur avec des capacités comparable à celle de l'humain.

Tableau 1.3 Comparaison des technologies

Technologies	**Avantages**	**Inconvénients**
Piézorésistive	• prix ; • faible bruit ; • électronique simple ; • bonne sensibilité.	• drift ; • hystérésis ; • sensibilité à la température ; • réponse non linéaire.
Piézoélectrique	• sensibilité dynamique ; • large bande passante.	• détection dynamique seulement ; • sensibilité à la température.
Magnétique	• haute sensibilité ; • robuste.	• sensibilité aux perturbations magnétique ; • sonsommation électrique ; • sncombrement important ; • sstimation complexe.
Optique	• sensibilité • immunité aux perturbations électromagnétiques ; • flexibilité mécanique ; • rapide.	• volumineux ; • complexité de mise en œuvre ; • consommation.
Ultrason	• bonne réponse dynamique ; • bonne résolution statique.	• électronique complexe ; • fréquence d'utilisation limitée ; • sensibilité à la température.
Capacitive	• disponibilité de la technologie dans des CI ; • sensibilité ; • faible coût ; • plage dynamique.	• interférence ; • électronique complexe ; • sensibilité à la température ; • résolution limitée.

Les premiers critères de conception des capteurs tactiles ont été proposés par Harmon (1984) et ont été motivés par les exigences de conception des robots industriels des années 1980 . Etant donné le progrès des technologies, les critères aussi ont changé. Un objectif clé pour les

nouvelles attentes est la capacité d'imiter l'homme. Pour atteindre cet objectif , Yousef *et al.* (2011) a proposé la liste des exigences suivante :

- détection des contacts et la libération d' un objet ;
- levage et le remplacement d'un objet ;
- la détection de la forme et de la distribution de la force pour la reconnaissance d'objets ;
- détection des forces dynamiques et statiques ;
- suivi des points de contact lors de la manipulation ;
- estimation et détection des forces de préhension pour la manipulation ;
- la détection de mouvement et la direction lors de la manipulation ;
- la détection des forces tangentielles pour empêcher le glissement.

En commençant par les caractéristiques souhaitables pour la manipulation d'objet, un ensemble de directives générales de conception pour les capteurs tactiles a été présenté par Dahiya *et al.* (2010) en prenant en compte également les limitations et les possibilités des capteurs . Les lignes directrices proposées , présentées dans le tableau 1.4 , sont inspirées des capacités de détection de la main humaine.

Tableau 1.4 Recommandations pour les capteurs tactiles

Paramètre	**Recommandation**
Direction de la force	Normal et tangentielle
Type	Statique et dynamique
Résolution spatiale	1mm dans les doigts et 5mm dans la paume
Temps de réponse	1ms
Sensibilité	0.01N à 10N
Linéarité	Stable
Hystérésis	Faible
Robustesse	Résistant à l'environnement terrestre
Bouclier	Electronique ou magnétique
Intégration	Intégration simple avec faible consommation énergétique
Coût	Faible

En comparaison avec un doigt humain, le capteur tactile exigerait d'avoir une résolution spatiale de l'ordre de 1 à 2 mm. Bien évidemment plus la résolution spatiale sera grande et plus notre capteur sera performant. La force sensitive ainsi que la plage dynamique sont des paramètres plus compliqués. Si l'analogie est jugée appropriée, une plage de sensibilité de 0,01 à 10 N pour le capteur tactile est nécessaire et une gamme dynamique de 1 à 1000Hz est considérée comme très satisfaisante. En résumé, le capteur doit démontrer une haute sensibilité et une large gamme dynamique. Concernant l'hystérésis, il doit être le plus faible possible, la sortie du capteur doit être stable monotone et reproductible.

La complexité d'un système de traitement de données couplé avec un capteur tactile et la mise à jour de toutes les informations provenant du capteur nécessite le meilleur temps de réponse possible. La réponse en fréquence du transducteur tactile doit être faible par rapport au temps de contrôle du cycle. En outre, chaque élément doit avoir un temps de réponse de l'ordre de 1 ms. Enfin, la robustesse du capteur est importante, il doit être capable de résister à un environnement difficile et ne doit pas être affecté par son milieu (champs magnétiques, température, humidité...). Un aspect important de détection tactile artificiel est le procédé de conversion et de transmission du signal du capteur. Comme vu précédemment la peau humaine est capable de répondre à des sensations, telles que les vibrations, une forme, pression, température et humidité. Sur la base de ces caractéristiques, différents systèmes d'affichage tactiles peuvent être envisagés pour produire ces sensations physiques. Enfin, le capteur ne doit pas se briser et devrait avoir une usure minimale avec le temps.

C'est avec toutes ces considérations que nous avons choisit d'utiliser la technologie capacitive pour développer notre capteur.

CHAPITRE 2

CAPTEUR TACTILE POUR LA ROBOTIQUE

2.1 Introduction

Dans de nombreuses situations de la vie courante, il est primordial de connaitre la répartition de pression ou force sur une surface définie.

Avec le développement de la robotisation importante de l'industrie, la recherche sur le sens du toucher suscite depuis maintenant plusieurs années un intérêt grandissant. Alors que la vision par ordinateur est souvent utilisée pour reconnaître la forme de l'objet, sa position et son orientation, la détection tactile est une capacité essentielle pour un robot pour manipuler un objet.

Que ce soit dans l'interaction entre un humain et un robot ou avec son environnement, une caractéristique essentielle des mains artificielles est la capacité de saisir et manipuler des objets sans les laisser tomber ou de les déformer. Saisir un objet fragile de forme irrégulière, par exemple une ampoule , avec les mains robotiques, devient extrêmement difficile, en raison de l'absence de rétroaction tactile. Il est courant que la force appliquée soit trop faible ou trop forte, ce qui entraîne le glissement ou la déformation mécanique de l'objet.

Ce chapitre à pour but de présenté le développement d'un capteur tactile capable de mesurer à la fois la répartition des forces à sa surface et de détecter des évènements tactiles dynamique tel qu'un glissement. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité des travaux de recherches sur les capteurs tactiles effectué à École de technologie supérieure par Axaykumar Rana.

2.2 Capteur statique

2.2.1 Principe général

Notre capteur a été développé avec la technologie capacitive. Ce choix a été fait, car comme nous l'avons vu précédemment, cette technologie offre le meilleur compromis en termes d'étendue de mesure, de résolution, de précision, de rapidité et de flexibilité dans le design. De plus il est possible de détecter à la fois des forces statiques et des événements dynamique en utilisant le même principe de transduction. La plupart des capteurs tactiles existant sur le marché sont bien souvent des capteurs statiques restituant une image de la force exercée sur le capteur. Dépendamment de leur gamme de fonctionnements, ils sont capables de mesurer des forces allant de quelques Newtons jusqu'à plusieurs centaines de Newtons. La technologie capaci-

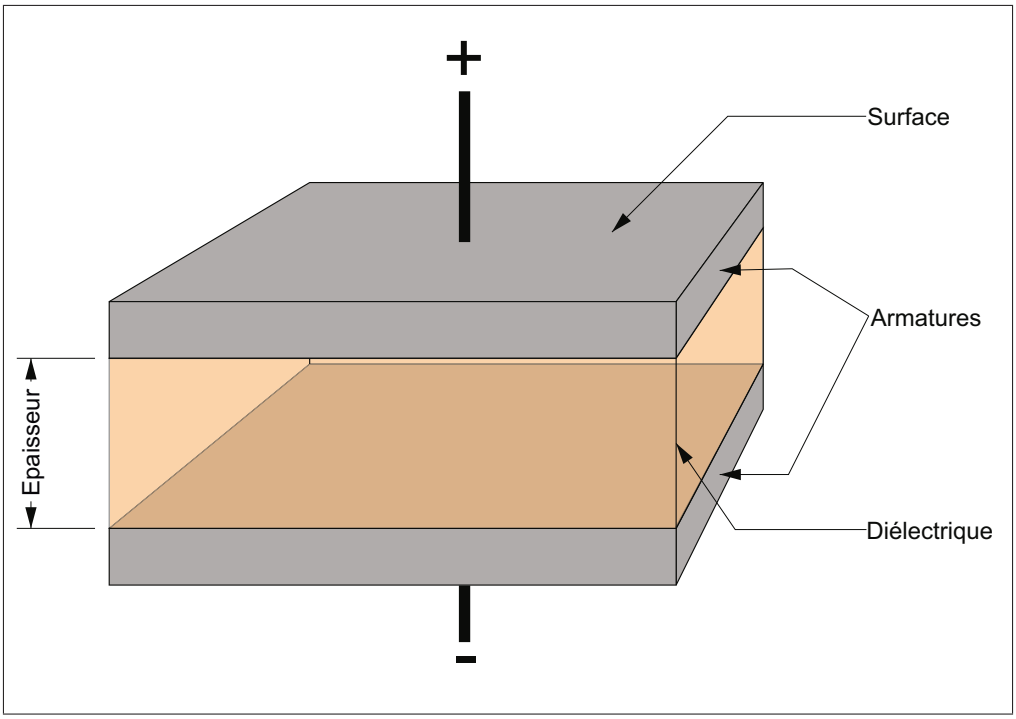


Figure 2.1 condensateur plan

tive est une des plus rependues. Les capteurs capacitifs utilisent les propriétés électriques de la capacitance dans le but de déterminer la force appliquée.

Supposons qu'il y ait un objet conducteur possédant une charge non compensée Q. Cette charge crée un champ électrique statique autour de l' objet. Le potentiel V est linéairement proportionnel à la charge Q :

$$V = \frac{Q}{C}$$

La capacité C est le coefficient qui relie V le potentiel de l'objet avec sa charge Q. Ce coefficient dépend uniquement des dimensions géométriques du conducteur . Si l'objet conducteur est recouvert d'un diélectrique, la capacité dépendra des caractéristiques du diélectrique et de la géométrie.

Pour un condensateur plan parallèle voir figure 2.1, on peut calculer sa capacitance en utilisant l'équation :

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{S}{D}$$

Avec S la surface en mm^2, D la distance en mm, ε_0 permittivité diélectrique du vide (8,854187817.10-12 F/ m) et ε_r la permittivité diélectrique du matériau.
La force appliquée sur le capteur dépend seulement de la distance entre les deux armatures et du matériau choisit entre les deux armatures.

La capacité peut être facilement calculée de façon analytique uniquement pour les systèmes d'électrodes simples tel qu'une plaque, sphère ou condensateurs cylindriques . Pour les électrodes plus complexes , le calcul de la capacité du système est plus complexes mais peut être trouvé en résolvant des équations au dérivés partielles.

2.2.2 Résolution et densité spatiale

On différencie la résolution du capteur qui va être la plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur à la résolution spatiale ou densité spatiale qui correspond au nombre de points contenu pour une longueur donnée.

La résolution spatiale est un point clé pour la reconnaissance de forme, plus la résolution spatiale est grande plus on sera capable de détecter les formes et les contours d'un objet. Par

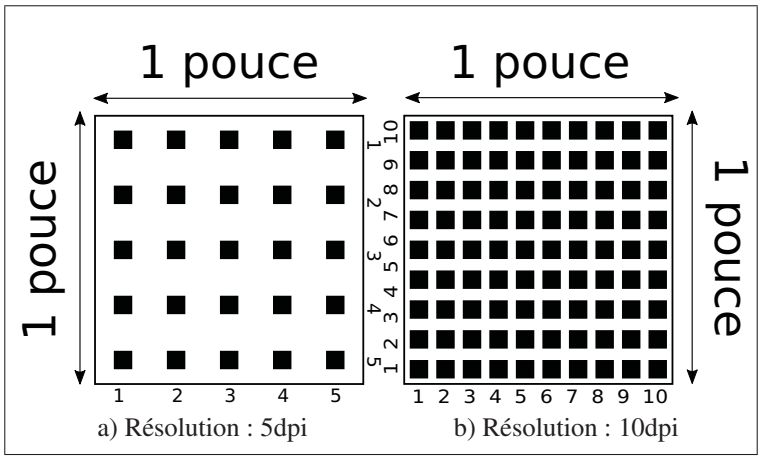


Figure 2.2 Exemple de résolution

analogie avec l'oeil humain, la plupart des images que nous voyons sur les écrans ou dans les magazines sont composées de petits points noirs ou colorés. La confusion des points par l'oeil humain permet de donner l'illusion de courbes et lignes continues. Ceci est possible grâce à la résolution limitée de l'oeil humain.

Par définition, la résolution spatiale d'un capteur est le nombre de points contenu pour une longueur donnée. Elle est le plus souvent exprimée en points par pouce (DPI en anglais pour Dots Per Inch) en informatique. Plus le nombre de pixels est élevé, plus la quantité d'informations qui décrit l'image est importante et plus la résolution est élevée comme on peut le voir sur la figure 2.2 Dans le domaine du toucher artificiel les points de détection sont généralement appelés tactel, taxcel, taxel ou Sensel par analogie à un pixel tactile. Chaque Taxel est un point constituant notre image tactile.

Dans des applications comme la saisie d'objet, la répartition des forces sur l'objet est cruciale. La résolution de chaque taxel va permettre d'estimer l'amplitude des forces appliquées sur le capteur. Le capteur développé est constitué d'une matrice de 4 par 7 électrodes soit un total de

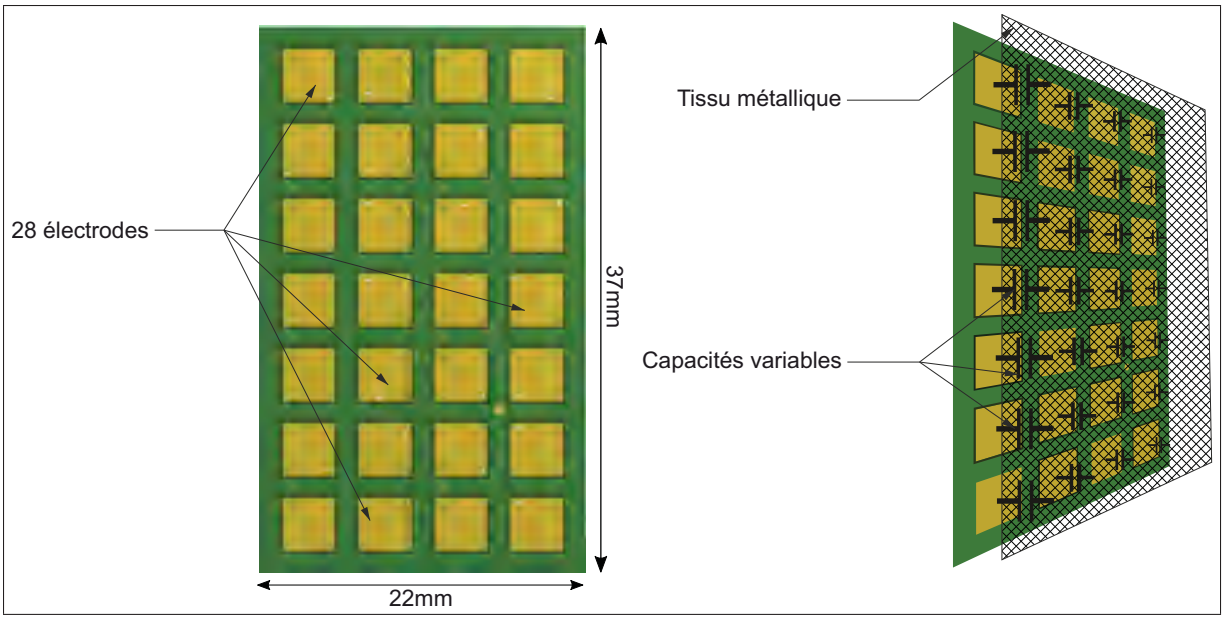


Figure 2.3 PCB coté électrode

28 taxels de 13 mm^2 couvrant une aire total de 814 mm^2 le tout donnant une résolution spatiale d'environ 4.7 dpi (voir figure 2.3).

Chaque taxel peut être représenter par un condensateur variable fonction de la force appliquée sur celui-ci. L'utilisation d'un diélectrique avec un tissu conducteur placé au-dessus permet de former des condensateurs pour chaque taxels.

2.2.3 Design du diélectrique

Le diélectrique va jouer un rôle très important pour obtenir un capteur avec une bonne sensibilité.

Comme présenté au début de ce chapitre, nous avons vu que la capacité dépend de la perméabilité du diélectrique situé entre les deux armatures du capteur. Dans le passé, Rana *et al.* (2016) avaient mis au point une structure en double cône permettant à la fois de détecter de très faible pression ainsi que des forces plus importantes. Les petits cônes aux extrémités sont très faciles à déformer, sous l'action d'une petite pression ils vont faire augmenter rapidement la variation

de la distance en les deux armatures. Cet effet sera presque nul pour pour des forces de plus grosses amplitudes car les petits cônes atteindront rapidement le maximum de leur compressibilité. Ce seront alors les cônes plus gros qui à leur tour seront compressés pour faire varier la distance entre les deux armatures lorsqu'une force plus importance sera appliquée (2.4).

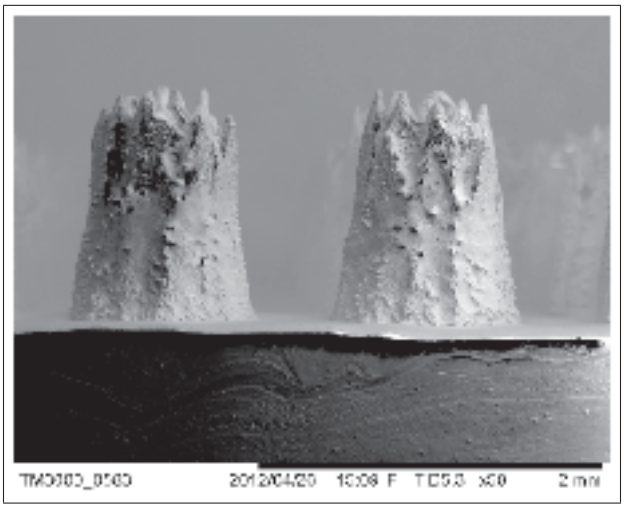


Figure 2.4 Micro structure par Rana *et al.* (2016)

Cette structure était faite en silicone puis déposée dans un moule et chauffée dans un incubateur. Pour augmenter la valeur de la capacité, le silicone était dopé aux nanoparticules $BaTiO_3$ ce qui avait pour but d'accroître la perméabilité du diélectrique et donc d'augmenter la capacitance de chaque taxel. Le procédé de fabrication du silicone dopé aux nanoparticules est long et complexe. Dans une optique de commercialisation du capteur, il est nécessaire de faciliter la conception du diélectrique.

Pour notre version du diélectrique, nous avons jugé non nécessaire l'utilisation d'une double structure en cône. En effet, pour la prise d'objet, le deuxième étage de la structure ne va pas réellement apporter d'informations pertinentes étant donné qu'il va être très vite comprimés. Le procédé de fabrication à été largement facilité ne nécessitant que deux étapes. Les cônes de la structure sont directement gravés à l'aide d'une découpeuse laser co2 de chez Trotec® à partir d'une feuille de Polyuréthane vierge (2.5).

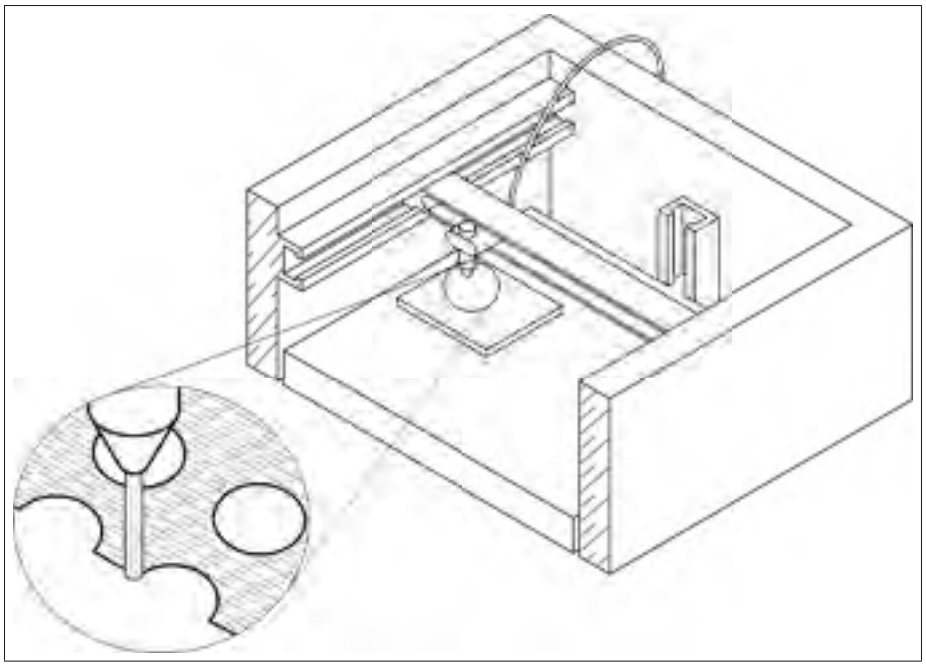


Figure 2.5 Procédé de fabrication

Une fois gravé, le Polyuréthane s'avère être collant entre les cônes c'est pourquoi il est nécessaire de laisser sécher le diélectrique quelques heures avant de l'utiliser. Le résultat est montré sur la figure 2.6, la hauteur moyenne des cônes est d'environ 400um.

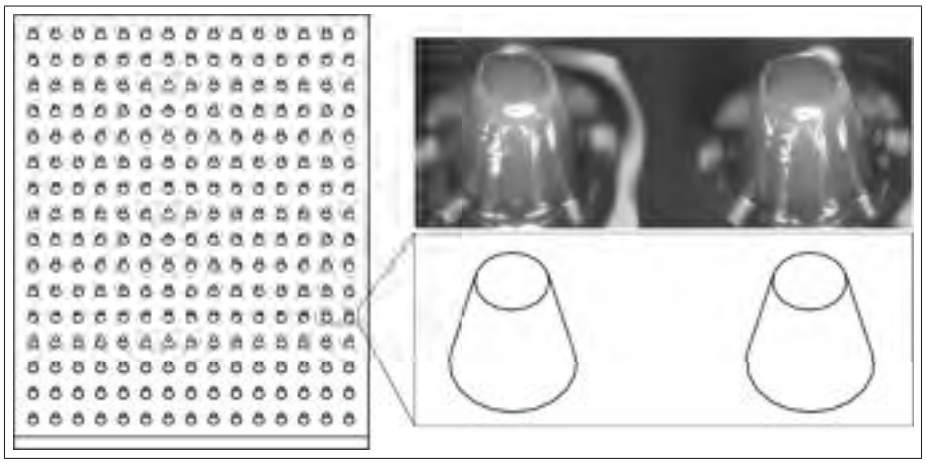


Figure 2.6 Cône du diélectrique

2.2.4 Principe d'estimation des capacités

Comme nous l'avons vu, la distance entre les armatures de chaque taxel est l'image de la force appliquée sur celui-ci. Pour mesurer la capacité de nos 28 taxels, tous les taxels sont reliés à un système sur puce (System On Chip) PSoC® 5 de Cypress Semiconductor. La grande force de ce microcontrôleur réside dans son algorithme de mesure de capacitance. En effet, Cypress à développé un module CSD (CapSense® Sigma Delta) permettant de mesurer la capacité d'un Taxel en fournissant une donné en haute sensibilité et immunisé contre les perturbations externes.

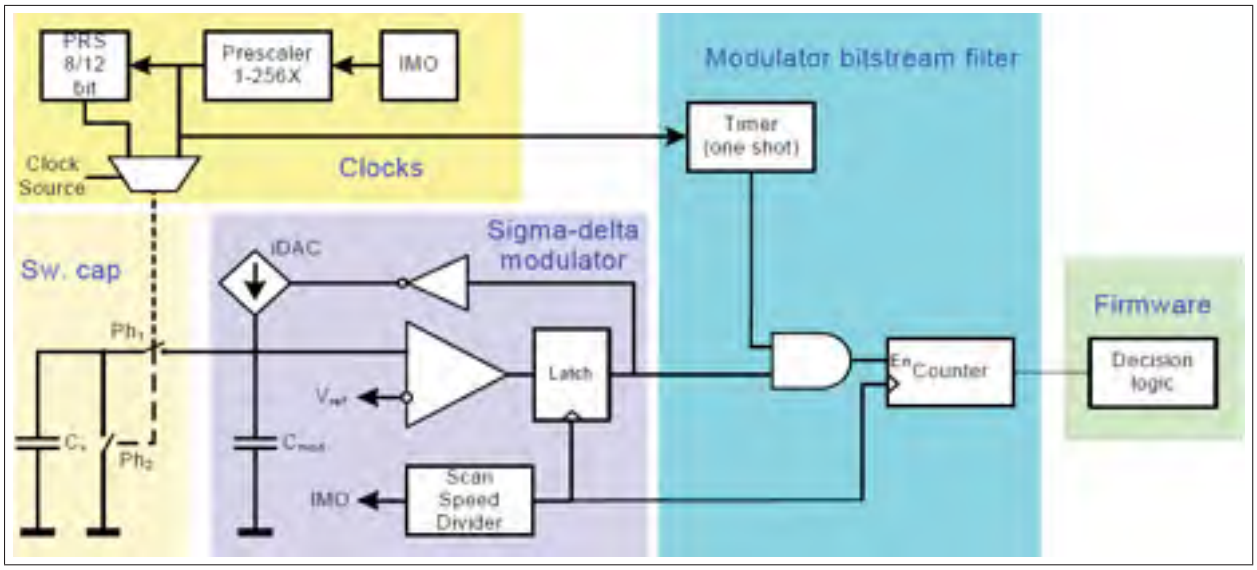


Figure 2.7 Schéma du Capsense Sigma Delta

Les commutateurs Sw1 et Sw2 sont complémentaires : si un interrupteur est ouvert alors l'autre est fermé. La capacité à mesurer est chargée avec la phase Ph1 et déchargée avec la phase Ph2. On peut remplacer la capacité à mesurer par une résistance équivalente Rc

$$R_c = \frac{1}{F_s C_s}$$

Où F_s est la fréquence de switch des commutateurs.

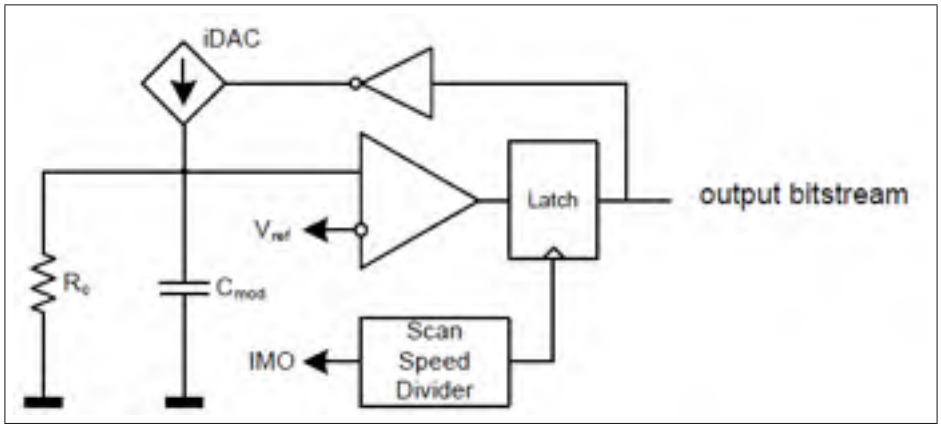


Figure 2.8 Équivalence de la capacité à mesurer

Le courant venant de la capacité à mesurer peut être évalué avec

$$I_c = C_s F_s V_C mod$$

sachant que la moyenne du courant iDac

$$iDac = dmod \times I$$

avec dmod etant le cycle de charge provenant de la sortie du modulateur. Si l'on prend $I_c = iDac$ on obtient

$$dmod = \frac{C_s F_s V ref}{iDac}$$

On peut calculer la valeur de la capacitance maximale que l'on pourra mesurer dans le cas ou dmod=1 avec :

$$Cmax = \frac{iDac}{V ref * F_s}$$

Pour notre application on prendra les valeurs Vref=1.5V, iDac=32uA et Fs=6Mhz on obtient un Cmax de 3.7pF.

2.2.5 Caractéristique de la partie statique

Passons maintenant à la caractérisation de notre partie statique. Pour cela nous utilisons un banc de mesure composé d'une jauge de force Mark-10 modèle M4-10 capable de mesurer des forces allant de 0 à 50N. Nous avons aussi à disposition un Mitutoyo modèle ID S112T permettant de mesurer un déplacement jusqu'à 12mm avec une précision de l'ordre du 1 pm.

Le capteur est monté sur une base stable. Les normes prédéfinies indiquent qu'un appareil tactile devrait avoir une gamme de détection de force de 0.01-50N . En conséquence , nous avons exercé des forces sur le taxels allant de 0,02 N à 50N. Pour voir l'influence de la température sur nos valeurs mesurées nous utilisons un incubateur Quincy Lab modèle 10-140 avec une gamme de fonctionnement comprise entre la température ambiante $+2°C$ à $60°C$.

Pour acquisitionner les données de la jauge de force et du capteur tactile nous utilisons deux liaisons séries USB-UART. Un programme Matlab® se charge de réceptionner, traiter et sauvegarder les données.

La figure 2.9 représente la réponse d'un taxel en fonction de la force appliquée sur celui-ci. Comme attendu la réponse peut être séparée en deux parties linéaires. La première partie entre 0 et 5N correspond à la compression des cônes lorsqu'ils sont soumis à une force. La deuxième partie correspond à la réponse lorsque les cônes sont compressés au maximum et qu'il n'y a plus d'air dans le diélectrique. Les deux parties sont bien conformes à nos attentes, en effet le nombre de comptes en sortie du CDC (représentant l'image de la capacitance) est bien proportionnel à la distance entre les deux armatures (représenté par la force appliquée).

Comme nous l'avons vu le diélectrique designé nous permet de mesurer des forces allant jusqu'à 50N sur une surface de seulement $12mm^2$, en revanche le matériau utilisé va créer un hystérésis en raison de son comportement viscoélastique lors de la compression et la décompression (figure 2.10). Lors d'une compression, le polyuréthane va mettre un certain temps à se déformer, cela va engendrer une petite réduction de la force qu'elle oppose. Lors du relâ-

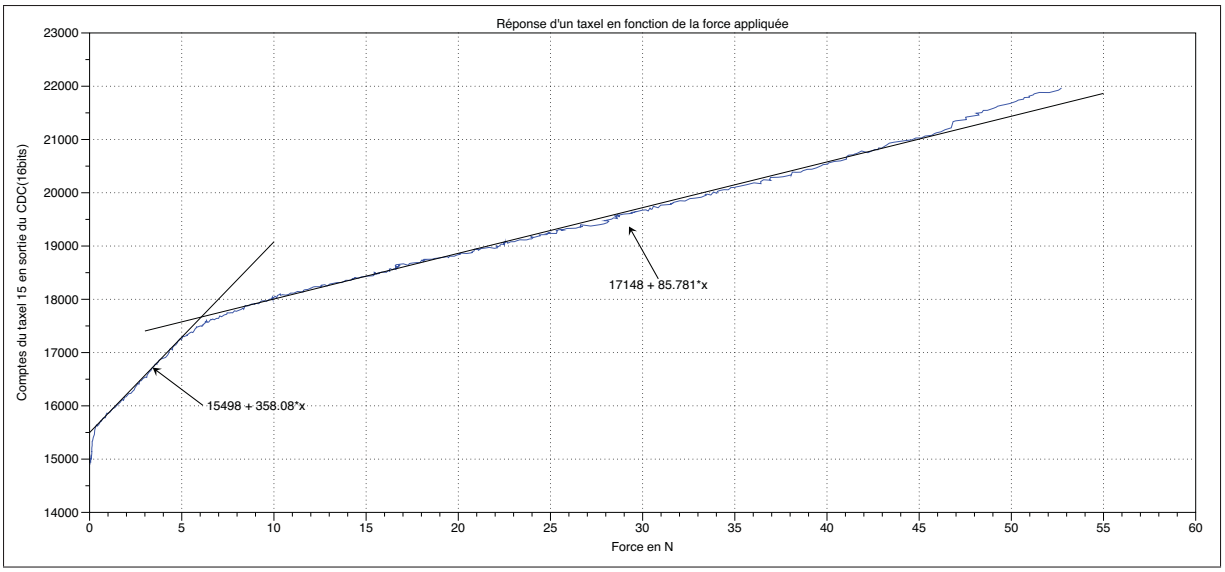


Figure 2.9 Caractéristique de la partie statique

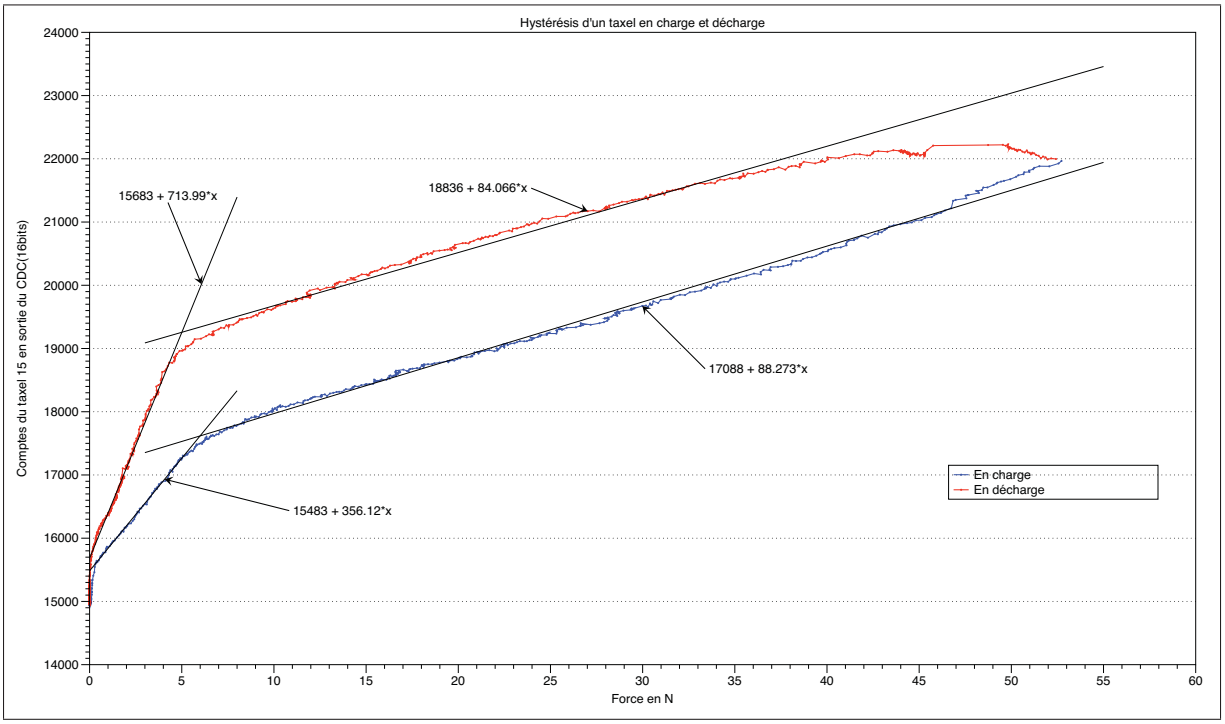


Figure 2.10 Hystérésis

chement en décompression, le diélectrique peut mettre plusieurs secondes à retrouver sa forme initiale.

Comme définit au premier chapitre, un capteur idéal devrait avoir un rapport signal bruit (SNR) très élevé. Pour notre capteur nous avons relevé la sortie du CDC pour différentes pressions afin de montrer que la force exercée sur le capteur n'influence pas le bruit interne du capteur. Comme on le voit sur la figure 2.11 la moyenne du bruit a à peu près la même forme. Que l'on soit à 0N, 15N ou 45N la moyenne du bruit représente un peu moins de 100 comptes soit environs 1% de la valeur final mesurée.

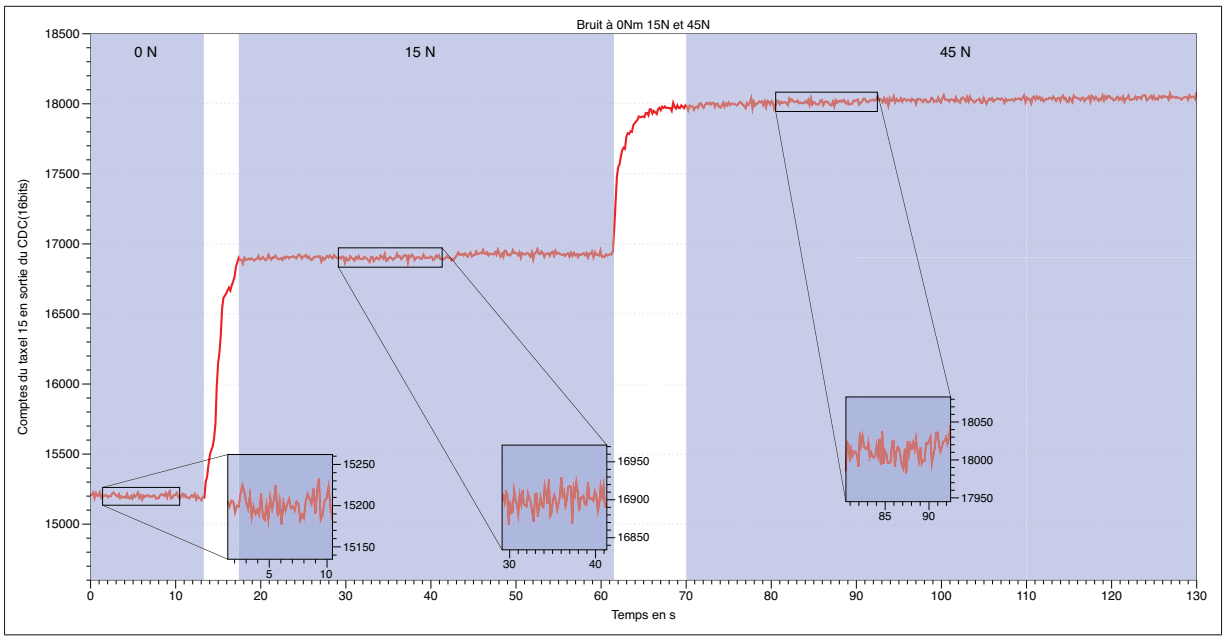


Figure 2.11 Bruit du capteur

Un des désavantages de la technologie capacitive est sa sensibilité à la température, pour vérifier cela nous avons placé le capteur dans un incubateur partant de la température ambiante jusqu'à 60°C. Le résultat figure 2.10 montre bien l'influence de la température sur le sortie du CDC que ce soit en montée et en descente de température. Le nombre de comptes peut augmenter jusqu'à +600 comptes entre 24°C et 60°C. Malgré cela, la réponse statique du capteur n'a quant à elle pas changé, la température décale (offset) juste la valeur de sortie des taxels. Dépendamment de l'application, ce drift n'a pas de réelles conséquences puisque la variation

de la sortie de chaque taxel reste pareille, seule la valeur de référence correspondant à la valeur initiale à 0N aura changé.

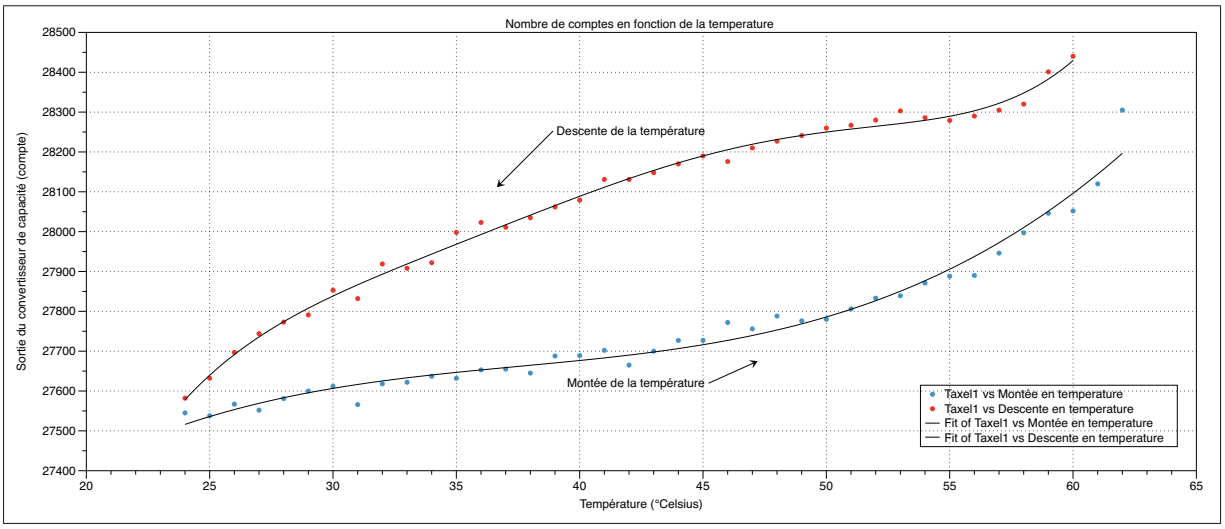


Figure 2.12 Drift en fonction de la température

Une interface graphique a été créée pour afficher les données du capteur. La matrice de donnée correspond à la disposition des 28 taxels sur le PCB. Un filtre bi-cubique est appliqué sur chaque taxel et son voisinage pour générer un maillage lisse des données reproduisant la répartition des forces sur le capteur comme par exemple la figure représentant .

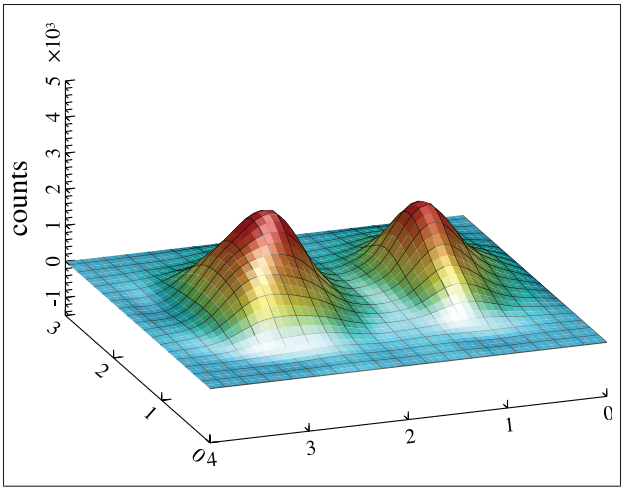


Figure 2.13 Exemple de l'interface avec 2 doigts sur le capteur

2.2.6 Étalonnage

Il est possible d'estimer la force appliquée sur notre capteur grâce au nombre de comptes de chaque Taxel mais pour cela il faut étalonner le capteur. L'option la plus simple serait de faire plusieurs mesures du capteur pour différentes forces et de faire la moyenne pour estimer la force. Étant donné que chaque taxel à une réponse différente (voir annexe I-1), si l'on veut estimer la force de façon rigoureuse la meilleure façon est de récupérer la caractéristique de chaque taxel , calculer le polynôme de sa courbe pour enfin estimer la force appliquer sur le capteur. La précision de l'estimation va dépendre de notre polynôme. Plus la courbe du polynôme est fidèle à notre courbe réelle, plus l'estimation de la force sera bonne. Dans notre cas nous prendrons un polynôme de troisième degré sous la forme :

$$y = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4$$

Les coefficients p1, p2, p3 et p4 des 28 taxels sont donnés en annexe. L'estimation finale de la force sera donnée par

$$F_{totale} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(p1_i * x_i^3 + p2_i * x_i^2 + p3_i * x_i + p4_i)}{n}$$

avec F_{totale} étant la force totale appliqué sur le capteur, i le numéro du taxel, n le nombre total de taxel, p1,p2,p3,p4 les coefficients des équations cubiques de chaque taxel et x le nombre de comptes en sortie du CDC.

Remarque : cette calibration est correcte que dans le cas où l'on applique une force sur l'ensemble du capteur et non sur des taxels séparément.

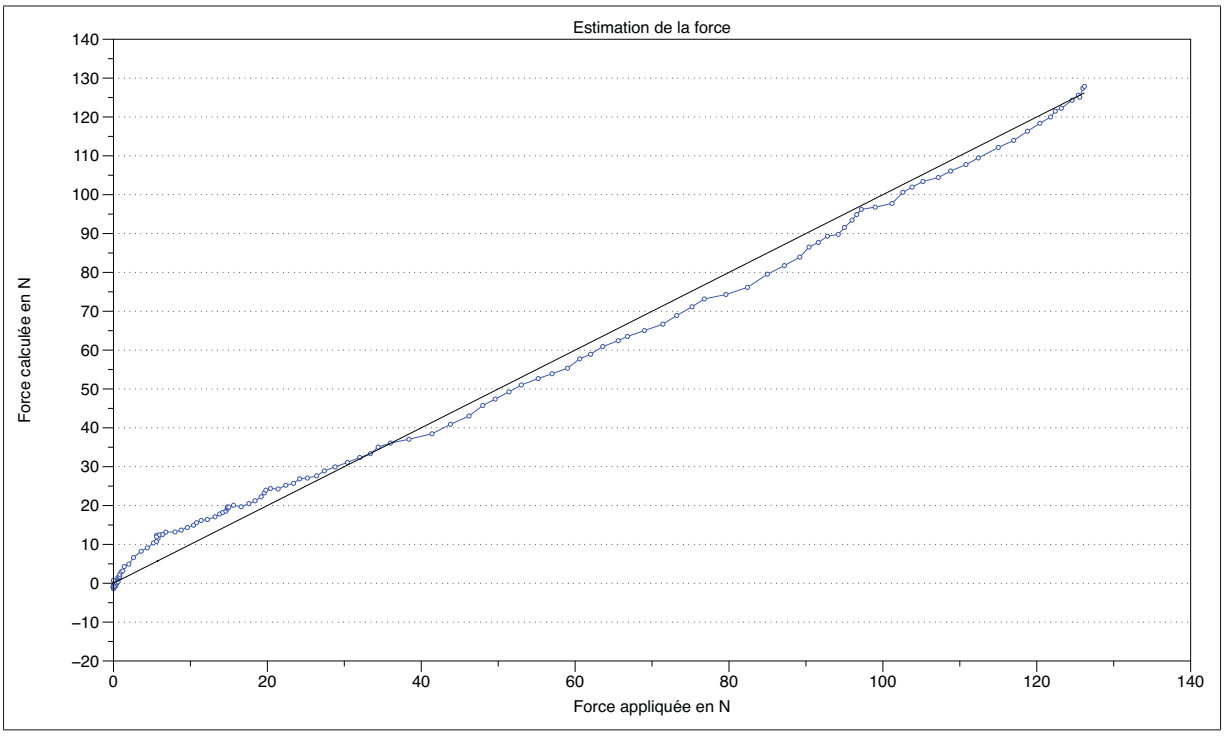


Figure 2.14 Estimation de la force

L'estimation de la force totale appliquée sur notre capteur est plutôt correcte si l'on compare les deux courbes de la figure 2.14 avec une erreur pouvant aller jusqu'à 300 pourcent. Plusieurs raisons à ces erreurs, premièrement l'approximation de la force sur chaque taxel engendre une une petite erreur qui va se répercuter lors de la sommation des forces. Si nous voulions être plus précis, il faudrait prendre un polynôme qui représente plus fidèlement notre courbe. Deuxièmement l'hystérésis due à la viscoélasticité du diélectrique et de la couche externe peut apporter une erreur dépendamment que l'on appuie ou relâche la force. Enfin, le bruit interne de chaque taxels rajoute une erreur dans notre estimation. Même si l'estimation est passablement correcte

on peut conclure que le capteur n'est peut-être pas le plus approprié pour des applications de mesure de forces nécessitant une grande précision. En revanche grâce à sa résoltuion spatiale d'environ 5mm il sera adapté pour des applications où l'on a plutôt besoin de connaitre la réparation des forces sur le capteur comme dans la saisie d'objet par exemple.

2.3 Capteur dynamique

2.3.1 Principe

Les avantages de la détection tactiles dynamiques ont été constaté dans la robotique, ainsi que dans la biologie, bien que les capteurs dynamiques restent une partie relativement petite de la littérature générale sur la détection tactile. La plupart des chercheurs ont négligé cette partie de détection généralement en raison de sa complexité de mis en oeuvre avec la partie statique.

D'une manière générale, la détection tactile dynamique comprend plusieurs catégories de capteurs qui sont soit destinés à détecter le mouvement ou le mouvement naissant (glissement), ou qui utilisent le mouvement du bout des doigts pour produire des résultats.

Nous avons vu dans le premier chapitre que la sensibilité de la partie dynamique doit correspondre à une bande passante d'environ 1000Hz permettant d'acquérir de faible glissement et vibration. Notre capteur doit suivre toutes les directives indiquées dans les exigences du premier chapitre. Dans notre conception la détection dynamique et statique sont toutes deux réalisées en utilisant un principe de transduction similaire, qui apporte l'avantage d'une plus grande souplesse de conception. Les éléments statique (TAXELS) et dynamique sont placés sur la même couche du PCB . Pour la partie dynamique, la surface de cuivre autour de chaque taxels statiques est utilisée. Nous retrouvons par-dessus notre couche diélectrique qui est la même pour les deux parties. Par dessus le tissu conducteur est placé pour créer un plan de masse comme le montre la figure 2.15.

Lorsqu'on va venir compresser le capteur, les charges accumulées entre les deux armatures (tissu conducteur et la surface de cuivre) vont se déplacer. Toute activité dynamique à la sur-

Figure 2.15 Différentes couches du capteur

face du capteur, tels que glissement d'un objet ou vibration vont provoquer un changement de capacité. À l'intérieur de notre structure, les charges sont accumulées dépendamment de la variation de distance Δ_d, le mouvement de charge accumulée génère un courant de l'ordre du nano-ampères au micro-ampères. . La variation de la capacité est donnée par l'équation :

$$\Delta_C = (\varepsilon_0 * \varepsilon_{r0} \frac{A}{d_0}) - (\varepsilon_0 * \varepsilon_{r1} \frac{A}{d_1})$$

Pour pouvoir mesurer ces variations de capacité, il va falloir dans un premier temps être capable d'obtenir un signal mesurable électriquement. Le but étant d'obtenir une tension qui est fonction du déplacement des charges entre nos deux armatures. Pour cela nous utilisons un amplificateur de charge appelé aussi convertisseur courant/tension ou amplificateur transimpedance comme présenté sur la figure 2.16

Une des premières choses que l'on apprend sur les amplificateurs opérationnels (AOP) est que le gain de l'amplification est très élevé. En connectant une résistance de contre réaction de

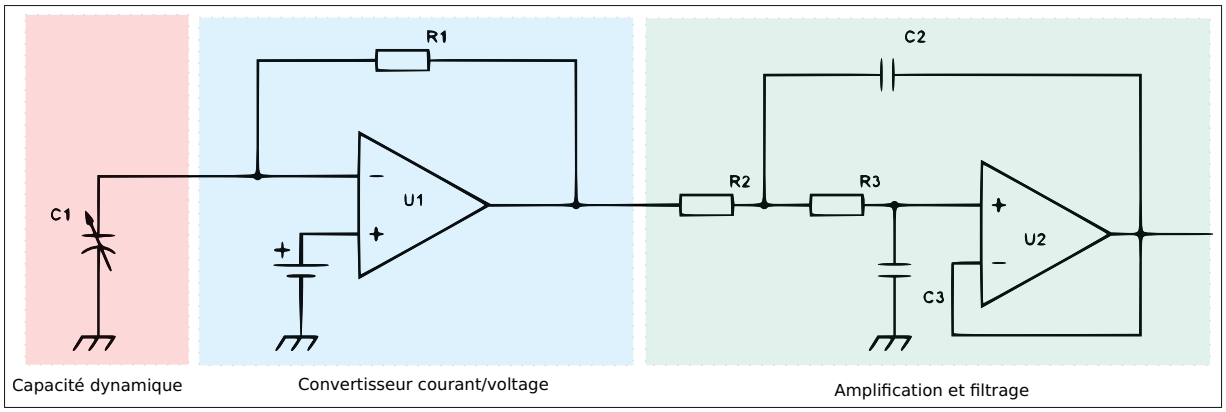


Figure 2.16 Montage amplificateur de charge

l'entrée négative vers la sortie de l'AOP, lorsqu'un faible courant traverse l'entrée négative, le gain est si élevé que la majorité du courant passe par la résistance .

Un tension de décalage (offset) est nécessaire pour polariser notre capacité. Généralement on prendra une valeur VCC/2 pour avoir une tension oscillant en 0V à VCC

L'étape suivante consiste à amplifier si nécessaire le signal et à filtrer le bruit et couper les hautes fréquences avant l'échantillonnage du signal. Etant donné que le dynamique coexiste avec les taxels statiques sur la même couche du PCB des fréquences susceptible de perturber nos mesures peuvent apparaitre c'est pourquoi il est impératif de filtrer le signal.

2.3.2 Intégration

Le schéma présenté a été modifié de sorte d'être implémenté dans le PSoC 5. En plus de disposer de CSD pour la partie statique, le PSoC dispose de plusieurs composant ou module hardware que l'on va pourvoir utiliser pour designer notre partie dynamique.

On retrouve un amplificateur trans-impédance (TIA) avec un gain paramétrable par l'utilisateur. Dans notre cas on choisit la plus grande valeur disponible (1MOhms) pour amplifier au maximum notre courant d'entrée. Le TIA à une tension de référence à 1.024V pour polariser le condensateur et avoir une compensation sur le signal. Étant donné que le PSoC est alimenté en

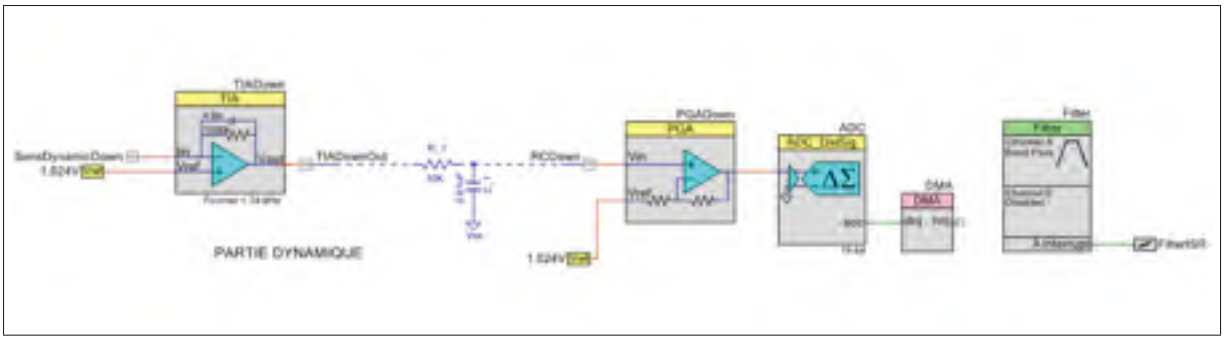


Figure 2.17 Schéma d'implémentation dans le PSoC

3.3V nous ne disposons pas une alimentation symétrique. Par conséquent , la solution optimale est de compenser le signal à $\frac{+VCC}{2}$ pour que le signal positif soit dans la plage de tension $\frac{+VCC}{2}$ à $+VCC$ et un signal négatif de$+0V$ à $\frac{+VCC}{2}$. La tension de sortie après l'étage amplificateur de charge est donnée par l'équation :

$$V_{OUT} = -(I_{IN} * R_F) + V_{OFFSET}$$

Après le TIA on retrouve un filtre passe-bas qui se trouve à l' extérieur de la puce car elle ne dispose pas de filtre analogique intégré. Les recherches ont montré que la plupart des activités dynamiques induisent des harmoniques qui sont généralement en dessous de 1000Hz c'est pourquoi la fréquence du filtre est choisit à 1000Hz. Le filtre va permettre de supprimer les hautes fréquences parasites avant l'échantillonnage. Par la suite le signal est amplifie avec un PGA (Programmable Gain Amplifier) qui possède une tension de référence de 1.024 pour garder le même OFFSET que précédemment. Enfin la sortie du PGA est relié à ADC (Analog to Digital Converter) Sigma Delta 16bits avec une fréquence d'échantillonnage de 2000Hz pour répondre au critère de Nyquist Shannon qui dit que : Fe $\geq$ 2*Fmax pour que notre signal ne subisse aucune dégradation.

Pour ne pas encombrer l'utilisation du processeur les valeurs acquisitionnées par l'ADC sont directement envoyées dans l'accès directe à la mémoire (DMA).

2.3.3 Caractéristique de la partie dynamique

Pour caractériser notre capteur dynamiquement nous avons testé le capteur en essayant de détecter les vibrations d'un actuateur (vibreur). Le signal dynamique en sortie correspond à une tension, en calculant la transformée de Fourier rapide (FFT) on est capable d'extraire le spectre fréquentiel du signal pour voir les différents pics de fréquence des vibrations appliquées au capteur comme par exemple la figure 2.18 qui représente la FFT du signal avec une fréquence de vibration à 125Hz.

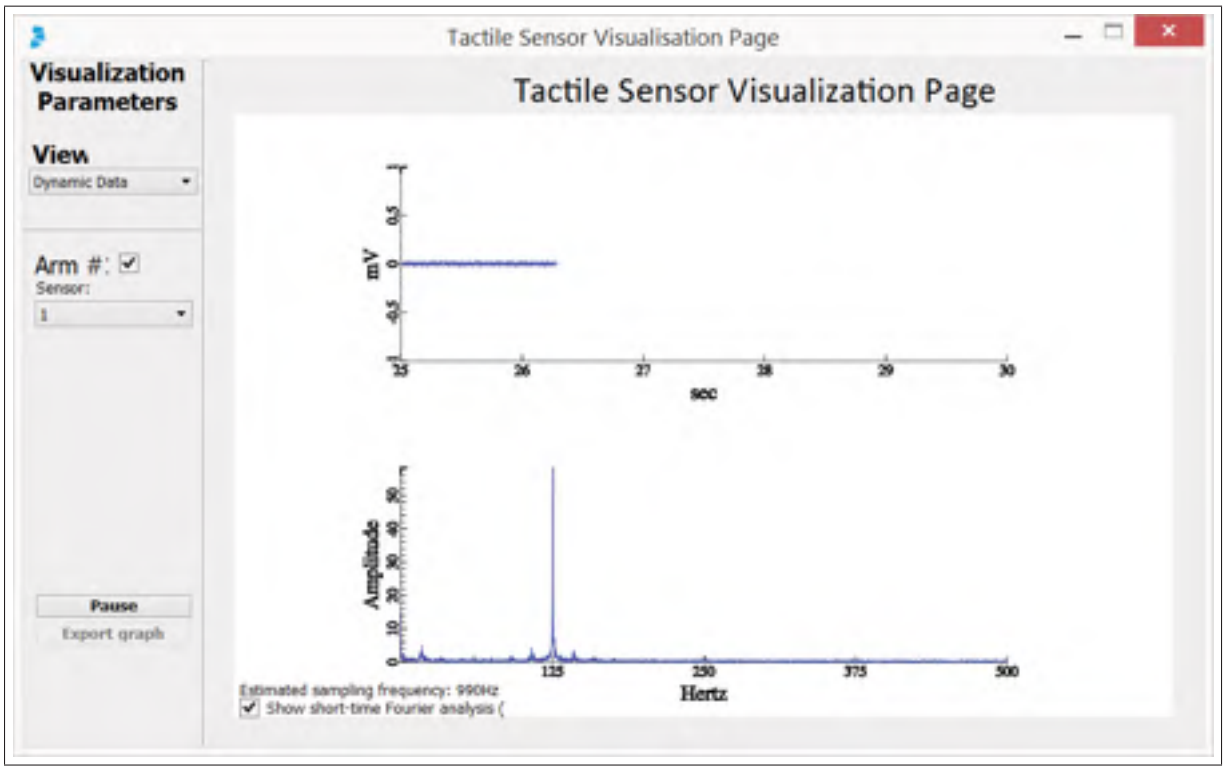


Figure 2.18 FFT du signal dynamique

Pour nos tests nous utilisons un vibreur appelé Haptuator commercialisé par Tactilelabs capable de vibrer à des fréquences entre 20 et 500Hz. A la différence des vibreurs classiques, notre actuateur délivre exactement la fréquence fournit par notre générateur basse fréquence.

Nous avons disposé notre capteur à plat sur le banc de test et posé le vibreur à sa surface. Une très légère force est appliquée sur le vibreur pour le tenir à la surface du capteur. Nous avons ensuite fait varier la fréquence du vibreur de 20Hz à 490Hz en récupérant la valeur de l'amplitude de la FFT pour tracé la courbe de réponse fréquentielle du capteur 2.19.

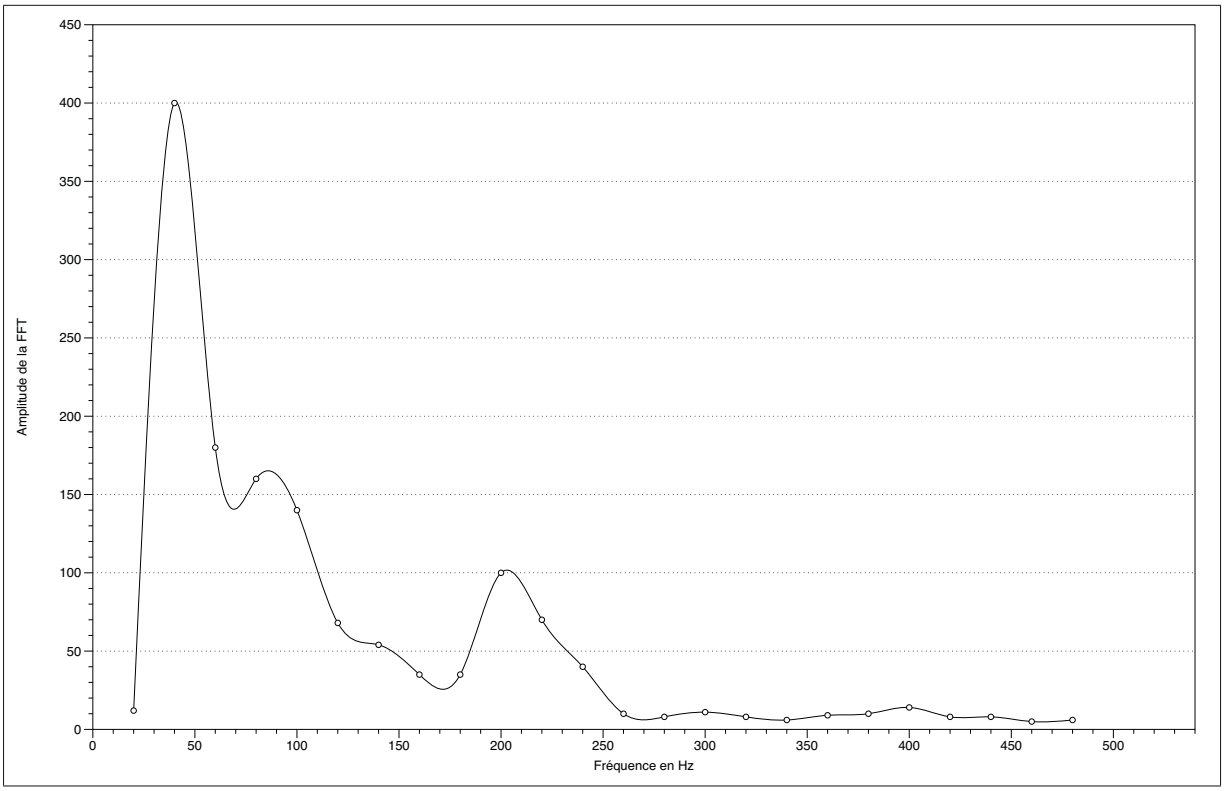


Figure 2.19 Réponse fréquentielle

Il est difficile d'admettre réellement que cette courbe est la réponse fréquentielle de notre capteur car la caractéristique du vibreur n'est pas la même pour toutes les fréquences. Le vibreur à lui aussi une fréquence de résonance se trouvant dans la même zone (environ 50Hz) c'est pourquoi il est difficile de savoir si c'est notre capteur qui amplifie le signal, ou si c'est la réponse du vibreur.

2.4 Optimisation du capteur

Au vu des résultats de la partie statique et dynamique notre capteur fonctionne correctement. Cependant notre capteur reste limité dans son fonctionnement. Premièrement en ce qui concerne la sensibilité de la partie statique, malgré l'ajout du diélectrique la variation de capacité des taxels n'est pas énorme. De plus, certaines zones à la surface du capteur ne réagissent pas de la même façon lors d'évènement statique ou dynamique c'est pourquoi l'amélioration de l'uniformité du capteur est cruciale. Nous avons constaté que pour différentes manipulations dynamiques dépendamment de l'orientation du capteur, la réponse n'était pas uniforme.

Pour augmenter la sensibilité, une des solutions est d'utiliser les effets de bords (frindge effect en anglais). Pour un condensateur typique qui se compose de deux objets conducteurs avec un diélectrique entre eux, une différence de tension appliquée entre ces armatures se traduit par un champ électrique entre eux. Ce champ électrique existe non seulement directement entre les objets conducteurs, mais il est aussi étendu à une certaine distance, ce qui est connu comme effet de champ ou effet de bord. Dans notre application les lignes de champ entre le taxel et le tissu conducteur sont déformées au voisinage du bord des armatures comme le montre la figure 2.20.

Cet effet est généralement sensible sur une zone dont la largeur est de l'ordre de grandeur de la distance entre les deux armatures. Dans notre cas la largeur de nos taxels est effectivement dans le même ordre de grandeur que la distance entre les deux armatures .

Bien que l'effet de bord pour des condensateurs à plaques est un phénomène établi, les formulations existantes donnent souvent lieu à des modèles mathématiques complexes dont il est difficile de déterminer la déviation de la plaque mobile pour une tension donnée. Les travaux de Hosseini (2007) par exemple présente une nouvelle formulation pour aborder les effets de bord, dans lequel l'effet des effets de bords est modélisé comme un condensateur série variable. De nombreuses formules différentes pour le calcul apparaissent dans la littérature, mais généralement la capacité avec effet de bord est donnée par la formule de Palmer comme mentionné

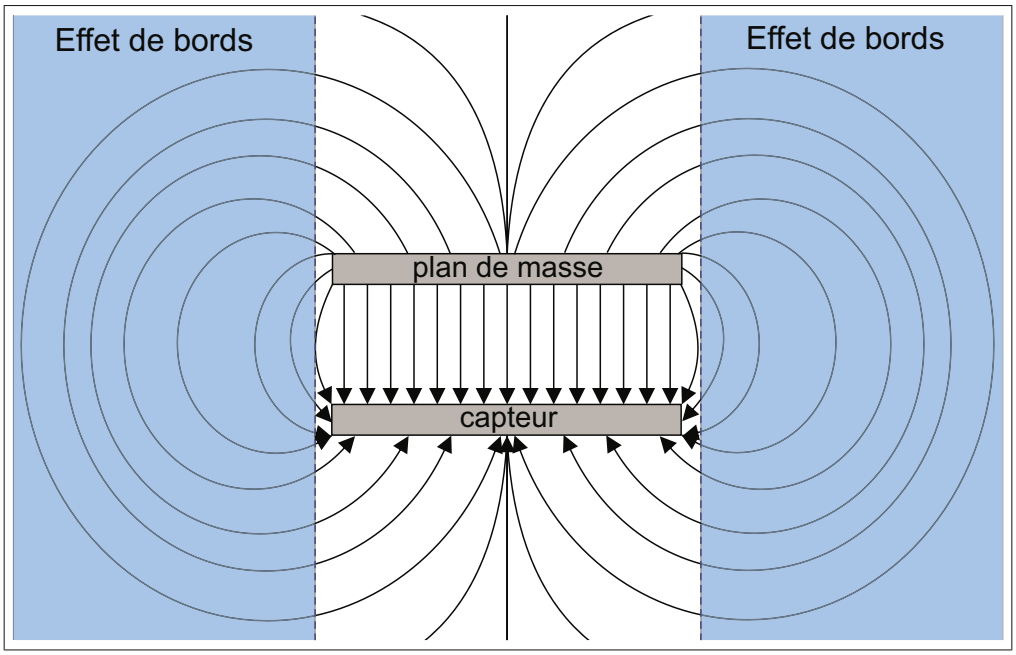


Figure 2.20 Effets de bords sur un condensateur plan

dans l'équation 2.1.

$$C_f = \varepsilon \frac{WL}{G}\left(1+\frac{G}{\pi W}(1+ln(\frac{2\pi L}{G}))\right)\left(1+\frac{G}{\pi L}(1+ln(\frac{2\pi L}{W}))\right) \tag{2.1}$$

avec,

L=Longueur de l'électrode

W=Largeur de l'électrode

G=Distance entre les deux armatures

Pour vérifier de façon expérimentale l'influence des effets de bords sur la valeur de la capacitance nous avons comparé deux design différents pour des forces de 0 à 70N avec le même diélectrique. Le premier design correspond a un simple rectangle de cuivre de 22mm par 37mm soit une aire de $814,04mm^2$, le deuxième design à pour but d'optimiser l'effet de bord en maximisant la longueur de l'électrode en utilisant une structure en forme de spirale comme le montre la figure 2.21 mais sa taille est la même que le rectangle de cuivre 22m par 37. En raison des

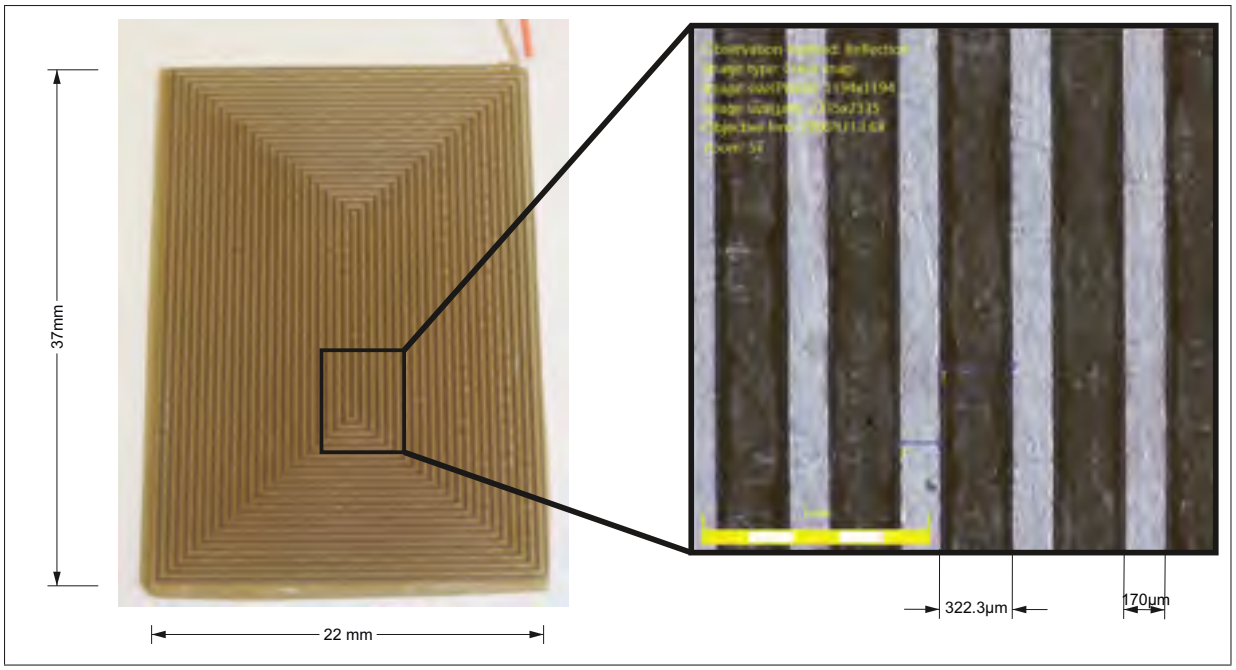


Figure 2.21 Design du motif

limites de l'équipement de fabrication disponible, l'espace minimal entre deux pistes est d'environ 0.320mm, les pistes font 0.17mm ce qui nous donne une aire cuivrée de $386,3mm^2$. La réponse des deux designs (2.22) est sensiblement la même hors l'aire cuivrée du deuxième design est réduite de plus de 59%. Ceci montre bien l'influence du périmètre de l'électrode sur la capacitance pour un condensateur plan.

Pour augmenter la résolution et augmenter la régularité du capteur, nous avons besoin d'une distribution uniforme des taxels sur la surface de notre PCB. Une des solutions proposées est de changer la forme de nos taxels pour qu'ils s'entremêlent et se confondent avec la partie dynamique. Cela va se traduire par des taxels statiques de taille à peu près équivalente malgré une aire réduite due à l'espace minimale nécessaire entre les traces des taxels et de la partie dynamique lors de la fabrication du PCB. Cet entremêlement de la partie dynamique dans les taxels statiques permet de répartir de façon plus uniforme les taxels et le dynamique de notre capteur. Comme nous l'avons vu la réduction de l'aire des taxels ne va pas forcément engendrer une réduction de sa capacitance.

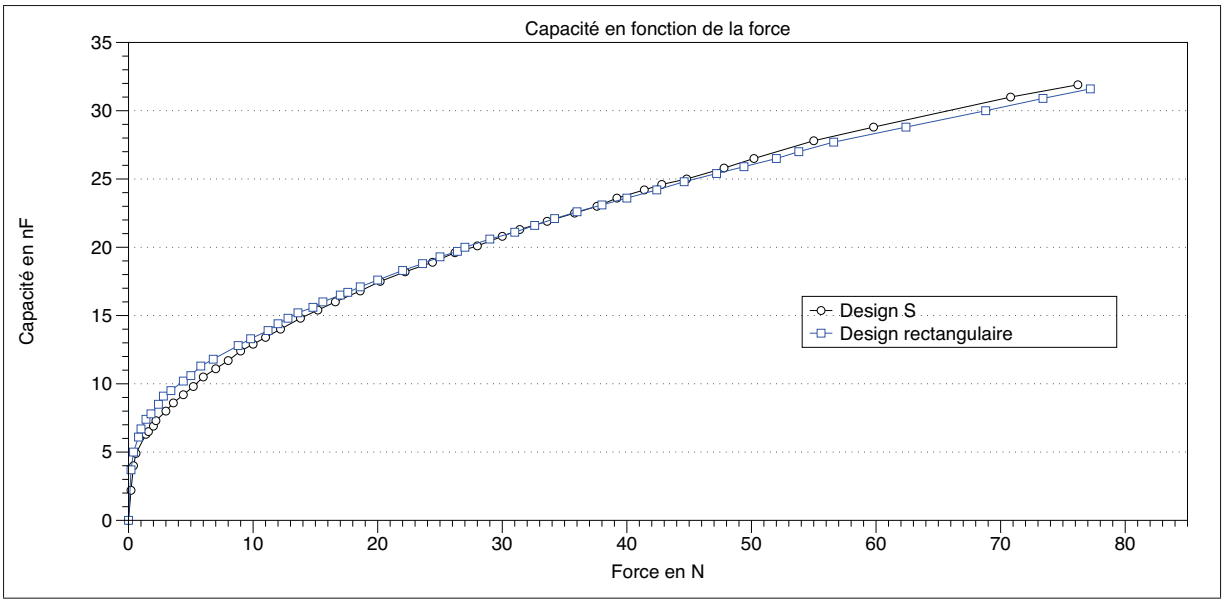


Figure 2.22 Comparaison des deux design

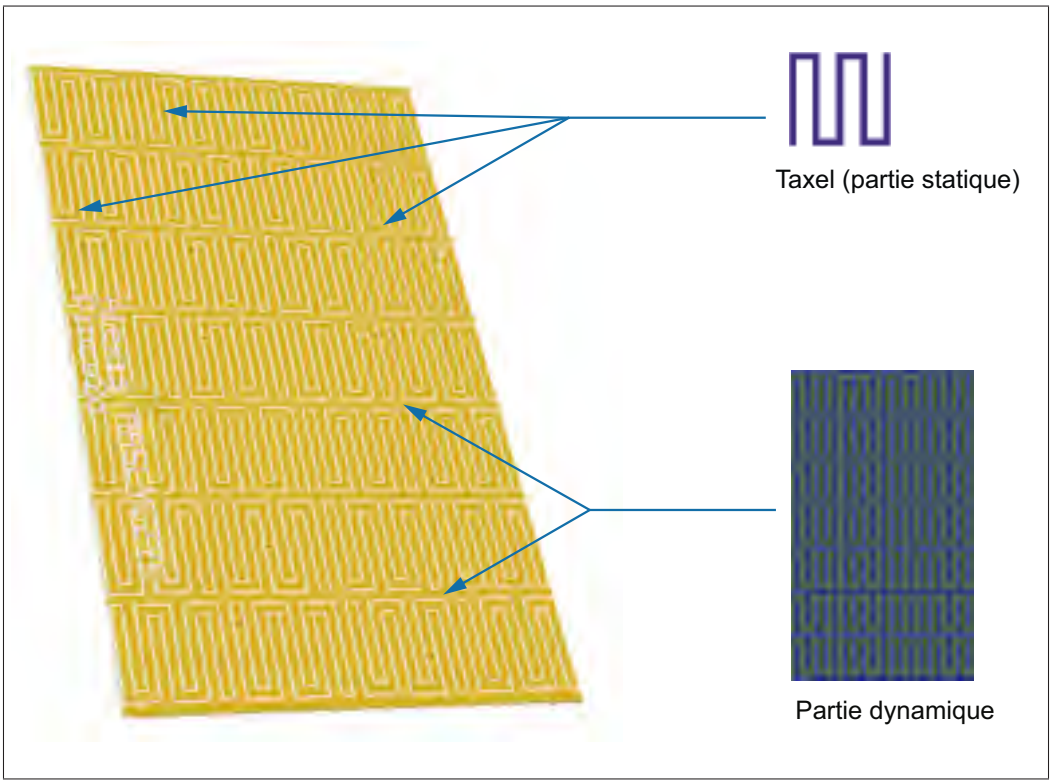


Figure 2.23 Nouveau design du capteur

2.4.1 Sensibilité

Au vu de ses résultats, nous avons testé notre capteur avec un nouveau design (voir figure 2.23). Dans ce nouveau modèle la partie dynamique est routée avec de petites traces entremêlant les taxels statiques. Le but toujours étant de maximiser le périmètre des électrodes pour maximiser les effets de bords. En comparant les aires des deux designs (voir figure 2.24) on s'aperçoit que

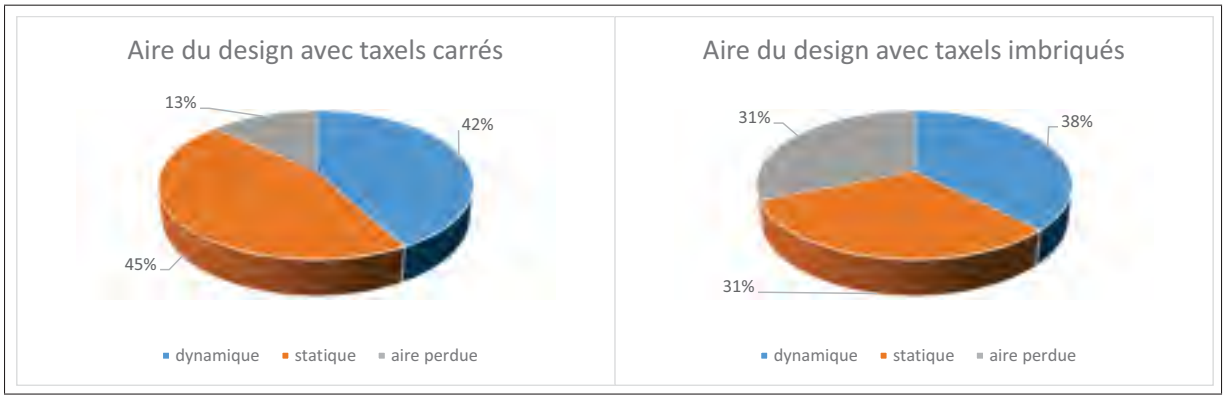


Figure 2.24 Comparaison des aires des deux designs

les aires ont diminué lorsque les taxels sont imbriqués. Ceci est dû à l'espace minimal requis entre les traces statiques et dynamiques lors de la fabrication du pcb. Étant donné que l'on maximise la longueur des électrodes, l'aire perdue entre les traces sera elle aussi maximisée.

Comme attendu le nouveau design du capteur nous permet d'augmenter la variation du signal de sortie d'environ 30% par rapport au design de taxel carré 2.25. Le fait que les taxels soient imbriqués accentue la non-linéarité de la courbe, ceci n'a pas de conséquence réelle sur le bon fonctionnement du capteur néanmoins la variation sera plus importante pour des petites forces allant de 0 à 10N.

2.4.2 Uniformité

Avec ce nouveau design, les taxels sont répartis de façon beaucoup plus uniforme à la surface de notre capteur. Ceci permet de détecter des formes plus complexes comme illustré la figure

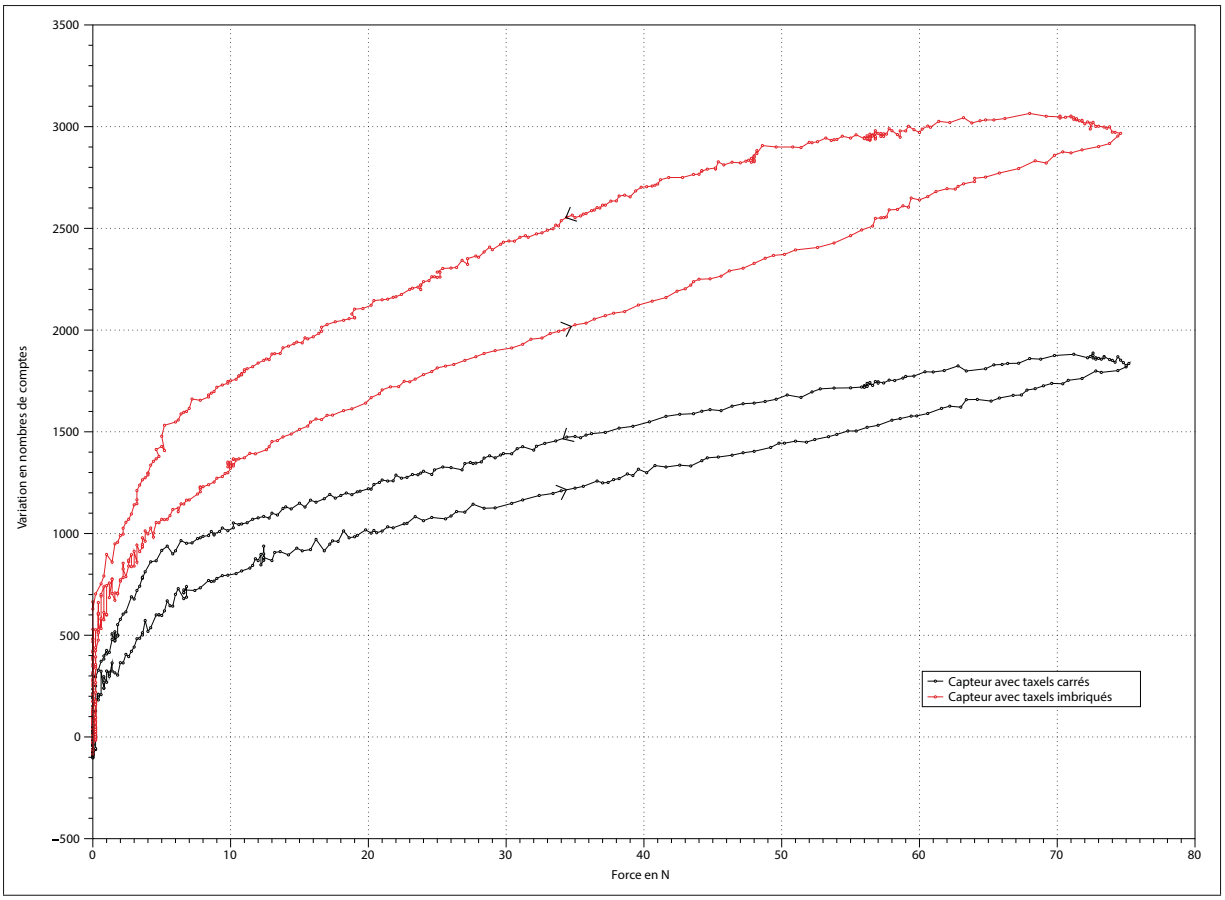
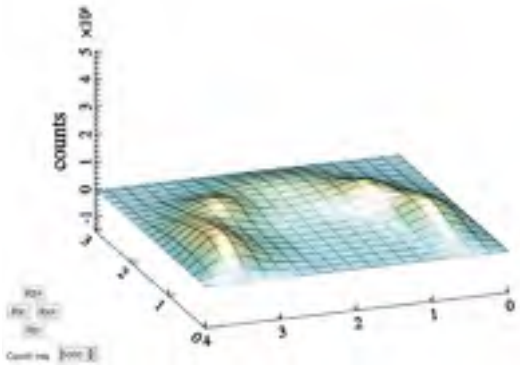
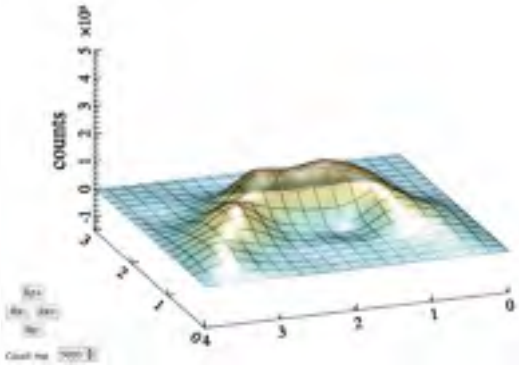


Figure 2.25 Comparaison des réponses des deux designs

2.26 qui montre la comparaison entre l'ancien design et le nouveau lorsque l'on vient saisir la anse d'une tasse de café. Dans les deux cas on est capable de distinguer la forme de l'anse mais on peut voir que la précision du nouveau design est meilleure, on retrouve plus de détails et la réponse est un peu plus uniforme.



a) Ancien design avec taxels carrés



b) Nouveau design avec taxels imbriqués

Figure 2.26 Comparaison de l'image tactile entre les deux designs lors d'une saisie d'une tasse par l'anse

2.5 Limitations et diaphonie

L'utilisation d'un même circuit de traitement limite la possibilité de plusieurs design sur la même zone, ceci à longtemps limité les capteurs tactiles à détecter qu'un seule type d'évènement tactile. Cette contrainte nous a poussés à développer le capteur avec un unique principe de transduction aussi bien pour la détection statique que pour la détection dynamique. Le fait de mettre les éléments de détection pour les événements statiques et dynamiques sur la même couche du PCB permet d'avoir un capteur compact et facile à fabriquer. Cependant nous allons voir qu'il existe plusieurs limites qu'il faudra essayer de franchir dans le futur pour augmenter les performances du capteur.

2.5.1 Perturbations dans le diélectrique

La coexistence du statique et dynamique sur la même couche du PCB n'apporte pas que des avantages. Lorsqu'on utilise la partie statique, le module CSD (CapSense® Sigma Delta) permettant de mesurer la capacité va charger à tour de rôle les 28 taxels ce qui va provoquer des perturbations sur le signal dynamique si on l'acquiert en même temps. Le résultat sur la figure 2.27 montre le signal dégradé par une fréquence due au chargement déchargement de la partie

statique. Malgré plusieurs filtres nous n'avons pas trouvé de réel moyen de protéger le signal contre ces perturbations qui se crée entre les deux armatures.

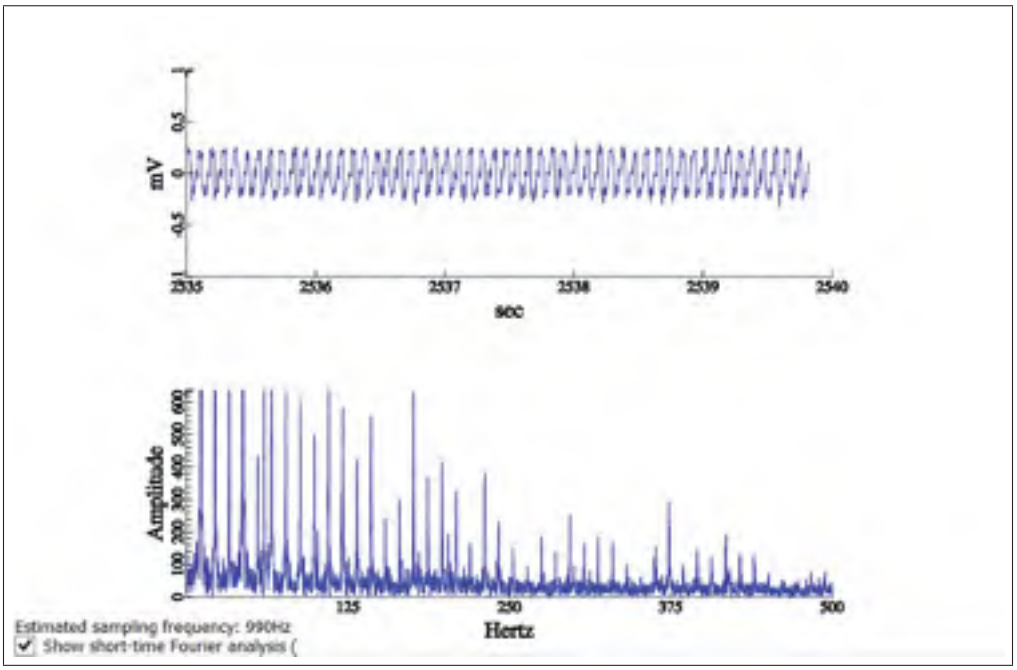


Figure 2.27 Signal dynamique perturbé par la partie statique

2.5.2 CEM et Règles de design

Le module CSD (CapSense® Sigma Delta) permettant de mesurer les capacités de chaque taxel offre une très bonne immunité au bruit extérieur offrant un bon rapport signal sur bruit. A l'inverse notre signal dynamique est lui très sensible aux parasites extérieur.

Pour réduire les émissions parasites, il y a 4 principes à respecter :

a. Réduire les distances des pistes ;

b. Éviter les antennes sur le circuit ;

c. Réduire les sources de bruit (fluctuations de tension et de courant) ;

d. Contenir la propagation du bruit dans des zones spécifique ;

Les perturbations peuvent apparaitre sous deux formes différentes, si elles utilisent les connexions électriques entre différents composants on parlera alors de perturbations conduites tandis que les perturbations rayonnées apparaissent lorsqu'un circuit est soumis à des différences de potentiel et ou parcouru par des courants, produisant des champs électromagnétiques tout autour. Bien évidemment si des courants circulent dans des câbles ou des connexions ils vont eux-mêmes rayonner. De même, des perturbations rayonnées sont susceptibles d'induire des courants parasites dans les connexions. L'intensité de la perturbation dépend de plusieurs paramètres comme sa distance par rapport à la source, sa fréquence et son amplitude. Qu'il s'agisse de perturbations conduites ou rayonnées, il est impératif de protéger au mieux la partie dynamique.

Premièrement la distribution des alimentations doit être faite de façon méthodique, généralement il est conseillé de router les pistes d'alimentation en premier, en s'assurant que toutes les parties du montage qui consomment le plus ou qui perturberont le plus seront situées le plus proche possible de l'alimentation. Ceci permet de limiter les effets parasites et les variations de tension.

Concernant les plans de masse, il est bon de séparer la partie analogique de la partie numérique comme le montre la datasheet su PSoC®. Les différents plans de masse devraient être raccordés en un point avec une petite piste (qui sera inductive) afin de réaliser l'équipotentialité. Toutefois pour notre application l'utilité d'un plan de masse peut se poser étant donné que des capacités parasites seraient crées entre le plan de masse et nos taxels ceci changerait considérablement le bon fonctionnement de notre capteur.

Le mélange de signaux analogique à côté de signaux digitaux ne fait pas bon ménage, la règle la plus simple est de séparer au mieux les signaux, limiter la longueur de piste et la mise en parallèle de pistes véhiculant des signaux de nature différente.

Il convient d'éviter de router en bordure de carte, car les pistes rayonnent encore plus avec les effets de bord. Il est possible de placer un anneau de garde tout autour de la carte connectée à la masse pour éviter les effets de bord cependant cela fait perdre un espace de routage assez

conséquent. Si un anneau de garde est placé la surface de cet anneau doit être de 3 largeurs de piste selon Dunand (2000) .

Les composants électroniques de type logique fournissent des signaux dont les temps de montée et de descente sont très rapides. De ce fait, ces signaux contiennent des harmoniques de rang élevé, qui peuvent s'ajouter aux signaux utiles et les perturber. Par exemple un oscillateur cadencé à 2 KHz peut ainsi rayonner autour de lui un signal parasite de 2 KHz et ses harmoniques à 6 KHz, 10 KHz, 14 KHz, 19 KHz etc...

Pour réduire les émissions, des capacités de découplage peuvent être mises en place. Celles-ci sont indispensables dans la plupart des applications. Généralement, les datasheets de chaque composant suggèrent la valeur adéquate de capacités de découplage. Cependant, le choix de leurs valeurs et de leur placement doit être fait finement pour optimiser la réduction du bruit.

Les communications transitant via RS485 et I2C entre le microcontrôleur et les périphériques autour sont susceptibles de créer des perturbations comme le montre la figure 2.28 faisant une comparaison du signal dynamique lorsque des données sont échangées sur la liason I2C entre le microcontrôleur et l'IMU et lorsqu'il n'y a aucun évènement sur la liaison. On peut notamment voir sur la transformée de Fourier les différentes fréquences perturbatrices ainsi que leurs harmoniques.

2.5.3 Communication et timing

Pour satisfaire les nouveaux objectifs des capteurs tactiles définit par Yousef *et al.* (2011) à savoir détecter des événements statique et dynamique avec une résolution spatiale de 1mm dans les doigts et 5mm dans la paume il faut que notre capteur soit capable de transmettre une très grande quantité d'information à l'unité de traitement. Si l'on prend en considération que la sensibilité de la partie dynamique doit correspondre à une bande passante d'environ 1000Hz cela veut dire que le rafraichissement des données doit se faire à chaque milliseconde. Le tableau 2.1 représente les temps de transmission des différentes données que le capteur est susceptible d'envoyer. On se rend compte qu'avec la vitesse maximale disponible de l'UART offerte par

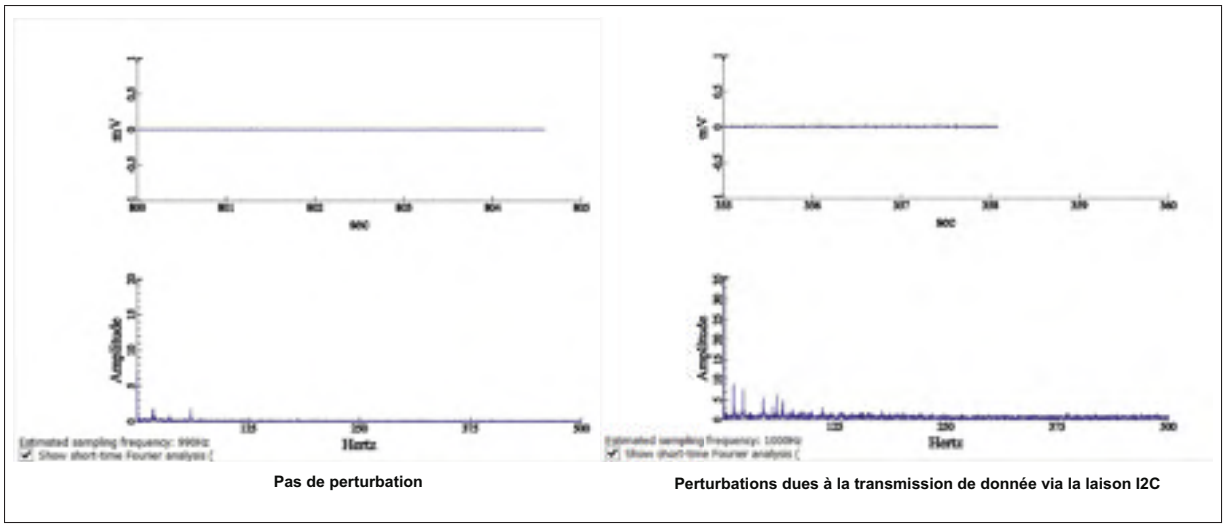


Figure 2.28 Comparaison du signal dynamique lorsque des données transitent via l'I2C

le PSoC® (921600 Baud) on atteint presque les limites de transmissions. Si on envoie les 28 données statiques, la donnée dynamique, et les données de l'IMU (accéléromètre, gyroscope et magnétomètre) à 1000Hz c'est-à-dire toutes les millisecondes, le temps de transmissions est alors de 0.82ms soit une marge (slack time) de 0.18 ms. On comprend vite que la communication des données peut être un obstacle à l'évolution des capteurs, car l'ajout de nouvelles fonctionnalités où l'augmentation de la résolution spatiale du capteur signifierait un nombre de données à transmettre toujours plus important.

2.6 Séparation des parties statique et dynamique

Comme présenté précédemment, la partie statique et la partie dynamique ne permettent pas un fonctionnement correct lorsque les deux marchent en même temps. Les émissions de la partie statique entre les deux armatures perturbent beaucoup trop le signal dynamique. Pour remédier à ce problème, il faut séparer les deux parties.

Plusieurs articles comme Seminara *et al.* (2011) et Tuukkanen et Rajala (2015b) présentent l'utilisation de film PVDF piézoélectrique pour la fabrication de capteur de vibration. En effet, les matériaux transducteurs convertissent une forme d'énergie à l'autre. Ils sont largement utilisés dans les applications de détection.

Tableau 2.1 Temps de transmissions des données avec un UART

Vitesse UART : 921 600 baud = 921 600 bit par seconde pour 1 bit par intervalle élémentaire				
Données	**Nombre d'octets par capteur**		**Temps de transmission théorique**	**Temps de transmis-sion mesuré**
Dynamique	2		2,17014E-05	0,000022
Statique	56		0,000607639	0,000628
Accéléromètre	6		6,51042E-05	0,000065
Gyroscope	6		6,51042E-05	0,000065
Magnétoscope	6		6,51042E-05	0,000065
Total d'octet	76	**Temps total en s**	0,000824653	0,000845
Total de bit	608			
Total avec bit de start et stop	760			
Total de bit à 1000Hz	760000			

2.6.1 Utilisation d'un film piézoélectrique

Les capteurs polymères piézo-électriques sont en pleins essors sur le marché des capteurs . Il existe un nombre considérable d'applications où le film de polymère piézoélectrique peut être une solution appropriée. Le fluorure de polyvinylidène (PVDF) est un polymère fluoré polarisé qui a une très forte activité piézoélectrique . Orlin Stanchev (2014) a proposé un amplificateur de charge spécialisée pour améliorer les applications de mesure qui utilise des films PVDF.

Le matériau PVDF est extrudé en un film très mince qui est souple , léger et résistant. Il peut également être directement rattaché à une structure sans perturber son mouvement mécanique. Les propriétés du film piézoélectrique comprennent :

- une bande de fréquence très large de 0.001Hz à 100Mhz ;
- une vaste gamme dynamique 10-8 à 106 psi ;
- une faible impédance acoustique ;
- une haute compliance élastique ;
- une haute tension de sortie ;
- une résistance mécanique élevée ;
- une résistance au forte humidité ;
- il peut être collé avec des colles commerciales.

Le film piézoélectrique a une impédance acoustique qui est très proche de l'eau et les tissus humains. Cette caractéristique le rend approprié pour des applications de type médicales. Il est également utilisé dans la détection de vibrations, les accéléromètres , l'audio et les applications à ultrasons .

Les capteurs sont généralement des éléments rectangulaires de film piézoélectrique avec des électrodes imprimées en encre d'argent les deux côtés et un revêtement de protection. La construction est représentée sur la figure 2.29.

Le film de PVDF a généralement une épaisseur de 9 , 28, 52 ou 100 um. Des forces ou des contraintes appliquées aux éléments de PVDF sont prises en compte dans les trois dimensions principales : la longueur, la largeur et l'épaisseur. La réponse la plus élevée est obtenue lorsque la force mécanique est appliquée à l'élément PVDF dans son épaisseur. Après l'application d' une force mécanique , une charge électrique se produit sur la surface de l'élément de PVDF. Cette charge est directement proportionnelle à la déformation mécanique et provoque une tension entre les électrodes sur la surface de l'élément.

Les charges électriques développées par le film piézoélectrique décroit avec une constante de temps qui est déterminée par la constante diélectrique et la résistance interne du film, ainsi que l' impédance d'entrée de l'électronique auquel le film est connecté. En pratique, la fréquence minimale mesurable avec un film piézo-électrique est de l'ordre de 0,001 Hz .

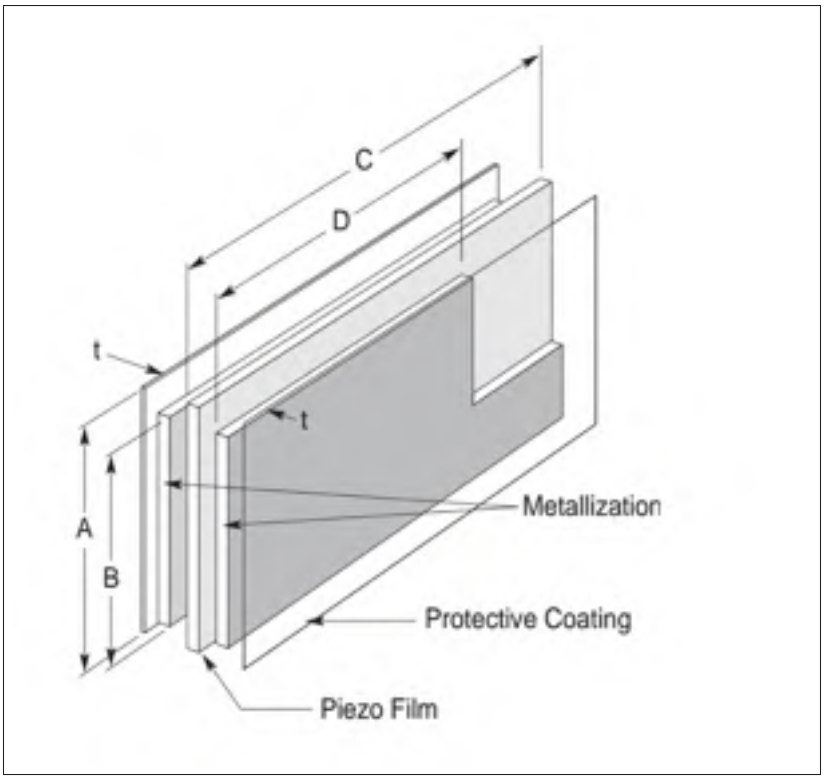


Figure 2.29 Construction du film PVDF

Sous condition proche d'un court circuit, la charge développée par le film PVDF pour une petite contrainte ou déformation est donnée par :

$$Q = A * d_{3n} * X_n (n = 1, 2, ou 3)$$

L'axe mécanique "n" de la contrainte appliquée, par convention, est :

1 = longueur

2 = largeur

3 = épaisseur

Où

Q = charge développée

A = Aire de l'électrode conductrice

d_{3n} = coefficient piézoélectrique pour l'axe de contrainte ou de déformation appliquée

n = axe de contrainte ou de déformation appliquée

Xn = contrainte appliquée

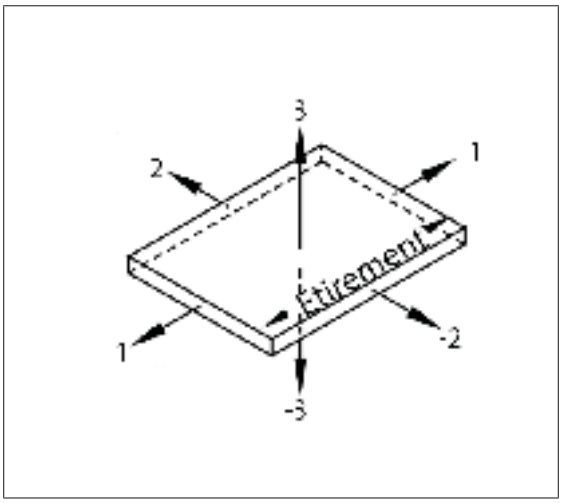


Figure 2.30 Direction des étirements

Les capteurs PVDF sont de nature capacitive, l'utilisation d'amplificateurs de charge présentée dans la première partie est une bonne solution.

Le film piézoélectrique est très sensible aux perturbations EMI (Electromagnetic Interference) . Il dispose également d'une sensibilité forte pour le rayonnement thermique dans la plage de 7 à 20 um. C'est pourquoi un bon design mécanique doit être fait pour éviter les perturbations de changements de température ambiante.

La partie la plus critique est la mesure de la résistance d'entrée. La résistance d'entrée affecte la capacité de mesure basse fréquence et l' amplitude du signal. L'amplificateur de charge nécessite des amplificateurs opérationnels ayant une impédance d'entrée élevée et un faible courant de polarisation. Une résistance élevée à l' entrée évite les fuites de charge du condensateur de rétroaction.

2.6.2 Partie expérimentale

Après toutes ces considérations, l'utilisation d'un étage différentiel est proposée par Orlin Stanchev (2014). La mesure en différentiel a pour avantages offrir une immunité aux perturbations, mais en revanche le fait que l'impédance d'entrée vue par les montages en amont n'est pas infini, il y a donc du courant. La première étape consiste à amplifier le signal avec deux amplificateurs de charge avec un gain faible mais une haute impédance d'entrée. Le deuxième étage est amplificateur différentiel avec un gain élevé pour avoir une amplitude de sortie exploitable. Dans notre cas, étant donné que nous utilisons toujours notre système sur puce PSoC, la plage d'alimentation de l'ADC est de 0-3.3v c'est pourquoi il faut conditionner le signal de sortie dans cette plage de tension. Pour cela on utilise un simple pont diviseur de tension accouplé à un amplificateur en suiveur de tension. La sortie va nous donner une tension de référence utiliser dans les deux étages d'amplification pour remontrer le signal dans la plage 0-3.3v. Un filtre passe-bas est ajouté en sortie de l'amplificateur différentiel pour éliminer les hautes fréquences.

Pour notre capteur nous avons testé deux films PVDF de chez Measurement Specialties, le DT1-052K avec une épaisseur de 64um et une capacité de 0.7nF et le LDT0-028K avec une épaisseur de 28um et une capacité de 0.48nF. Pour les amplificateurs il est primordial qu'ils aient une haute impédance d'entrée, soient de type Rail To Rail et aient un faible courant de polarisation. C'est pourquoi nous avons choisi le TSZ124 qui dispose de 4 amplis opérationnels dans un package de faible encombrement (QFN) adapté à notre application. $Ro = 1K\Omega$ permet d'équilibrer l'influence des courants de polarisation pour U1 et U2 mais ils ne sont pas réellement nécessaire avec les AOPs d'aujourd'hui. Les résistances de contre réaction $Rf = 1M\Omega$ avec un gain $G = 1K\Omega$ et une constante de temps $\tau = Rf * Cf = 4.9ms$ L'amplificateur différentiel possède un gain d'environ 2 et le filtre passe-bas à une fréquence de coupure de 1500Hz $Rlp = 220\Omega$ et $Clp = 1\mu F$

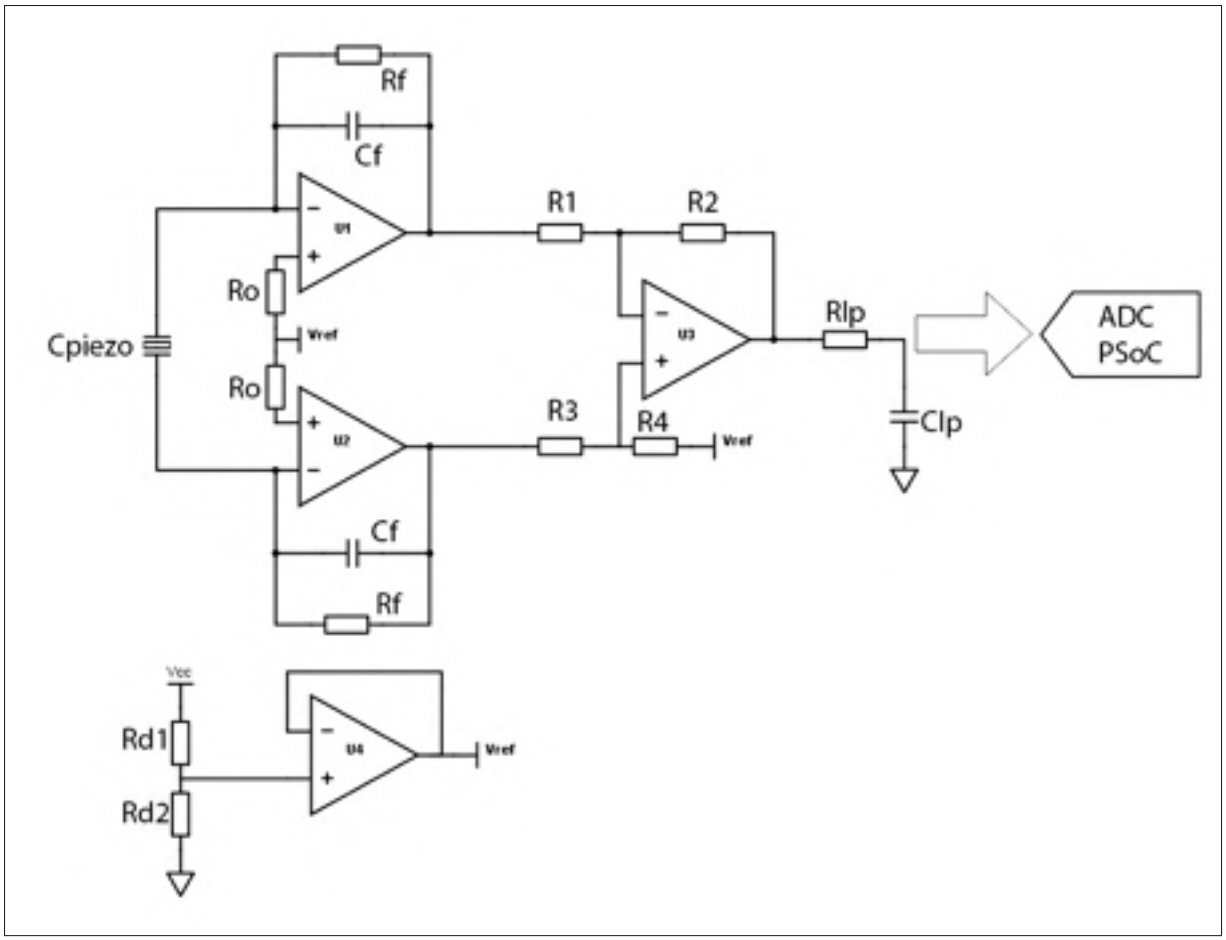


Figure 2.31 Schéma d'amplification avec le PVDF piézoélectrique

La réponse fréquentielle du capteur pour une bande allant de 10 à 500Hz est donnée sur la figure 2.32. On peut voir que l'amplitude passera par un maximum (phénomène de résonance) pour une fréquence autour de 75Hz ce qui est conforme aux caractéristiques fournies par le constructeur du film PVDF. Si l'on compare visuellement cette réponse fréquentielle avec celle du capteur de base on retrouve à peu près la même forme et les mêmes amplitudes. En revanche la réponse avec le film PVDF piézoélectrique est vraiment meilleure lorsque on applique une force importante sur la capteur. Pour notre capteur de base la réponse est quasi nulle lorsqu'on applique une force élevée alors qu'ici le film va toujours est micro-étirer.

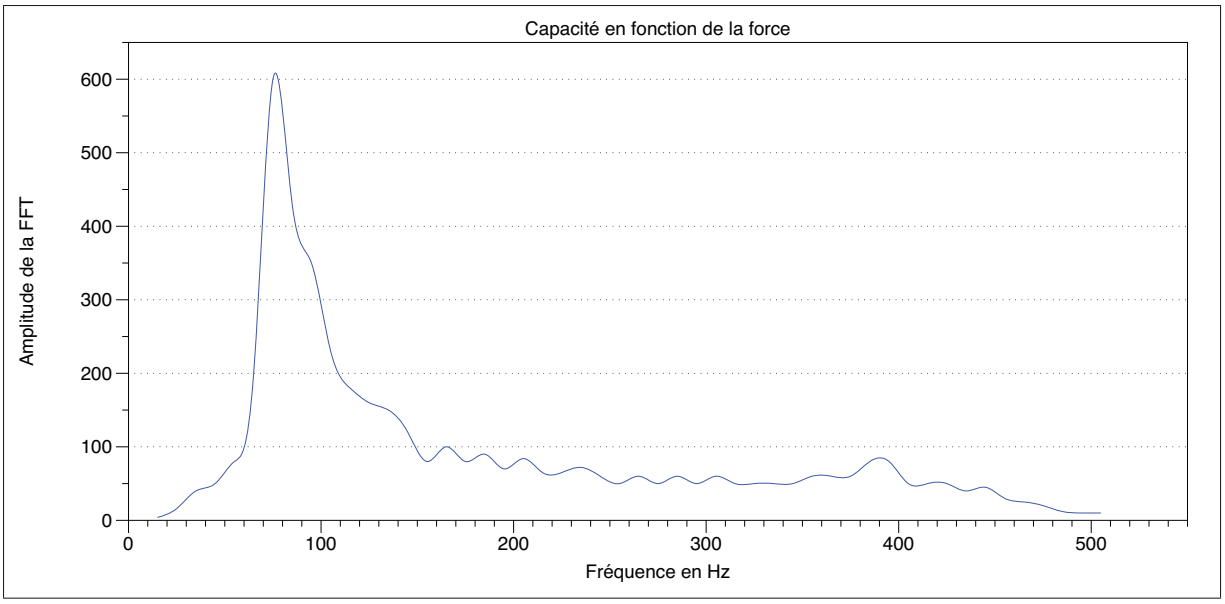


Figure 2.32 Bande passante du film piézoélectrique

2.6.3 Intégration mécanique

L'utilisation du film PVDF pose quelques problème d'ordre mécanique. Le film possède deux électrodes qu'il faut relier aux amplificateurs. Plusieurs solutions sont proposées par le constructeur comme fixer le film avec des rivets directement sur le PCB, mettre des connecteurs sur les électrodes, néanmoins ces solutions ne sont pas viables pour notre application. Dans un but de minimisation de l'encombrement, nous avons opté pour l'utilisation de vis et rondelle comme le montre la figure 2.33. La rondelle va venir écraser l'électrode sur un fil pour faire le contact. Le fil sera quant à lui relier au pin du PCB. Le film viendra par-dessus le diélectrique pour le bon fonctionnement de la partie statique.

2.6.4 Conclusion : Forces et faiblesses du capteur

Pour résumer, la partie statique est en mesure de représenter à la fois l'amplitude et la localisation des forces appliquées avec une précision raisonnable grâce à une résolution spatiale importante. L'emploi d'un filtre bi-cubique permet de mieux visualiser la répartition des forces sur la surface du capteur. L'utilisation d'une structure en cône pour le diélectrique permet de de

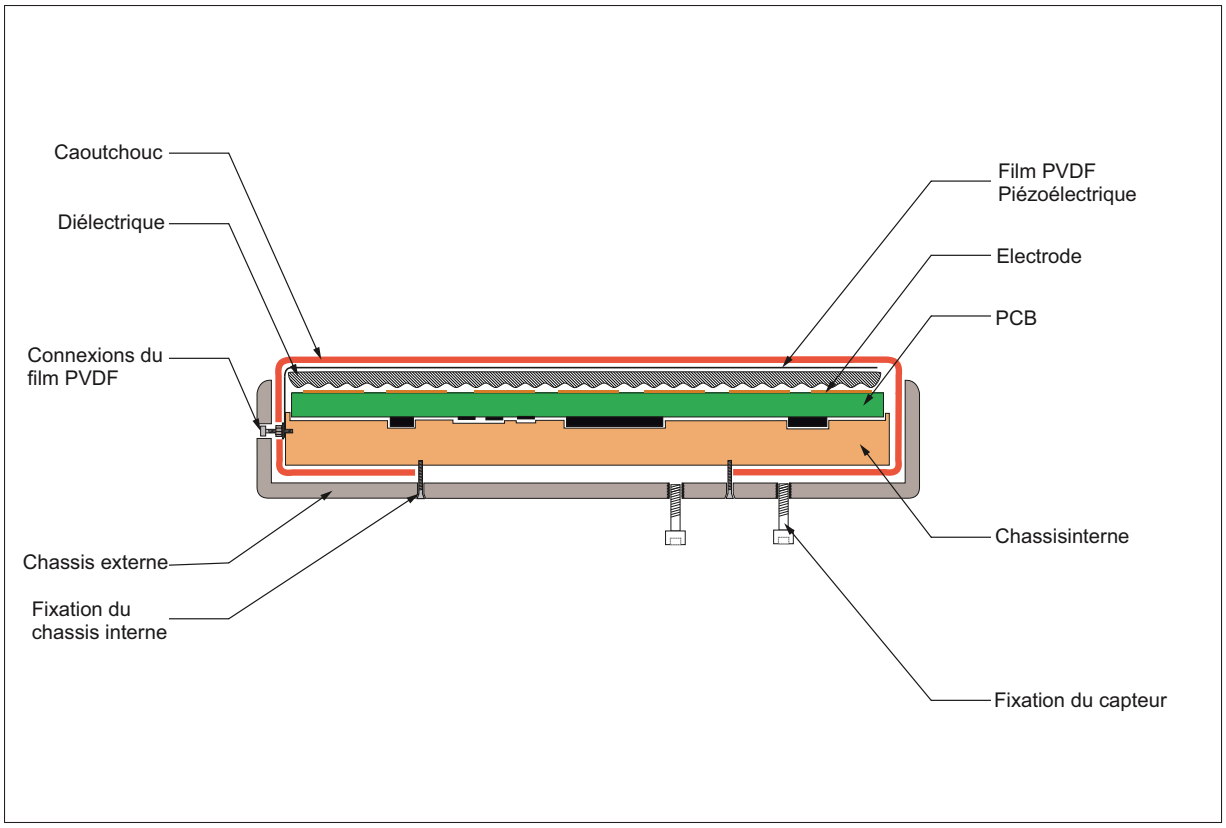


Figure 2.33 Intégration mécanique

détecter à la fois des faibles et des grandes forces cependant le matériaux va créer un hystérésis dans la réponse du capteur. La partie dynamique est capable de détecter de faible vibrations sur une grande gamme de fréquence allant de 1 à 500Hz. Néanmoins le signal peut se trouver dégradé du faite qu'il ne soit pas immunisé face aux perturbations environnantes.

La séparation de la partie statique et dynamique permet d'obtenir un nombre considérable davantage par rapport au capteur de base. Premièrement l'utilisation du film PVDF piézoélectrique accouplé à une amplification différentielle permet d'offrir une mesure immunisée contre les perturbations environnantes. Deuxièmement, la sensibilité est beaucoup plus importante par rapport au capteur de base lorsqu'on applique une force élevée. La bande de fréquence à elle aussi augmenté, nous sommes capables de détecter des basses fréquences à très faible amplitude qu'un humain n'est pas capable de sentir. Enfin, l'utilisation du film PVDF permet d'acquisitionner la partie statique et la partie dynamique en même temps sans que le signal

dynamique ne soit dégradé grâce à la séparation des deux parties. Pour les faiblesses, on peut citer le fait d'augmenter la complexité d'assemblage du capteur, le prix se voit lui aussi croître avec l'ajout du film et des composants externes.

CHAPITRE 3

UNITÉ DE MESURE INERTIELLE

3.1 Introduction

Étant donné que les robots se déplacent dans des environnements humains, ils ont besoin de savoir comment saisir et manipuler une très grande variété d'objets. Par exemple, certains éléments peuvent être doux et légers, comme une peluche ou une boîte vide, tandis que d'autres peuvent être lourds et durs, comme une bouteille en verre ou une clé de serrage. Après avoir décidé où ces objets doivent être saisis (placement des doigts de la pince), le robot doit également avoir une idée de la façon d'exécuter la portée (force des doigts et des réactions aux changements dans l'état de portée). Pour améliorer le taux de succès de saisie d'objet, l'utilisation des données tactiles est indispensable.

A l'intérieur de notre capteur tactile, nous avons intégré une unité de mesure inertielle (IMU) qui va nous permettre d'ajouter de nouvelles fonctionnalités. Premièrement en récupérant les données de l'IMU nous allons voir comment est-on capable d'estimer la position du capteur dans notre repère spatiale. Puis nous verrons que les données de l'IMU peuvent aussi nous permettre de détecter certaines vibrations lors l'utilisation des capteurs pour la saisie d'objet.

3.2 Configuration de la pince pour la saisie d'objet

Dans le domaine de la robotique, qu'il s'agisse d'un robot seul ou d'interaction avec un humain, la saisie d'objet avec un préhenseur est une tâche essentielle. On peut décomposer la saisie d'un objet en deux opérations, l'approche de l'objet puis la préhension de l'objet. La phase d'approche est un déplacement libre dans l'espace ayant pour objectif de se rapprocher de l'objet et de positionner la pince de façon stratégique pour la saisie. Généralement cette partie est faite par l'intermédiaire de la vision (caméra par analogie à l'œil humain). Pour la phase de préhension, le principal objectif est d'assurer une prise stable de l'objet saisie grâce aux capteurs tactiles.

3.2.1 Sous actionnement

Une des applications importantes de la robotique implique des manipulateurs qui "pick and place" (ramassent et placent) des objets placés dans des étagères ou des bacs. Généralement des manipulateurs sous-actionnés sont utilisés pour collecter ces objets. Les capteurs tactiles développés ont été installés sur une pince robotique sous-actionnée 2 doigts commercialisés par la société Robotiq.

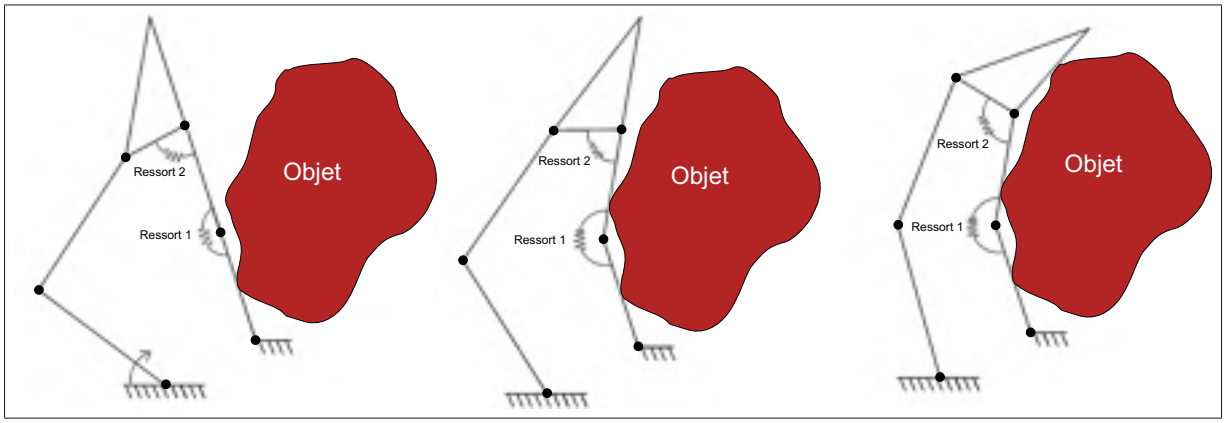


Figure 3.1 Adaptation du doigt la pince à la forme de l'objet

Les pinces sous-actionnées représentent une solution intermédiaire entre une main avec plusieurs actionneurs pour la manipulation d'objet et un préhenseur simples avec peu d'actionneurs qui auront une tache donnée et un contrôle plutôt simple. Dans une pince sous-actionnée, le nombre d'actionneurs est généralement inférieur aux nombres de degrés de liberté de la pince. Le sous-actionnement dans les doigts permet l'adaptation de la pince à la forme de l'objet comme le montre la figure 3.1. Les degrés de liberté sous-actionnés sont contrôlés simplement par des ressorts et des butées mécaniques.

La figure 3.1 montre l'utilisation d'un doigt sous-actionné à 2 degrés de liberté. Le doigt se ferme sous l'influence d'une force représentée par la flèche grise. Lorsque la première phalange entre en contact avec l'objet, la deuxième phalange pivote jusqu'à ce qu'elle entre à son tour

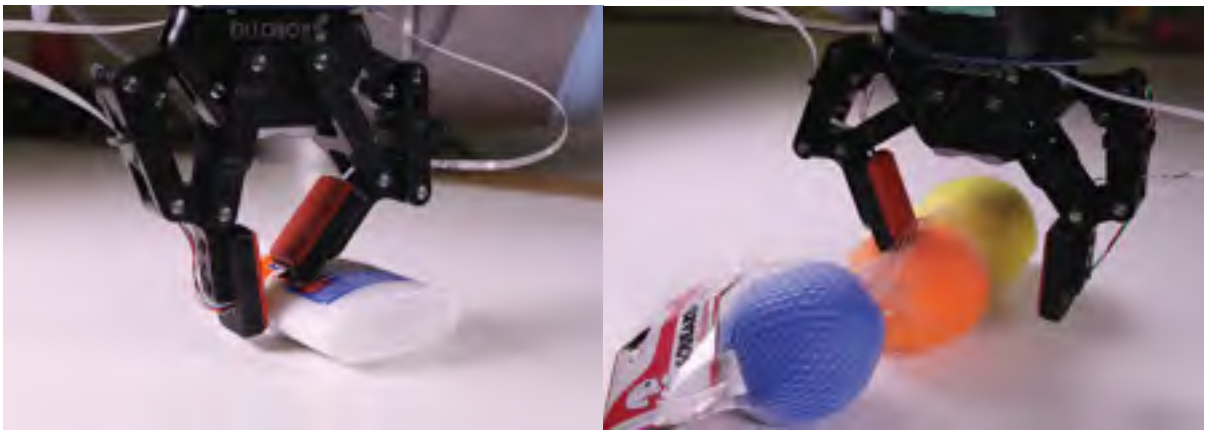
en contact avec l'objet.Le ressort et la butée mécanique à la deuxième articulation permettent à la deuxième phalange de rester dans une position stable lorsqu'il n'y a aucun contact.

En regroupant deux doigts ensemble il est ainsi possible d'obtenir une pince simple capable de saisir des objets en s'adaptant à la forme de l'objet . On retrouve aussi d'autres systèmes rassemblant plusieurs doigts pour créer un préhenseur plus complets offrant des saisies plus complexes comme le montre la figure 3.2 qui montre les différentes préhensions possibles avec la pince 3 doigts de Robotiq.

Figure 3.2 Préhensions possibles une main sous-actionnée 3 doigts de Robotiq

Évidemment les pinces sous-actionnées ont aussi des inconvénients. En effet des contacts non prévus peuvent entrainer le sous-actionnement de la pince. Comme illustré sur la figure 3.3, la pince se retrouve sous-actionnée à cause d'un contact avec l'objet sur la table ou lors d'une saisie d'un objet avec des propriétés mécanique spécifique (balle en mousse). Les ressorts qui permettent de rester dans des positions stables lorsqu'il n'y a aucun contact sont dans ce cas le point faible de la pince.

Pour remédier à ce problème, plusieurs possibilités sont envisageables. La première serait d'équiper la pince de capteur angulaire permettant de recueillir une image de l'angle de chaque



a) Sous-actionnement sur une surface lisse b) Sous-actionnement sur une balle molle

Figure 3.3 Exemple de cas de sous-actionnement

doigt de la main. Pour cela on pourrait utiliser des potentiomètres, des capteurs à effet Hall ou encore des codeurs optiques. Mais les inconvénients sont nombreux, le système devrait être externe à notre capteur, chaque pince robotique sous-actionnée devrait avoir son propre capteur angulaire donc l'intégration mécanique du capteur serait compliqués.

La deuxième solution pour laquelle nous avons opté est d'utiliser une unité de mesure inertielle (IMU) intégrée au capteur tactile avec laquelle on va pouvoir venir estimer les angles d'articulation de la pince.

Le suivi précis de l'orientation des systèmes se déplaçant dans un espace tridimensionnel (3D) est utilisé dans bon nombre d'application. On le retrouve dans la navigation, la stabilisation de véhicules, les interactions machine et dans notre cas la robotique. Avec l'arrivée des drones et autre multirotor, les algorithmes de fusion de donnée pour l'estimation de l'orientation des systèmes ont considérablement évolué.

3.2.2 Algorithme de système de référence de cap et d'attitude

Un AHRS (Attitude et Heading Reference System) fournit en temps réel l'orientation 3D (tangage, roulis, et le cap) en fusionnant les données de l'IMU. La précision de la mesure dépend fortement de la qualité du capteur.

Un AHRS se compose de magnétomètres, d'accéléromètres et gyroscopes sur les trois axes. Ces capteurs, associés à un processeur intégré, créent un système capable d'estimer la position des objets dans l'espace 3D.

Dans la littérature, plusieurs auteurs ont trouvé une manière appropriée d'estimer de façon précise l'orientation du cap et attitude à l'aide d'un IMU (accéléromètres et gyroscopes et un magnétomètre). Ces capteurs sont aussi appelés MARG pour Magnetic, Angular Rate, and Gravity ou MIMU pour Magnetic and Inertial Measurement Unit.

L'intégration des mesures gyroscopique, à partir d'une orientation initiale connue, fournit le changement d'orientation. Cependant, à cause du bruit et du biais du gyroscope, il y a une dérive à long terme qui doit être corrigée. Ces erreurs angulaires produisent une erreur de positionnement de plus en plus grande en raison des algorithmes qui estime la position en intégrant la vitesse angulaire.

L'accéléromètre peut fournir des estimations d'inclinaison sans dérive par détection du vecteur de gravité. Le magnétomètre, correctement calibré, est utilisé pour limiter ou réduire la dérive dans l'orientation horizontale en mesurant le champ magnétique terrestre. En outre, la précision à court terme du gyroscope permet la détection de perturbations externes à court terme dans le champ magnétique qui sont d'habitude dans des environnements industriels. Plusieurs limitations affectent la bonne estimation des angles, premièrement la difficulté d'interpréter correctement les signaux des accéléromètres, lorsque le champ de gravité (référence verticale) coexiste avec la composante liée au mouvement du capteur. Deuxièmement les matériaux ferromagnétiques (moteur, pièces métalliques) à proximité de l'IMU sont des sources critique de

perturbations lorsque la sortie du capteur magnétique est utilisé pour construire la référence horizontale pour l' estimation du cap.

L'estimation de l'orientation est aidée par deux références absolues, le champ magnétique terrestre et la gravité. Il existe plusieurs algorithmes de référence de cap et d'attitude, certains utilisent des algorithmes de filtrage de Kalman traditionnels en utilisant les mesures magnétiques et d'accélération pour estimer la variation du biais du gyro en temps réel. D'autres systèmes utilisent des filtres non-Kalman qui calcule une estimation de l'orientation en temps réel. Un avantage potentiel de ces algorithmes modifiés est qu'ils peuvent surpasser les capteurs traditionnels à base de filtres de Kalman, en fournissant une optimisation en temps réel des performances dans des environnements magnétiques . Dans notre cas nous utiliserons celui de Madgwick *et al.* (2011) que l'on retrouve dans de nombreux articles et documents scientifiques. Cet algorithme se trouve être open source et capable de rivaliser avec les produits commerciaux en termes de performance et robustesse.

L'objectif de l'algorithme de Madgwick *et al.* (2011) est de combiner de manière optimale les informations de gyroscope, de l'accéléromètre et du magnétomètre (optionnel) pour obtenir l'orientation du capteur. Un algorithme AHRS est par principe divisé en deux blocs séparés : l'orientation du gyroscope et l'orientation de l'accéléromètre et du magnétomètre.

Orientation du Gyroscope : L'utilisation d'un gyroscope permet de mesurer la vitesse angulaire dans le cadre du capteur :

$$\omega^s = (\omega_x^s, \omega_y^s, \omega_z^s)$$

Il est possible d'estimer l'orientation du capteur. Ce résultat est obtenu en accumulant le changement d'orientation déduite des valeurs du gyroscope. La représentation des angles peut s'écrire sous la forme d' angles d'Euler ou de quaternions.

Orientation de l'accéléromètres et du magnétomètres : Les accéléromètres intégrés dans le MIMU mesurent le champs de gravité et son amplitude

$$a^s = (a_x^s, a_y^s, a_z^s)$$

De même, le magnétomètres mesurent le champ magnétique de la Terre en amplitude et direction

$$m^s = (m_x^s, m_y^s, m_z^s)$$

En fonction de la répartition de ces deux domaines entre les trois axes du capteur, son orientation par rapport au cadre de navigation peut être estimée. En première approximation, nous supposons que le capteur est soit en position fixe ou se déplace à une vitesse constante, et par conséquent, l' accéléromètres mesure seulement le vecteur de gravité. Plus loin, nous supposons un champ magnétique non perturbé et par conséquent, les magnétomètres ne mesure le champ magnétique terrestre. La connaissance du champ de gravité donne une estimation des angles d'attitude

$$\phi = \arctan(\frac{a_x^s}{a_y^s})$$

et

$$\Theta = \arctan(\frac{-a_x^s}{\sqrt{(a_y^s)^2 + (a_z^s)^2}})$$

où ϕ représente l'angle de roll, Θ représente l'angle de pitch et a^s pour x,y et z représente l'accélération sur l'axe mesuré. L'estimation du cap en utilisant seulement le champs de gravité est impossible, cependant avec la champs magnétique de la terre on peut avoir une estimation :

$$\psi = \arctan(\frac{-m_x^h}{m_y^h}) \pm A$$

où ψ est le cap et m_x^h, m_y^h sont les mesures du champ magnétique pour l'axe projeté dans le plan horizontal. La variable A représente l'angle de déclinaison du champs magnétique.

Dans le travail de Madgwick *et al.* (2011), un filtre à gain constant est adopté pour estimer l'attitude sous forme de quaternion en utilisant des données provenant d'un capteur de MARG ou IMU. Une première estimation des quaternions est obtenue par intégration de la sortie du gyroscope et est ensuite corrigée par un quaternion à partir des données d'accéléromètre. La méthode de Madgwick assure une bonne estimation de l'attitude à un calcul réduit. D'après les recherches de Valenti *et al.* (2015a) il semblerait que le roulis et le tangage du filtre de Madgwick soient affectés par les perturbations magnétiques lorsqu'on approche d'une souce féromagnétique comme aimant de moteur. Ceci est critique pour notre application de saisie d'objet, les capteurs montés sur la pince deux doigts qui est elle même installée sur un bras UR présentant de nombreux moteurs. Tous ces actionneurs sont synonymes de perturbations magnétiques c'est pourquoi l'utilisation du magnétomètre n'est pas recommandée. Nous n'utiliserons donc que les données provenant des accéléromètres ainsi que des gyroscopes pour estimer l'orientation du capteur.

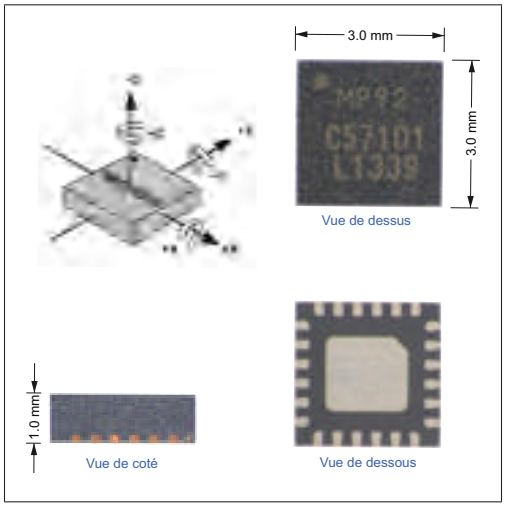


Figure 3.4 Dimensions du MPU9250 de InvenSense^{TM}

3.2.3 Intégration

Étant donné la taille de notre capteur (22mm par 37mm) l'encombrement des composants sur le PCB est crucial. Heureusement l'évolution de l'industrie de la micro-électronique permet aujourd'hui d'avoir des capteurs miniatures. Un nombre considérable de capteurs est disponible sur le marché, le tableau 3.1 fait un rapide comparatif des différents capteurs disponible sur le marché. Tous les modèles ont des avantages et des inconvénients. Certains intègre seulement des accéléromètres, d'autres seulement des gyroscopes. Celui qui se démarque le plus des autres est le MPU-9250 de chez InvenSense^{TM}. Malgré un prix élevé il offre une bonne sensibilité, une fréquence de sortie idéale pour notre filtre et enfin la puce intègre 3 accéléromètres, 3 gyroscopes et 3 magnétomètres le tout dans un encombrement vraiment faible (seulement 3x3mm voir figure 3.4).

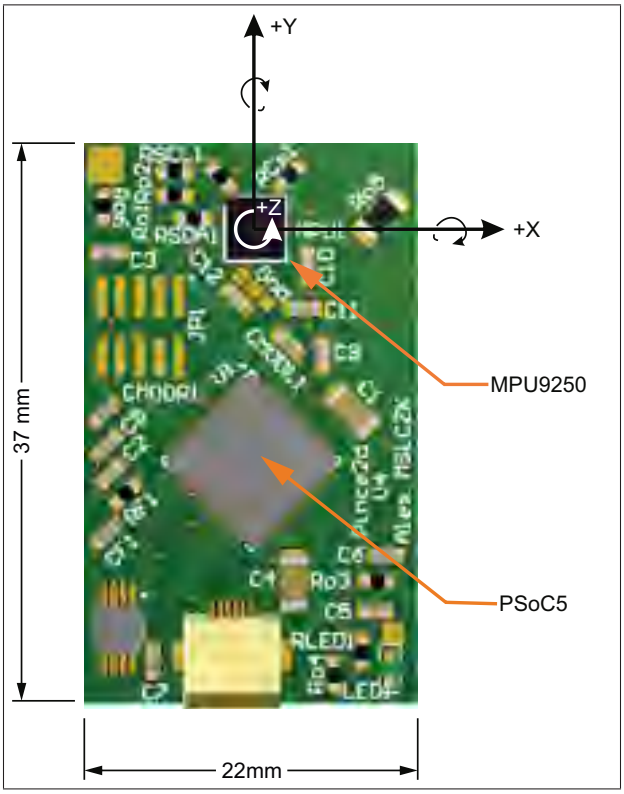


Figure 3.5 Capteur avec l'IMU

Tableau 3.1 Caractéristiques de différents capteurs

Accéléromètre				
Capteur	**Fréquence max de sortie**	**Sensibilité à 2g**	**Bruit**	**Prix**
MPU-9250	1000Hz	$0.06mg/LSB$	$300\mu g/\sqrt{Hz}$	$15CAD$
LSM9DS1	952Hz	$0.061mg/LSB$	NC	$9CAD$
BNO055	1000Hz	$0.976mg/LSB$	$190\mu g/\sqrt{Hz}$	$15CAD$
ADXL335	3200Hz	$15.66mg/LSB$	NC	$9CAD$
MMA8451Q	800Hz	$0.98mg/LSB$	$126\mu g/\sqrt{Hz}$	$2.57CAD$
LSM330DL	760Hz	$4mg/LSB$	$220\mu g/\sqrt{Hz}$	$6CAD$
Gyroscope				
Capteur	**Fréquence max de sortie**	**Sensibilité à 250dps**	**Bruit**	**Prix**
MPU-9250	8000Hz	$7.63mdps/digit$	$0.01dps/\sqrt{Hz}$	$15CAD$
LSM9DS1	952Hz	$8.75mdps/digit$	NC	$9CAD$
BNO055	1000Hz	$62.5mdps/digit$	$0.014dps/\sqrt{Hz}$	$15CAD$
L3G4200D	800Hz	$17.5mdps/digit$	$0.03dps/\sqrt{Hz}$	$9CAD$
LSM330DL	760Hz	$17.5mdps/digit$	$0.03dps/\sqrt{Hz}$	$6CAD$

Les données de l'IMU (figure 3.5) sont récupérées par le PSoC via une liaison I2C à une fréquence d'échantillonnage de 1000Hz. Le filtre de Madgwick *et al.* (2011) nécessite une fréquence de fusion des données au moins équivalente à la fréquence d'échantillonnage. Étant donné que le filtre fait beaucoup de calcul à une fréquence relativement élevée pour notre un système embarqué il est préférable ne pas surcharger le processeur c'est pourquoi le filtre est fait en externe dans un programme dédié sur un ordinateur.

3.2.4 Angles des doigts de la pince pour la saisie

Lors d'un dataset effectué au laboratoire, nous avons récupéré les données provenant des capteurs tactiles. Le but du dataset est de réaliser des "pick and place" (ramasser et placer) d' objets placés dans un bac et d'évaluer le taux de succès des prises tout en détectant d'éventuels événements tactiles. Environ 1000 ramassages ont été effectués avec différents objets de différentes formes, textures et masses. La détection de l'objet dans le bac est réalisée par une caméra Kinect. Un robot UR5 de Universal Robots sur lequel est monté la pince robotique avec les capteurs tactiles est utilisé pour récupérer les objets. Le pick and place se déroule en plusieurs phases : • approche de l'objet grâce à la vision ;

• préhension de l'objet avec la pince ;

• soulèvement de l'objet ;

• mouvement du robot pour évaluer la stabilité de la prise de l'objet ;

• Dépôt de l'objet dans le bac.

Les informations des capteurs tactiles sont récupérées tout au long de la manipulation. Grâce à l'ajout de l'IMU et au filtre de Madgwick il est possible de détecter le sous-actionnement des doigts de la pince en calculant la différence d'angle entre deux instants. La figure 3.6 montre la variation d'angle pour les deux capteurs. On y voit une variation d'environ 20 °pour le capteur S1 et 6 °pour le capteur S2. En comparant visuellement ses données avec la capture photo de la pince on peut voir qu'il y a bien un capteur (gauche sur la photo) qui est sous-actionné d'environ 20°tandis que le capteur de droite a quant à lui presque pas changé de position. Le léger sous-actionnement est dû à la forme en 'X' de l'objet saisie. Le doigt sous-actionné va avoir tendance à épouser la forme de l'objet qui est dans ce cas-ci un angle d'environ 20°. Le capteur de droite quant à lui a pris l'objet plus au dessus (au niveau de la tranche) c'est pourquoi le doit n'est quasi pas sous-actionné. Un autre exemple sur la figure 3.7 correspondant à un échec de saisie. Lors de la fermeture de la pince, le doigt est venu glisser sur la surface de l'objet et rentré en sous-actionnement complet. Il est très facilement détectable au niveau des données puisque la variation d'angle du capteur S2 est de 60°. On peut s'interroger quant à la

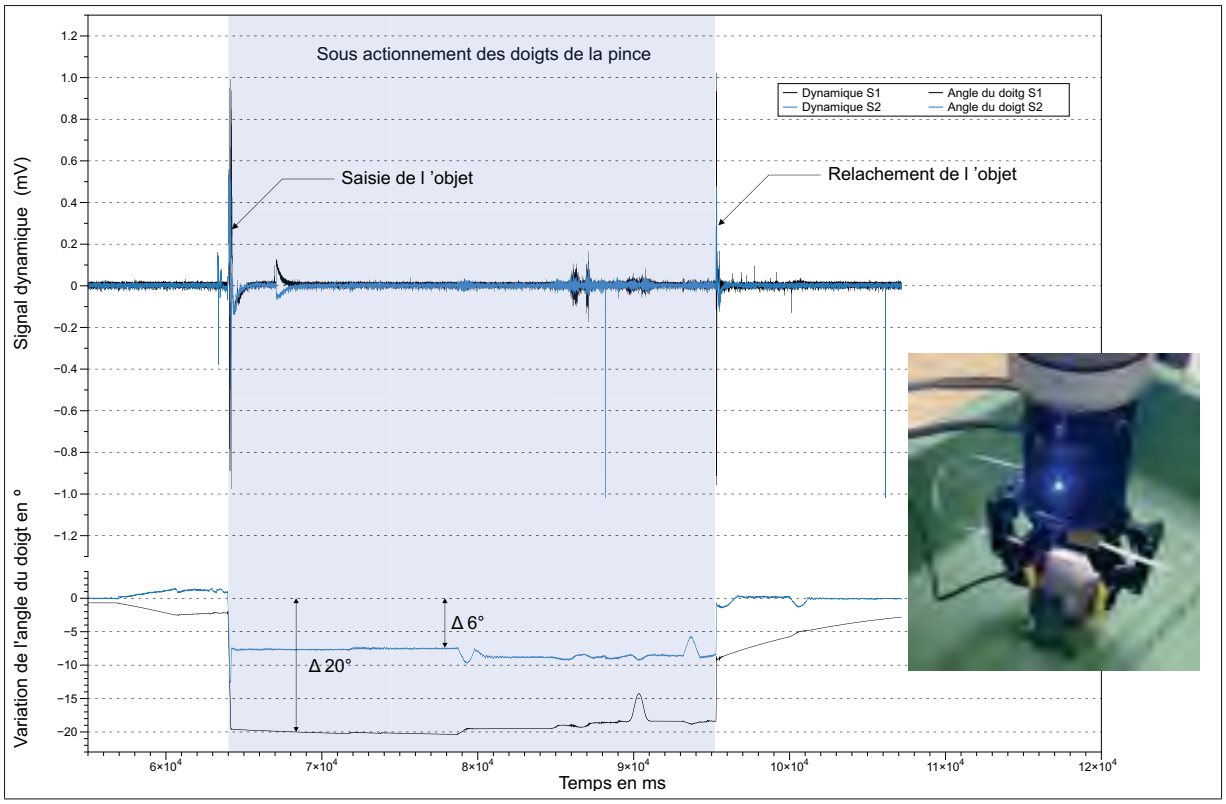


Figure 3.6 Exemple d'un léger sous actionnement

validité de l'algorithme de fusion de notre filtre. Si on regarde attentivement la capture photo, la variation de l'angle du capteur est d'environ 45°, hors notre filtre calcule une variation d'angle d'environ 60°, cette différence de 15°peut venir de plusieurs causes. La première serait une mauvaise calibration des accéléromètres et gyroscope ce qui fausserait légèrement les résultats. La deuxième raison serait qu'au moment du glissement de l'objet sur le doigt, la vitesse qui était quasi nulle est devenue grande dans un espace de temps très réduit se traduisant par une accélération élevé pour notre capteur qui à une gamme de fonctionnement jusqu'à 2g ou trop élevé comparer à la fréquence de fusion des données dans le filtre de Madgwick. Néanmoins ce cas ci intervient très rarement et même avec cette erreur, il est tout à fait possible de détecter le sous-actionnement des doigts de la pince.

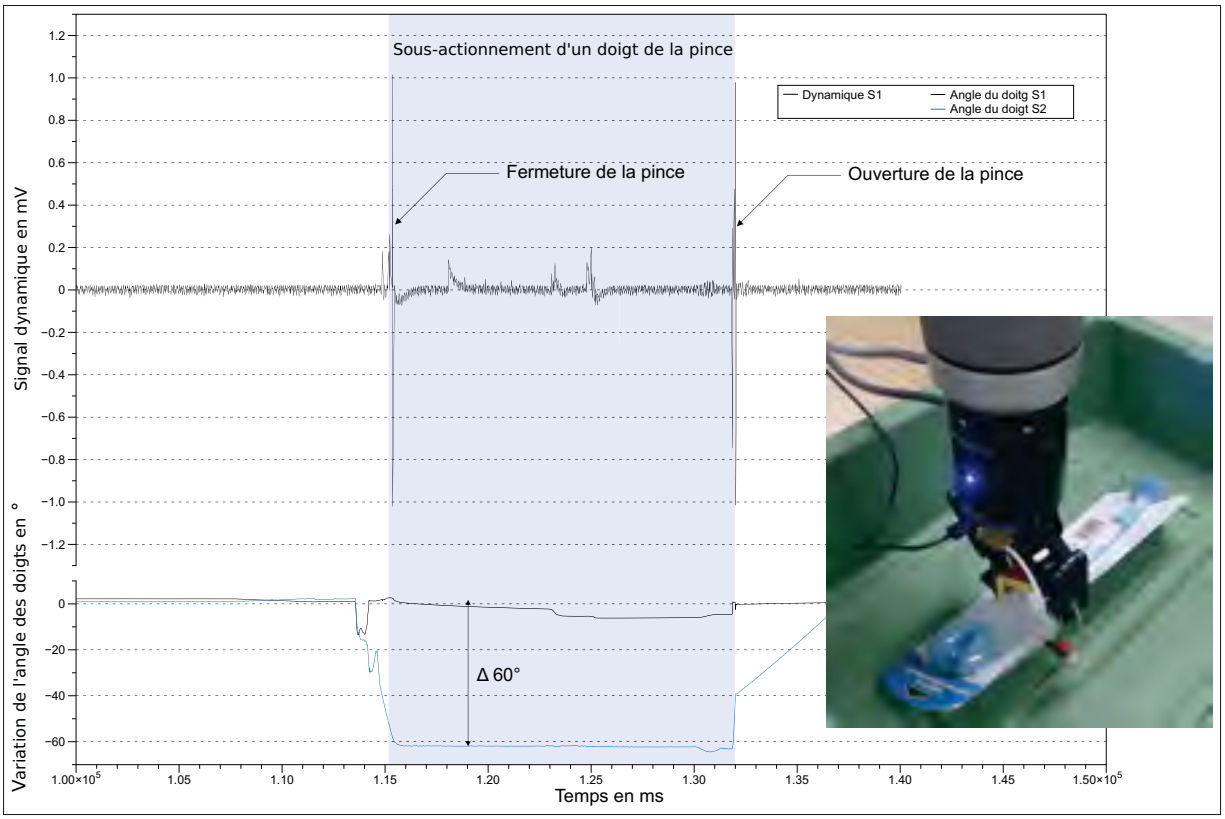


Figure 3.7 Exemple d'un sous actionnement maximale

3.3 Discrimination des vibrations externes avec l'accéléromètre

L'intégration du MPU-9250 au sein de notre capteur nous permet d'ouvrir de nouvelles perspectives.

Les manipulations robotiques qui impliquent le déplacement d'objets génèrent différents types d'événements dynamiques. Ceux-ci peuvent correspondre simplement à un mouvement normal lié robot, à un contact avec l'objet lors de la saisie, mais ils peuvent aussi être des événements potentiellement problématiques comme le glissement de l'objet dans la pince. La partie dynamique du capteur ne permet pas de distinguer tous ces événements c'est pourquoi l'ajout de l'IMU va permettre de corréler les données dynamiques avec les données des accéléromètres pour tenter de discriminer les vibrations externes.

Lorsqu'un objet dans la pince glisse sur un élément de l'environnement qui l'entoure comme une table ou un autre objet des vibrations vont apparaitre comme l'illustre la figure 3.8 .

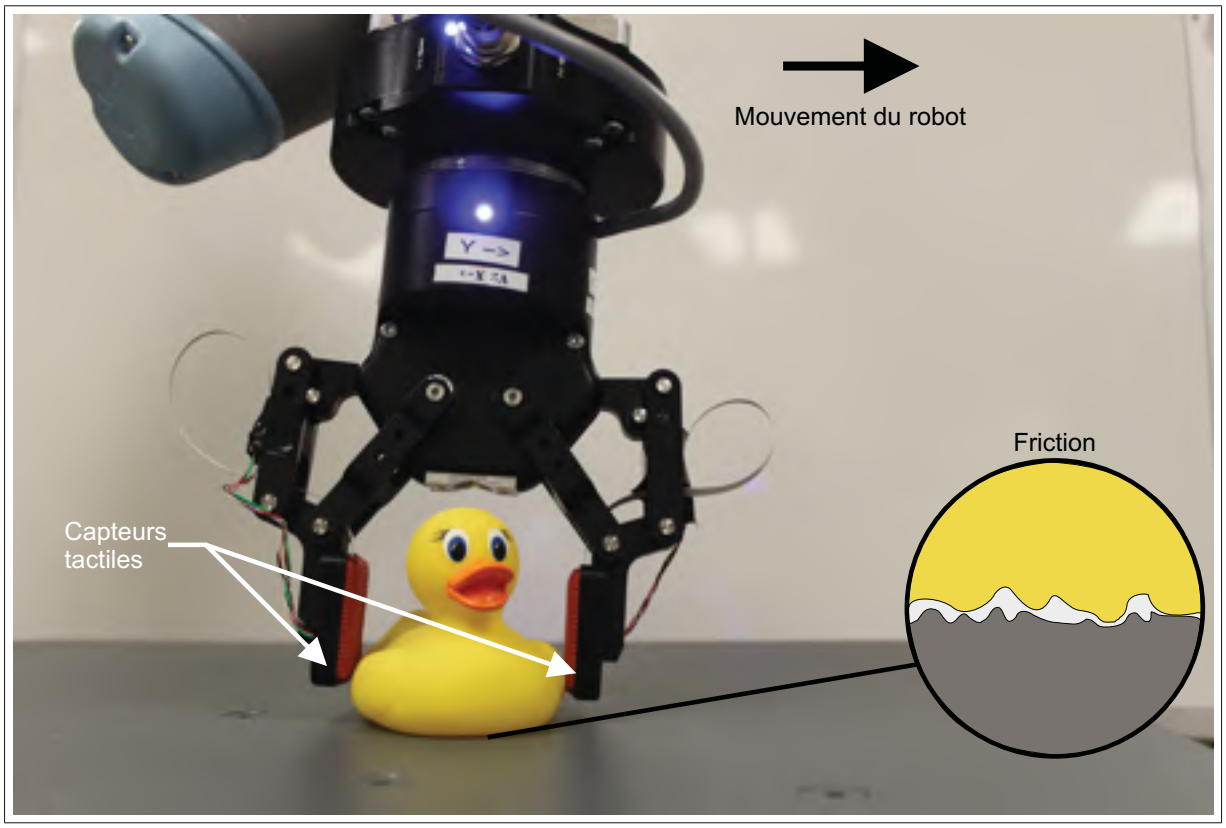


Figure 3.8 Frottements d'un objet sur une surface

De plus les moteurs intégrés dans la pince et le bras robotique créent des vibrations en bout de doigts. Lors d'un déplacement du robot, si un objet est dans la pince son inertie peut créer des vibrations qui s'apparenteraient à un glissement, mais qui n'en est pas réellement un .

Chez l'humain ce sont les FA-II qui sont reconnus pour être le canal tactile principal par lequel ces interactions sensorielles circulent. Les mécano-récepteurs FA-II répondent à des vibrations à haute fréquence dans une plage de 1 à 1000 Hz. Pendant une prise d'objet, ces récepteurs sont particulièrement utiles pour détecter un contact entre l'objet saisie et quelque chose de l'environnement.

Comme présenté au chapitre 1 nous avons vu que des accéléromètres était parfois utilisés pour détecter des événements dynamiques. C'est pourquoi l'ajout de l'IMU et donc des 3 accéléromètres intégré dans le boitier va nous permettre de récupérer des informations sur d'éventuelles vibrations externes auquel notre capteur serait soumis. Le signal de vibration des accéléromètres est calculé de façon à faire ressortir les vibrations sur les trois angles x,y et z en calculant la norme comme suivant :

$$\tilde{a_s} = \sqrt{(a_s x)^2 + (a_s y)^2 + (a_s z)^2}$$

Étant donné que les données de l'IMU sont déja filtrées à l'intérieur de la puce nous n'avons pas jugé nécessaire l'ajout d'un autre filtre.

En théorie les perturbations dues à un glissement d'un objet devraient être détectées par la partie dynamique et en revanche l'accéléromètre fixé au doigt de la pince ne devrait rien détecter. La réalité est un peu différente, lorsqu'un objet glisse dans la pince, le PCB va subir des micro vibrations que l'on peut détecter avec les accéléromètres.

La figure 3.10 représente les données de la partie dynamique et des accéléromètres des deux capteurs lors d'une saisie d'un objet. Au cours de cette manipulation, le mouvement du robot a provoqué la chute de l'objet. En regardant les données dynamiques, on peut voir le pic lorsque l'objet glisse des deux doigts de la pince. Si l'on s'intéresse au signal de l'accéléromètre, on peut voir qu'il à la même forme que le signal dynamique. En revanche on aperçoit tous les évènements lié au mouvement du robot ou de la pince. Le glissement de l'objet a eu lieu lors d'une phase de mouvement du robot pour évaluer la stabilité de la prise de l'objet dans la pince. Le robot translate et rotate sur les 3 axes pour voir si l'objet tombe ou non. Si on zoom sur la partie où à lieu le glissement de l'objet, on peux noter plusieurs choses. Premièrement on peut voir le pic sur le signal dynamique qui montre qu'on est capable de détecter le glissement de l'objet dans la pince. Juste après le glissement le signal redevient quasi nul ce qui montre que la partie dynamique n'est pas sensible au mouvement du robot. Sur le signal des accéléromètres,

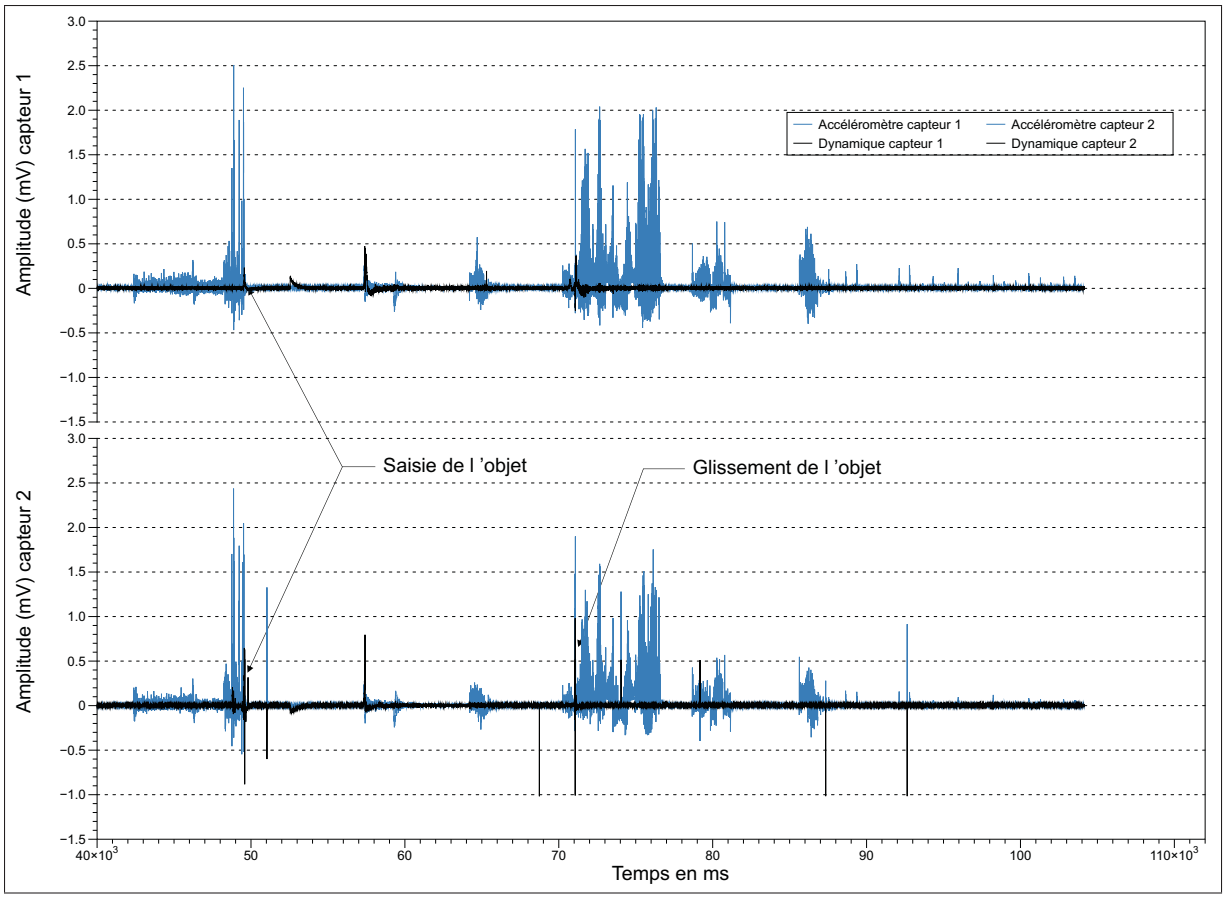


Figure 3.9 Signal dynamique du capteur avec les accéléromètres

on note que 900ms avant le glissement de l'objet le signal commençait déjà à varier. Les pics après le glissement correspondent au mouvement du robot.

Cette exemple nous permet de conclure sur l'utilisation des données des accéléromètres combiné au signal dynamique du capteur. Si l'accéléromètre est sensible aux vibrations et mouvements du robot il reste utile pour détecter le 'pré' glissement de l'objet grâce à son hypersensibilité. Quant à la partie dynamique, malgré sa sensibilité modeste elle permet de repérer le glissement sans être perturber par les mouvement du robot et de la pince.

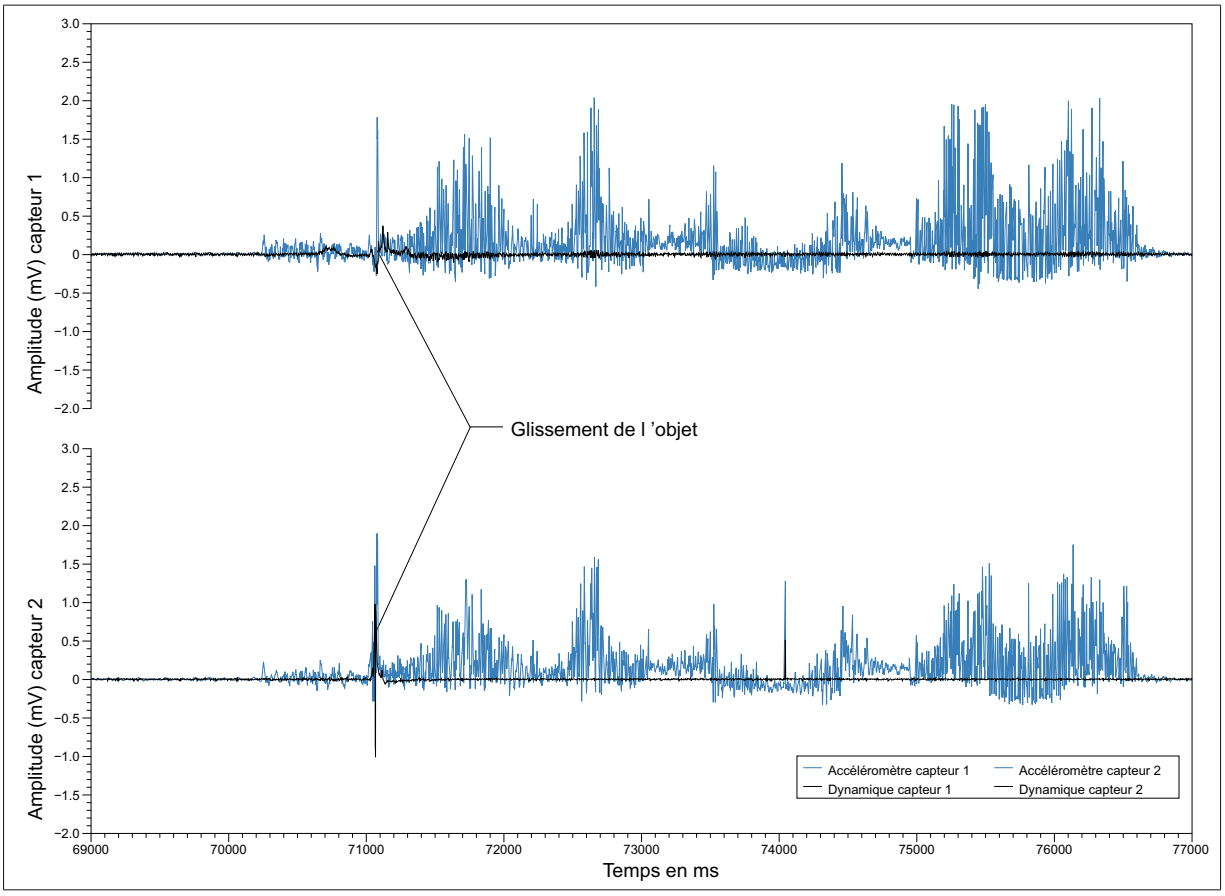


Figure 3.10 Zoom du signal dynamique du capteur avec les accéléromètres

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Un robot qui fonctionne dans le monde réel doit être en mesure de saisir rapidement une grande variété d'objets fermement, sans les laisser tomber, et délicatement, sans les écraser. L'utilisation des informations tactiles lors d'une saisie permet de réaliser plusieurs choses. La préhension sera plus efficace dans le cas où on utilise la répartition des pressions sur l'objet pour appliquer une force de préhension qui est d'environ 10 à 50% de plus que le montant minimum nécessaire pour éviter un glissement . L'information tactile permet aussi de maximiser la sécurité dans le cas où un robot travaillerai dans un environnement avec des humains.

Si l'on reprend les caractéristiques du capteur idéale énoncé au premier chapitre, notre capteur est capable de détecter des contacts et la libération d'un objet. La détection de la force pour la reconnaissance d'objet est correcte mais l'augmentation de la résolution spatiale serait un plus. La détection dynamique lors de manipulation d'objet est satisfaisante. Enfin l'ajout d'une unité de mesure inertielle nous permet de détecter les mouvements et les directions lors des manipulations.

Dans l'ensemble, chaque modalité du capteur développé fournit une information raisonnablement proche de la réalité. La résolution spatiale du capteur statique jumelé avec la détection dynamique fait de notre capteur multimodal un outil complet très adapté pour la manipulation d'objet.

Pour les travaux futurs, plusieurs recommandations peuvent être proposées. Premièrement, l'augmentation de la résolution du capteur statique peut être considérée dans le but d'être capable de reconnaitre des formes et des objets plus petits. Deuxièmement une étude plus approfondie est nécessaire pour connaitre la cause de la diaphonie entre la partie statique et dynamique pour qu'ils puissent enfin fonctionner en même temps. Enfin la sensibilité de la partie dynamique peut être améliorée pour mieux détecter le glissement.

Finalement, si nous voulions que le capteur devienne encore plus complet nous pourrions ajouter des unités thermo-sensibles comme l'utilisation de thermistances ou de thermocouples pour contribuer encore plus à la sensation tactile.

ANNEXE I

ANNEXE

1. Réponse des 28 taxels du capteur

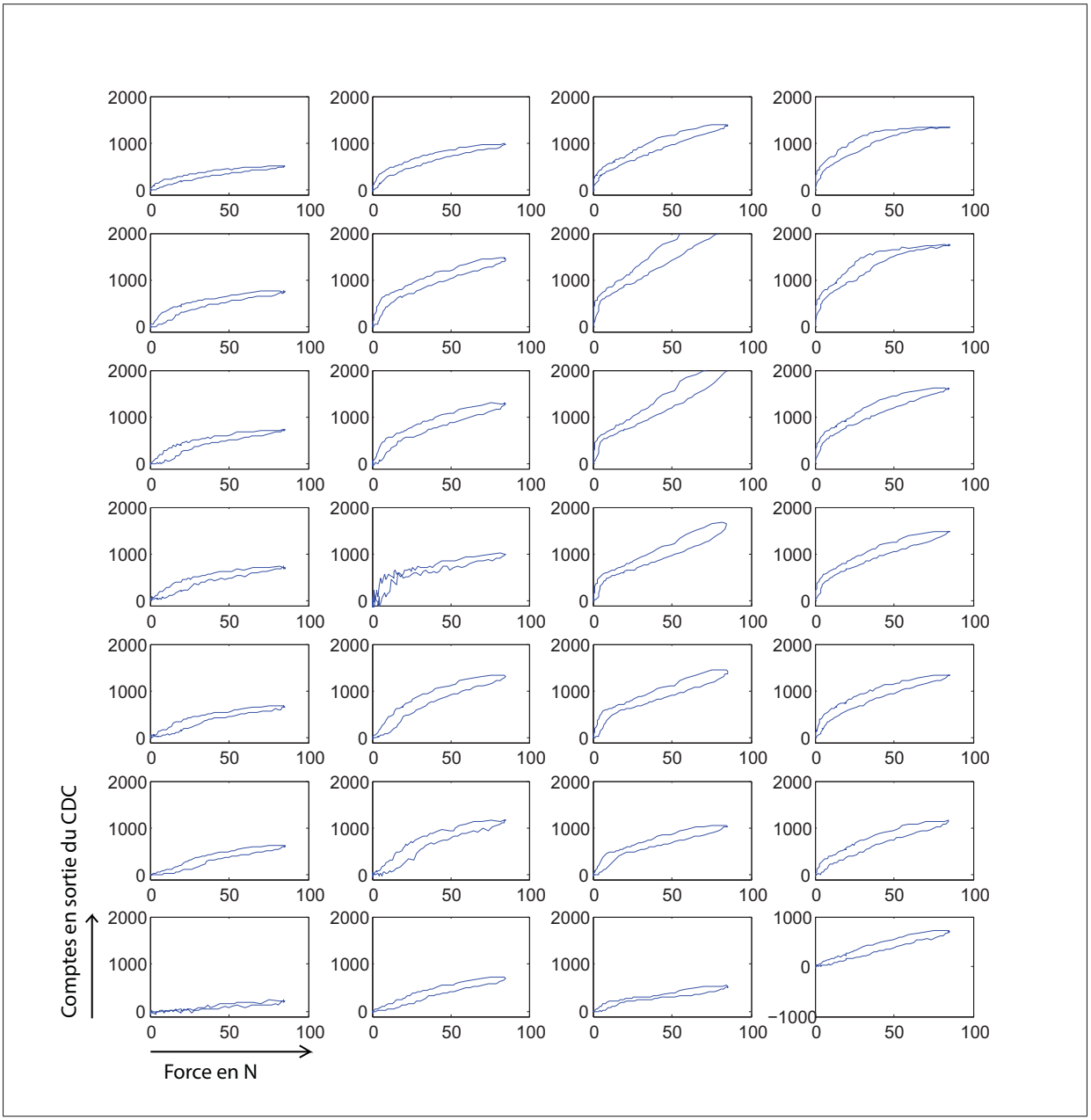


Figure-A I-1 Réponse des 28 taxels

2. Coefficients des polynômes des 28 taxels

$$y = p1 * x^3 + p2 * x^2 + p3 * x + p4$$

Ordre des coefficients : p1, p2, p3, p4

coef= [3.5928e-10, -2.7899e-05, 0.71897,-6144.5,7.2105 ;

3.332e-10,-2.0939e-05,0.4386,-3062.3, 10.105 ;

-2.7516e-10,2.9124e-05,-1.0048,11360, 13.697 ;

4.6862e-11,1.5271e-07,-0.058044,726.95,9.3031 ;

3.2861e-11,-8.2918e-07,-0.064723,1872.7,10.267 ;

2.7604e-10, -1.9925e-05,0.47568,-3750,13.662 ;

-3.2944e-10,2.2208e-05,-0.48192,3399.9,12.578 ;

-2.2616e-10,1.6634e-05,-0.38163,2799.3,10.275 ;

-2.573e-10,3.8637e-05,-1.9092,31125,11.595 ;

1.1081e-09, -5.6292e-05,0.95498,-5407.4,15.814 ;

-5.9485e-11,5.6927e-06,-0.13772,989.65,11.685 ;

1.626e-10, -6.1115e-06,0.064544,-129.13, 7.8439 ;

7.7489e-10,-0.00013887,8.2944,-1.6511e+05,11.813 ;

1.6504e-10,-5.656e-06,0.057356,-144.46,13.496 ;

-1.3595e-10,9.4889e-06,-0.19651,1271.3,14.228 ;

9.8748e-11,-2.6953e-06,0.0077138,163.23,12.995 ;

-5.8894e-10,0.00011242,-7.1313,1.5036e+05,13.366 ;

-9.908e-11,8.6571e-06,-0.21421,1628.5,51.429 ;

1.2668e-09,-9.3079e-05,2.2816,-18641,65.075 ;

3.476e-10,-2.7185e-05,0.70772,-6129.3,31.234 ;

-1.9956e-10,1.5362e-05,-0.37343,2920.5,14.001 ;

3.005e-10,5.9331e-05,-3.8763,83898,14.687 ;

2.8947e-10,-1.3714e-05,0.21483,-1111.2,58.444 ;

7.0264e-09,-0.00059217,16.618, -1.5527e+05,89.873 ;

3.473e-10, -6.0026e-05,3.4423,-65455,9.4079 ;

-3.4e-11,4.5299e-06,-0.13808,1222.5,8.5485 ;

-9.6343e-10,6.1408e-05,-1.2874,8897.7,68.129 ;

3.3453e-09,-0.00030802,9.4403,-96283,139.11 ;

]

BIBLIOGRAPHIE

Amarasinghe, Y. W. R., A. L. Kulasekera et T. G. P. Priyadarshana. Dec 2013. « Quantum Tunneling Composite (QTC) based tactile sensor array for dynamic pressure distribution measurement ». In *Sensing Technology (ICST), 2013 Seventh International Conference on*. p. 1-4.

Castelli, F. Oct 1995. « An integrated tactile-thermal robot sensor with capacitive tactile array », vol. 3. p. 1970-1975 vol.3.

Choi, Yunn-Hong et M. Skliar. May 2002. « Quantitative measurements of dielectric spectra using microdielectric fringe-effect sensors ». In *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301)*. p. 4285-4290 vol.5.

Dahiya, R. S., G. Metta, M. Valle et G. Sandini. Feb 2010. « Tactile Sensing 2014 ;From Humans to Humanoids ». *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, n° 1, p. 1-20.

Dunand, Philippe, 2000. *Tracé des circuits imprimés : compatibilité électromagnétique, parasites et perturbations des électroniques*, p. 1–147. Dunod, Berlin, Heidelberg. ISBN 2-10-002979-7.

Flanagan, J. R. et A. M. Wing. Dec 1993. « Modulation of grip force with load force during point-to-point arm movements ». In *Experimental Brain Research*. p. 131-143.

Guido, F., V. M. Mastronardi, M. T. Todaro, S. Petroni et M. De Vittorio. May 2014. « Piezoelectric soft MEMS for tactile sensing and energy harvesting ». In *2014 IEEE International Conference on IC Design Technology*. p. 1-4.

Hammond, F. L., R. K. Kramer, Q. Wan, R. D. Howe et R. J. Wood. Oct 2012. « Soft tactile sensor arrays for micromanipulation ». In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. p. 25-32.

Harmon, Leon D., 1984. *Tactile Sensing For Robots*, p. 109–157. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-642-82153-0. doi : 10.1007/978-3-642-82153-0_5. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-82153-0_5>.

Hosseini, Mehran. 2007. « A new formulation of fringing capacitance and its application to the control of parallel-plate electrostatic micro actuators ». *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 53, n° 2, p. 119-128.

Howe, Robert D. 1991a. « Dynamic tactile sensing ». <http://search.proquest.com/docview/303931409?accountid=27231>. Copyright - Database copyright ProQuest LLC ; ProQuest does not claim copyright in the individual underlying works ; Last updated - 2016-05-21.

Howe, Robert D. 1991b. « Dynamic tactile sensing ». <http://search.proquest.com/docview/303931409?accountid=27231>. Copyright - Database copyright ProQuest LLC ; ProQuest does not claim copyright in the individual underlying works ; Last updated - 2016-05-21.

Kleinhans, Gregor. 2015. « The skin as a sense and communication organ ». <http://www.skin-care-forum.basf.com/docs/default-source/Copyright/skin-care-forum_list-of-copyright-holders.pdf?sfvrsn=4>.

Krishna, G. M. et K. Rajanna. Oct 2004. « Tactile sensor based on piezoelectric resonance ». *IEEE Sensors Journal*, vol. 4, n° 5, p. 691-697.

Madgwick, S. O. H., A. J. L. Harrison et R. Vaidyanathan. June 2011. « Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm ». In *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. p. 1-7.

Milighetti, G., T. Emter, H. b. Kuntze, D. Bechler et K. Kroschel. Sept 2006. « Combined Visual-Acoustic Grasping for Humanoid Robots ». In *2006 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. p. 1-6.

Ohka, M., H. Kobayashi et Y. Mitsuya. Aug 2005. « Sensing characteristics of an optical three-axis tactile sensor mounted on a multi-fingered robotic hand ». In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. p. 493-498.

Rana, A., J. P. Roberge et V. Duchaine. 2016. « An Improved Soft Dielectric for a Highly Sensitive Capacitive Tactile Sensor ». *IEEE Sensors Journal*, vol. PP, n° 99, p. 1-1.

Romano, J. M., K. Hsiao, G. Niemeyer, S. Chitta et K. J. Kuchenbecker. Dec 2011. « Human-Inspired Robotic Grasp Control With Tactile Sensing ». *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, n° 6, p. 1067-1079.

Sabatini, Angelo Maria. 2011. « Kalman-Filter-Based Orientation Determination Using Inertial/Magnetic Sensors : Observability Analysis and Performance Evaluation ».

Schmidt, Peer A., Eric Maël et Rolf P. Würtz. 2006. « A sensor for dynamic tactile information with applications in human–robot interaction and object exploration ». *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, n° 12, p. 1005 - 1014.

Seminara, Lucia, Marco Capurro, Paolo Cirillo, Giorgio Cannata et Maurizio Valle. 2011. « Electromechanical characterization of piezoelectric {PVDF} polymer films for tactile sensors in robotics applications ». *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 169, n° 1, p. 49 - 58.

Son, J. S., E. A. Monteverde et R. D. Howe. May 1994. « A tactile sensor for localizing transient events in manipulation ». In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*. p. 471-476 vol.1.

Tuukkanen, S. et S. Rajala. Nov 2015a. « A survey of printable piezoelectric sensors ». In *SENSORS, 2015 IEEE*. p. 1-4.

Tuukkanen, S. et S. Rajala. Nov 2015b. « A survey of printable piezoelectric sensors ». In *SENSORS, 2015 IEEE*. p. 1-4.

Valenti, Roberto G., Ivan Dryanovski et Jizhong Xiao. 2015a. « Keeping a Good Attitude : A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs ». *Sensors*, vol. 15, n° 8, p. 19302.

Valenti, Roberto G., Ivan Dryanovski et Jizhong Xiao. 2015b. « Keeping a Good Attitude : A Quaternion-Based Orientation Filter for IMUs and MARGs ». *Sensors*, vol. 15, n° 8, p. 19302.

Yousef, Hanna, Mehdi Boukallel et Kaspar Althoefer. 2011. « Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics—A review ». *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 167, n° 2, p. 171 - 187.

Zhang, T., L. Jiang, X. Wu, W. Feng, D. Zhou et H. Liu. Aug 2015. « Fingertip Three-Axis Tactile Sensor for Multifingered Grasping ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, n° 4, p. 1875-1885.