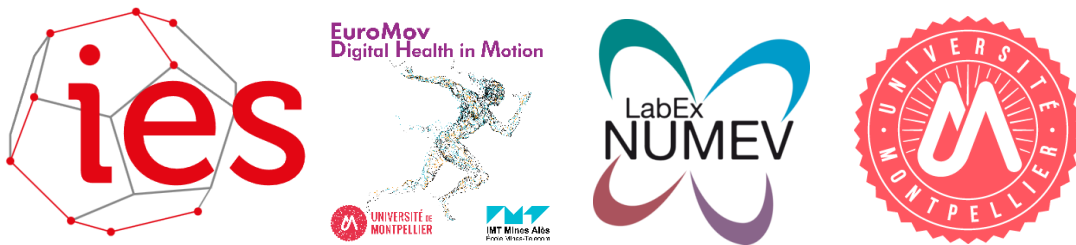


Master Electronique Energie Electrique Automatique.
Parcours : Capteurs Electroniques et Objets Connectés

Année 2023-2024

De l'université de Montpellier



Rapport sur le projet

**Identifier, évaluer la précision et la reproductibilité des
capteur électronique flexibles capable de mesurer la
raideur vertebrale**

par

Amine BEKDOUCHE

Tuteur : Ludovic MOLLE

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Contexte, problématique, hypothèse
- 3.1 État de l'art des capteurs électroniques de pression flexibles
 - 3.2.1 Introduction
 - 3.2.2 Caractéristiques métrologiques
 - 3.2.3 Critères de choix du capteur
 - 3.1.4 Présentation des capteurs industriels envisagés pour notre application
 - 3.2.5 Résumé
- 3.2 Etude de la technologie Qvar
 - 3.2.1 Introduction
 - 3.2.2 Materials
 - 3.2.3 Méthodes
 - 3.2.4 Résultats et discussions
 - 3.2.5 Perturbations détectées
 - 3.2.6 Résumé
- 4 Conclusion et Perspectives
- 5 Bibliographie
- 6 Abstract

Résumé

Dans le cadre de notre projet de développement de capteurs de pression flexibles, il est crucial de sélectionner les capteurs industriels les plus adaptés à notre application. Cette sélection repose sur une analyse approfondie des différentes technologies disponibles sur le marché. Nous avons ainsi identifié quatre technologies prometteuses : FlexiForce, Vélostat, peinture électrique de BareConductive et Qvar. Chacune de ces technologies présente des caractéristiques uniques et des avantages spécifiques qui répondent aux exigences de notre projet.

L'étude de la technologie Qvar a révélé que les tests de détection de toucher montrent une saturation du signal après contact avec le doigt, la détection de distance montre une augmentation de l'amplitude du signal avec la diminution de la distance entre le doigt et les électrodes, et la détection de pression indique que l'amplitude des oscillations est proportionnelle au poids exercé. Les perturbations observées incluent l'influence de l'alimentation à 50 Hz, le contact avec l'ordinateur, et la surface de contact avec le sol. Un inconvénient imprévisible est lié à la réponse du capteur face aux tests de pression, avec deux types de réponses observées.

1 Introduction

Je m'appelle Bekdouche Amine, étudiant en Master 1 en capteurs électroniques et objets connectés. J'ai réalisé mon stage sous la supervision de Ludovic Molle et Brice Sorli, en collaboration avec l'IES et Euromov DHM, et financé par le LabEx Numev. Ce stage, effectué en binôme avec ADDOU Zakaria, avait pour objectif de développer un capteur de pression flexible destiné à la pulpe digitale du doigt du clinicien.

- IES : Un spécialiste des composants et systèmes dans les domaines de l'électronique, de la microélectronique, de la photonique, de l'énergie, de la thermique et de l'acoustique, l'IES se distingue principalement par ses compétences dans le développement de capteurs et de systèmes pour des environnements hostiles ou extrêmes (armes, espace, mer et nucléaire). L'IES est reconnu comme un leader mondial dans quatre domaines clés : l'infrarouge, la fiabilité, les capteurs et le térahertz [1].
- Euromov DHM : L'unité de recherche mixte (tutelles : Université de Montpellier et IMT Mines Alès) EuroMov Digital Health in Motion vise à favoriser la fertilisation croisée de l'intelligence artificielle, des sciences du mouvement et de la santé pour comprendre la plasticité comportementale de l'homme afin d'améliorer sa performance sensorimotrice et d'envisager de nouvelles approches thérapeutiques, et y trouver une métaphore scientifique, source d'inspiration de nouvelles approches numériques [2].
- LabEx Numev : Solutions numériques et matérielles pour les sciences de l'environnement et de la vie (NUMEV) NUMEV est le Laboratoire d'Excellence (LabEx) de l'Université de Montpellier, se concentrant sur l'interaction entre les sciences informatiques et de l'ingénierie, et les sciences de la vie et de l'environnement, afin de favoriser l'émergence d'un cluster interdisciplinaire avec une visibilité internationale [3].

Pour commencer, j'ai défini le contexte du projet en m'inspirant de plusieurs thèses suggérées par notre tuteur, puis j'ai abordé la problématique et formulé une hypothèse. Ensuite, j'ai mené une recherche bibliographique exhaustive sur les capteurs de pression flexibles, en expliquant les avancées des technologies académiques, principalement capacitives, et industrielles, particulièrement le Qvar. J'ai ensuite présenté les résultats de l'étude du capteur Qvar et conclu avec les perspectives et un résumé des points essentiels abordés pour faciliter la lecture du rapport.

Bien que ce stage ait été réalisé en binôme, nos travaux étaient presque entièrement différents : j'ai choisi d'investiguer les capteurs capacitifs et le Qvar, tandis que Zakaria s'est concentré sur les capteurs piézorésistifs et le Vélostat.

2 Contexte, Problématique et Hypothèse

La lombalgie est un symptôme généralement caractérisé par une douleur dans la région lombaire du dos, causée par diverses anomalies ou maladies connues ou inconnues [4]. Cette douleur est souvent accompagnée d'adaptations biomécaniques complexes au niveau du rachis [5], notamment une altération de la raideur vertébrale, définie comme le rapport entre la force appliquée sur la vertèbre et son déplacement [6].

La médecine évolue avec le développement de nouveaux outils d'observation scientifique (dispositifs médicaux). Actuellement, pour diagnostiquer la lombalgie, les cliniciens se basent sur le sens subjectif du toucher (haptique), ce qui rend cette méthode dépendante de l'opérateur et limitée en termes de précision et de reproductibilité [7]. Bien que des systèmes de mesure robotisés offrant précision et reproductibilité aient été développés, ils sont difficiles à implémenter en routine clinique et coûteux, tant économiquement que logistiquement.

Dans ce contexte, ce projet vise à utiliser des capteurs de pression flexibles pour créer un nouveau dispositif médical fiable, économique et simple à implémenter en routine clinique, afin d'objectiver les examens cliniques pour diagnostiquer la lombalgie. Ce rapport a pour objectif d'identifier les technologies disponibles et d'évaluer leur possibilité d'implémentation.

3.1 État de l'art des capteurs électroniques de pression flexibles

3.2.1 Introduction

Dans le cadre de notre projet de développement de capteurs de pression flexibles, il est essentiel de sélectionner les capteurs industriels les plus adaptés à notre application. Cette sélection repose sur une étude approfondie des principes de détection possibles, ainsi que des différentes technologies disponibles sur le marché et dans le domaine académique. Nous avons identifié quatre technologies prometteuses : FlexiForce, Vélostet, peinture électrique de BareConductive et Qvar. Chacune de ces technologies présente des caractéristiques uniques et des avantages spécifiques répondant aux exigences de notre projet. Dans ce rapport, la technologie Qvar sera détaillée plus en profondeur que les autres.

3.2.2 Caractéristiques métrologiques

Pour la réalisation du cahier de charge, on a besoin de définir quelques caractéristiques métrologiques importantes pour notre étude.

- **Etendue de mesure** : Valeur absolue de la différence entre les valeurs extrêmes pouvant être prises par la grandeur à mesurer, pour lesquelles les indications d'un capteur, obtenues à l'intérieur du domaine nominal d'emploi en une seule mesure, ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée [11].
- **Portée minimale et maximale** : Valeurs de la grandeur à mesurer correspondant aux limites minimale et maximale de l'étendue de mesure [11].
- **Exactitude (précision)** : Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée [11].
- **Résolution** : Variation minimale de la grandeur mesurée décelable de l'indication du capteur.
- **Fidélité (reproductibilité)** : Qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des indications concordantes entre elles, les erreurs systématiques des valeurs variables n'étant pas prises en considération. D'après cette définition, la fidélité caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des indications qui ne sont pas entachées d'erreurs fortuites [11].

3.2.3 Critères de choix du capteur

Pour répondre à notre problématique, le choix du capteur doit se baser sur plusieurs critères essentiels. Tout d'abord, l'ODR (Output Data Rate) doit être suffisant pour estimer avec précision la pente de la courbe force/déplacement. Le coût est également un facteur important, et un capteur à faible coût serait idéal. En termes de performance, le capteur doit être fiable, flexible et applicable sur la pulpe digitale, avec une résolution inférieure à 500 pascals et une épaisseur de 0,5 mm. Enfin, il est crucial que le capteur soit respectueux de l'environnement (ACV : eco-friendly) pour minimiser l'impact écologique. Ces critères garantissent que le capteur choisi répondra efficacement à nos besoins tout en étant économique et durable.

3.2.4 Principes de détection

Plusieurs moyens pour mesurer la force existent, les capteurs les plus répondus pour la détection de la pression digitale sont de nature capacitive (variation de surface/distance), de nature résistive (piézorésistive), ou de nature électrique (triboélectrique, piézoélectrique). Dans notre étude on s'intéressera principalement au capteur capacitif.

- Capteur piézorésistif

Les capteurs piézorésistifs ont été commercialisés avant tous les autres capteurs de pression disponibles. Leur fonctionnement repose sur la variation de la résistance des matériaux due à leur déformation, ce qui se traduit par un changement des signaux électriques correspondants. Les capteurs piézorésistifs pour la peau électronique nécessitent à la fois flexibilité et sensibilité à la pression, contrairement aux capteurs de pression piézorésistifs traditionnels [9].

- Capteur triboélectrique

Les capteurs de pression flexibles et extensibles ont suscité un grand intérêt de recherche. Ils ont été appliqués dans divers domaines, tels que la surveillance de la sécurité par intelligence artificielle, la robotique, l'automatisation industrielle et les soins de santé. Récemment, les nanogénérateurs triboélectriques (TENG) ont montré d'excellentes performances dans la récolte d'énergie et la génération de signaux. Les TENG reposent sur l'effet de couplage de l'électrification et de l'induction électrostatique [9].

- Capteur piézoélectrique

Depuis quelques décennies, des études et des efforts intéressants ont été consacrés à l'utilisation de technologies auto-alimentées convertissant l'énergie mécanique en électricité. Récemment, les nanogénérateurs piézoélectriques flexibles ont été reconnus comme une méthode de récolte d'énergie compétitive en raison de leurs hautes performances. Les capteurs de pression piézoélectriques flexibles convertissent les stimuli mécaniques en signaux électriques [9].

- Capteurs capacitifs
 - Principe de fonctionnement

Les capteurs capacitifs flexibles peuvent convertir la force exercée en un changement de capacité. Ce principe est basé sur la formule suivante :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad 1$$

C : la capacité électrique

ε_0 : permittivité du vide

ε_r : permittivité de l'air

A : air partagée par les électrodes

d : distance entre les électrodes

○ Matériaux actifs

Pour améliorer les performances des capteurs en général, il est essentiel d'étudier les matériaux utilisés, car leurs propriétés physiques influencent directement les performances. Pour les capteurs capacitifs, l'attention se porte principalement sur le diélectrique et les conducteurs servant d'électrodes [9].

Concernant le diélectrique, plusieurs propriétés sont cruciales dans le développement des capteurs de pression flexibles, notamment la viscoélasticité et l'incompressibilité. Ces deux propriétés affectent la sensibilité et le temps de réponse. Le PDMS (polydiméthylsiloxane) est l'un des élastomères les plus couramment utilisés en raison de son faible module de Young (**Fig 1**), de son respect de l'environnement, de sa transparence inhérente, de son excellente perméabilité et de sa stabilité face à des facteurs environnementaux tels que l'humidité relative et la température. Pour améliorer les performances du diélectrique, l'utilisation de microstructures a été adoptée. Plusieurs structures ont été explorées, telles que les tissus, les pores, les microcylindres, les pyramides, les microsphères, les perles et les aiguilles [9].

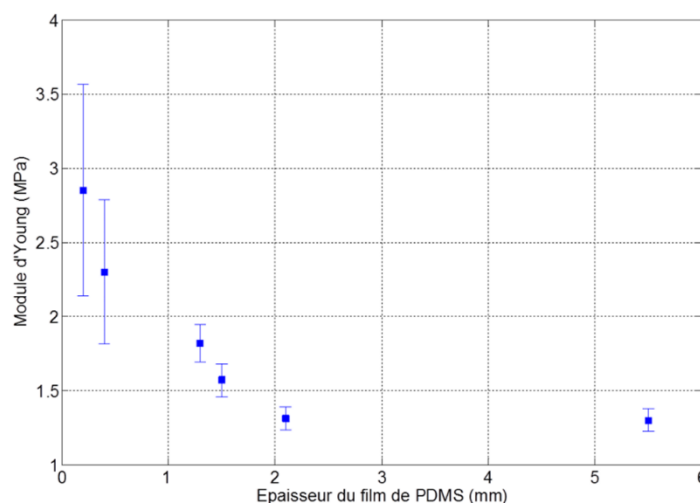


Figure 1 : Evolution du module d'Young en fonction de l'épaisseur du film PDMS [8]

Pour les électrodes, les recherches actuelles se concentrent sur les matériaux à base de carbone (comme les nanotubes), les hydrogels, les matériaux à base de métal (comme les nanofils) et les matériaux naturels. Les hydrogels sont utilisés pour leurs propriétés élastiques et conductrices, et sont particulièrement adaptés aux applications biomédicales [9].

En résumé, une revue datant de 2021 est donnée dans les références ou on peut trouver un tableau qui regroupe les résultats de plusieurs recherches avec différents matériaux et structures ainsi que leurs performances [10].

3.1.4 Présentation des capteurs industriels envisagés pour notre application

Plusieurs capteurs de pression sont disponibles commercialisés, pour notre projet on a opté pour quatre technologies : FlexiForce, Vélostat, peinture électrique de BareConductive, Qvar.



Figure 2 : Flexiforce (en haut à gauche), Qvar (en haut à droite), Vélostat (en bas à gauche), Peinture conductrice BareConductive (en bas à droite) [12] [14] [15]

- FlexiForce

Le FlexiForce est un capteur de résistance variable sensible à la pression, imprimé, ultra-fin et flexible, qui peut être facilement intégré dans des applications avec des contraintes d'espace strictes [12] (**Fig. 2**).

- Vélostat

C'est un film polymère noir en polyoléfine, imprégné de Carbone pour le rendre conducteur. Il est de nature piézorésistif avec une résistivité volumique de $500 \Omega \cdot \text{cm}^3$ [14] (**Fig. 2**).

- Peinture électrique (BareConductive)

La peinture électrique est non toxique, à base d'eau, soluble dans l'eau, et électriquement conductrice, destinée aux applications avec des circuits utilisant des basses tensions continues à faibles courants. La peinture électrique adhère à une grande variété de substrats et se retire facilement à l'eau. Elle est de couleur noire et peut être recouverte de tout matériau compatible avec une peinture à base d'eau [13] (**Fig. 2**).

- Qvar

Lorsqu'un matériau entre en contact avec un autre matériau ou une surface, on s'attend à ce qu'il acquière une charge électrique. Ce phénomène se produit fréquemment dans la vie quotidienne. Par exemple, lorsque vous marchez sur un sol en plastique et que vous touchez ensuite une poignée de porte métallique, vous ressentez une petite décharge électrique. De même, lorsque vous enlevez votre pull en laine, vous pouvez également ressentir une petite étincelle électrique [15].

La détection de cette charge est possible selon deux principes :

- Induction électrostatique : Se produit sans contact direct entre l'électrode et les particules.
- Transfert de charge : Se produit avec contact direct entre l'électrode et les particules.

Ce capteur est différent des capteurs capacitifs dans le sens où il est sensible au mouvement de l'objet chargé, tandis que dans un capteur capacitif, le champ électrique provient d'une électrode active.

Qvar est un capteur électrostatique de STMicroelectronics qui peut être utilisé pour la détection de présence et de mouvement humain, la détection tactile et les applications d'interface utilisateur (UI).

J'ai opté pour le choix de ce capteur principalement pour la sensibilité élevée et le coût bas que le capteur offre. Le capteur est d'origine électrostatique, ces types de capteurs sont moins communs et moins compris [15]; avec l'évolution de l'IA la possibilité de groupée une base de données pour caractériser les applications rend ce choix plus intéressant.

3.2.5 Résumé

- Caractéristiques métrologiques importantes : Étendue de mesure, portée minimale et maximale, exactitude (précision), résolution, et la fidélité (reproductibilité).
- Critères de choix du capteur : Une fréquence d'échantillonnage suffisante pour estimer la courbe force/déplacement. Un faible coût et un capteur fiable d'une résolution inférieur à 500 pascals, d'une épaisseur maximale de 0.5 mm, et eco-friendly.
- Principes de détection : Capteur piézorésistif (variation de résistance due à la déformation), capteur triboélectrique (utilisation de nanogénérateurs triboélectriques pour la récolte d'énergie), capteur piézoélectrique (conversion de l'énergie mécanique en électricité), et le capteur capacitif (variation de la capacité électrique due à la déformation).

- Matériaux actifs : Diélectrique (propriétés cruciales comme la viscoélasticité et l'incompressibilité, utilisation de PDMS et de microstructures). Électrodes (matériaux à base de carbone, hydrogels, métaux, matériaux naturels).
- Capteurs industriels envisagés :
 - FlexiForce : Capteur de résistance variable sensible à la pression, ultra-fin et flexible.
 - Vélostat : Film polymère noir en polyoléfine, piézorésistif avec une résistivité volumique de $500 \Omega \cdot \text{cm}^3$.
 - Peinture électrique (BareConductive) : Non toxique, à base d'eau, électriquement conductrice, utilisée pour des circuits à basses tensions continues et faibles courants.
 - Qvar : Capteur électrostatique de STMicroelectronics, sensible au mouvement de l'objet chargé, utilisé pour la détection de présence et de mouvement humain, la détection tactile et les applications d'interface utilisateur (UI). Choisi pour sa sensibilité élevée et son coût bas.

3.2 Etude de la technologie Qvar

3.2.1 Introduction

Dans ce chapitre, j'entamerai l'étude de la technologie Qvar en commençant par la description du matériel utilisé. Ensuite, je présenterai la méthode employée pour l'évaluation de la détection de pression ainsi que la structure du capteur choisie pour l'étude. En troisième lieu, je discuterai des résultats obtenus lors de mon étude. Cette partie est structurée de manière chronologique afin de montrer l'évolution des résultats et d'expliquer certaines décisions. Cette section se termine par les perturbations observées lors des mesures et comment les éviter, si possible. Enfin, comme dans le chapitre précédent, un résumé des points essentiels est fourni.

3.2.2 Materials

- STEVAL-MKI109V3

Le STEVAL-MKI109V3 (**Fig. 3**) est une plateforme de développement de STMicroelectronics conçue pour surveiller et évaluer les capteurs MEMS de ST. Il est compatible avec toutes les adaptateurs MEMS de ST et est alimenté par le microcontrôleur STM32F401VE ARM Cortex-M4. Il dispose d'un circuit d'alimentation réglable par logiciel, prend en charge les modes de données I2C et SPI, et peut être utilisé avec des logiciels PC comme Unico GUI pour analyser les données des capteurs [16].

- STEVAL-MKI223V1A

Le STEVAL-MKI223V1K (**Fig. 3**) est une carte de démonstration de STMicroelectronics, compatible avec la carte mère STEVAL-MKI109V3. Elle inclut le capteur de pression ILPS28QSW et le capteur électrostatique Qvar, et peut empiler des cartes d'électrodes comme STEVAL-MKE001A, STEVAL-MKE002A ou STEVAL-MKE003A [17].

- STEVAL-MKE002AA / STEVAL-MKE003AA

Les STEVAL-MKE002AA et STEVAL-MKE003AA (Fig. 3) sont des cartes d'électrodes développées par STMicroelectronics. La forme des électrodes dépend de l'application, en générale avoir des électrodes interdigitées améliore la sensibilité sauf pour le fonctionnement radar, la forme suggérée par ST est donnée sur la (Fig. 4) [15].



Figure 3 : Les cartes électroniques STEVAL-MKI109V3, STEVAL-MKI223V1A, STEVAL-MKE003AA / STEVAL-MKE002AA respectivement [16]



Figure 4 : La forme des électrodes suggérée par ST pour le mode radar [15]

- SCALTEC SAC 72

Le SCALTEC SAC 72 (Fig.3) est une balance avec une capacité de 3 000 grammes et une précision de 1 gramme.



Figure 5 : Balance SCALTEC SAC 72

3.2.3 Méthodes

- Structure du capteur

La structure du capteur (**Fig. 4**) que j'ai utilisée s'inspire du fonctionnement du capteur électrostatique, en particulier la variation de la constante diélectrique. L'idée est de faire varier cette constante en fonction de la pression, grâce à l'ajout d'un matériau diélectrique flexible. Dans notre cas, il s'agissait d'une mousse, qui se déforme sous pression tout en garantissant qu'il n'y a pas de contact avec les électrodes.

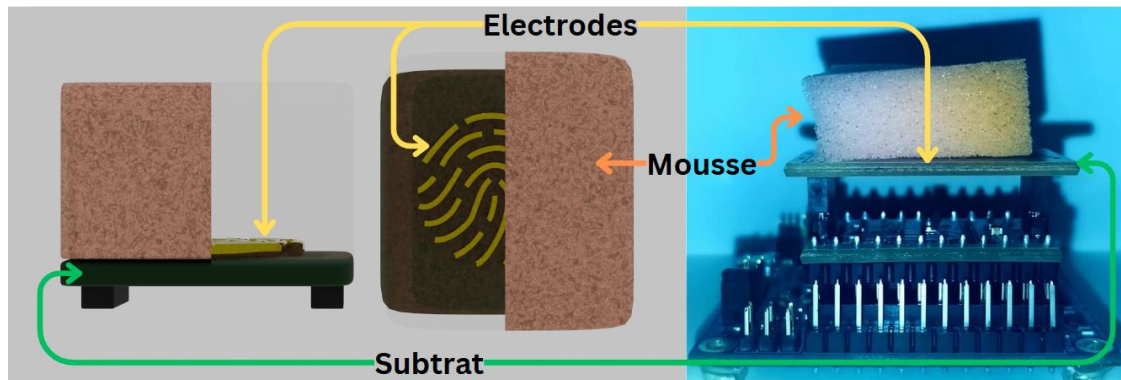


Figure 6 : Structure du capteur utilisée pour l'étude

- Montage de mesure

Le montage de mesure (**Fig. 5**) consiste à placer les cartes électroniques sur une balance afin de mesurer le poids exercé sur le capteur, lequel est lié à la force/pression appliquée par le doigt. La carte d'acquisition STEVAL-MKI109V3 est connectée à l'ordinateur, et grâce au logiciel Unico GUI, il est possible d'extraire facilement les données et de régler les paramètres du capteur placé sur la carte d'acquisition. La caméra est utilisée pour lire l'affichage de la balance et permettre d'avoir une acquisition du poids en temps réel.

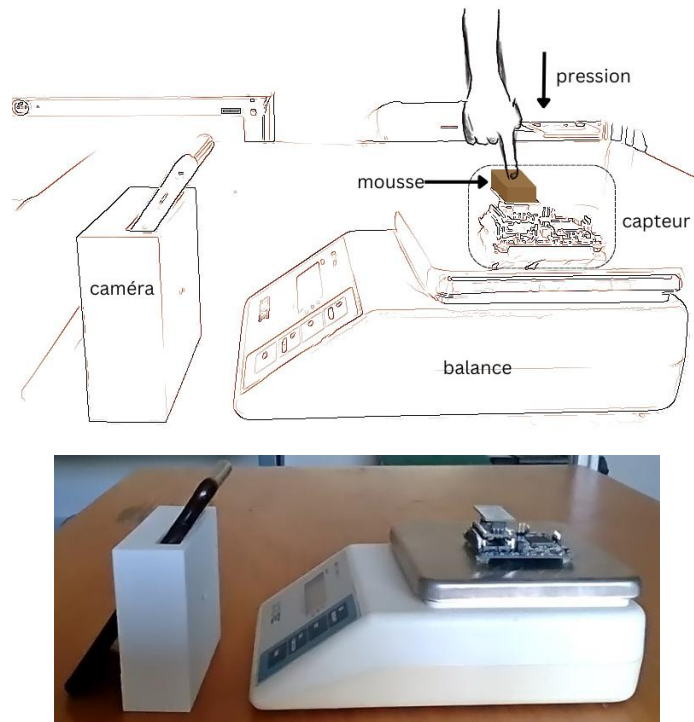


Figure 7 : Montage de mesure utilisée pour l'étude (diagramme schématisé en haut, photo réelle en bas)

3.2.4 Résultats et discussions

- Détection du toucher

Dans un premier temps, je voulais évaluer la capacité du capteur à détecter le changement de pression exercé sur ses électrodes. L'expérience consistait à déposer le doigt sur le capteur après avoir atteint la partie stable de la réponse, puis à augmenter progressivement la pression pour vérifier si le capteur est sensible à la pression (**Fig. 8**).

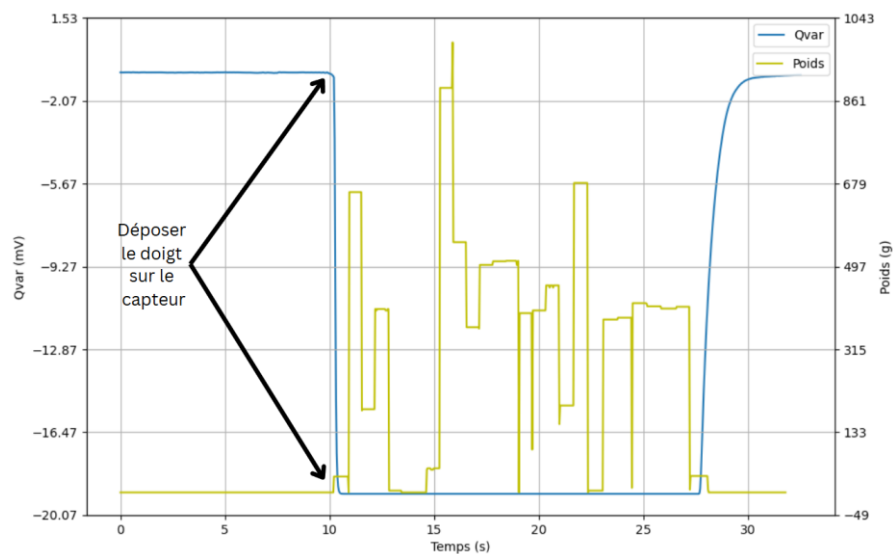


Figure 8 : Evaluation de la détection de pression avec le STEVAL-MKE002AA

On observe que le signal se sature immédiatement après le contact avec le doigt et en résultat ne donne aucune information à-propos la pression exercée.

La même expérience a été réalisé avec des électrodes couvertes pour éviter le contact direct avec les électrodes (**Fig. 9**).

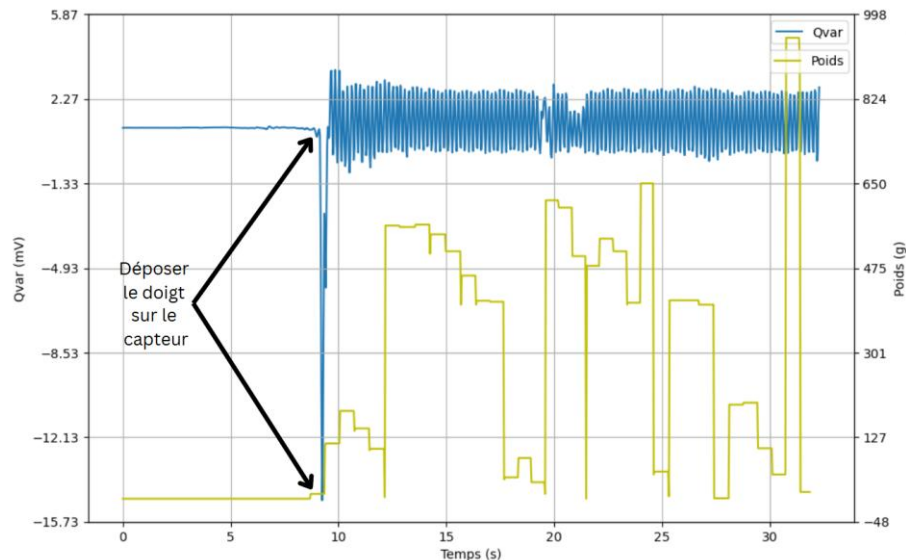


Figure 9 : Evaluation de la détection de pression avec le STEVAL-MKE003AA

De observe que la saturation est toujours présente sous la forme d'amplitude, pas de changement parant en fonction de la pression. La différence principale apporté par l'isolation des électrodes est les oscillations présente dans la réponse.

- Détection de la distance

Dans une deuxième partie, nous nous intéressons à vérifier la détection de la distance entre le doigt et les électrodes (**Fig. 10**), résultant du changement de la constante diélectrique. L'expérience consiste à approcher lentement le doigt vers le capteur Qvar et à faire une acquisition de sa réponse.

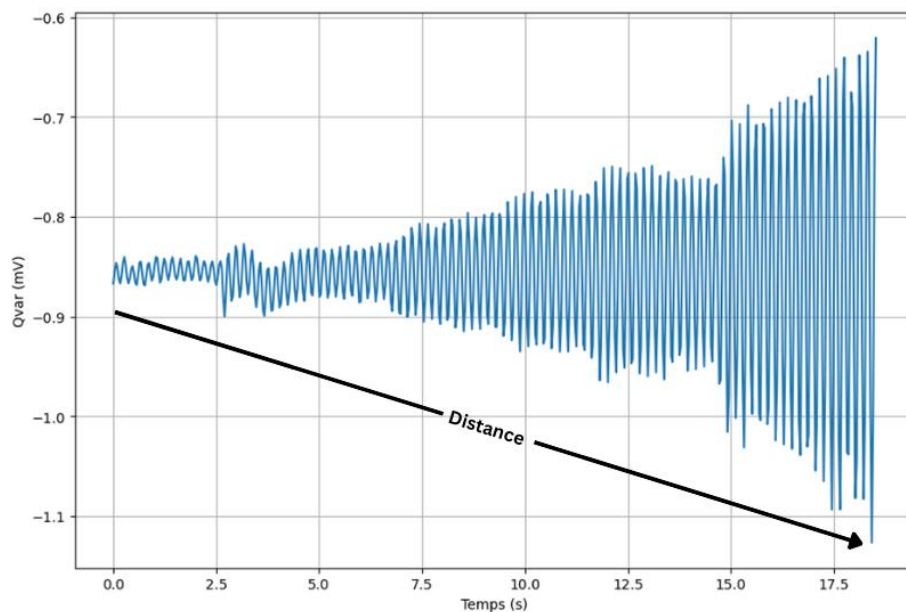


Figure 10 : Evaluation de la détection de la distance entre le doigt et les électrodes du capteurs STEVAL-MKE002AA

On remarque bien que lorsque la distance entre le doigt et les électrodes diminue le signal mesuré augmente en amplitude, ce changement est à la variation de la constante diélectrique causée par le corps humain.

- Détection de la pression

Dans cette partie j'ai entamé l'évaluation de la structure proposée précédemment avec le montage de mesure utilisé. Les résultats sont donnés dans la **Fig. 11**.

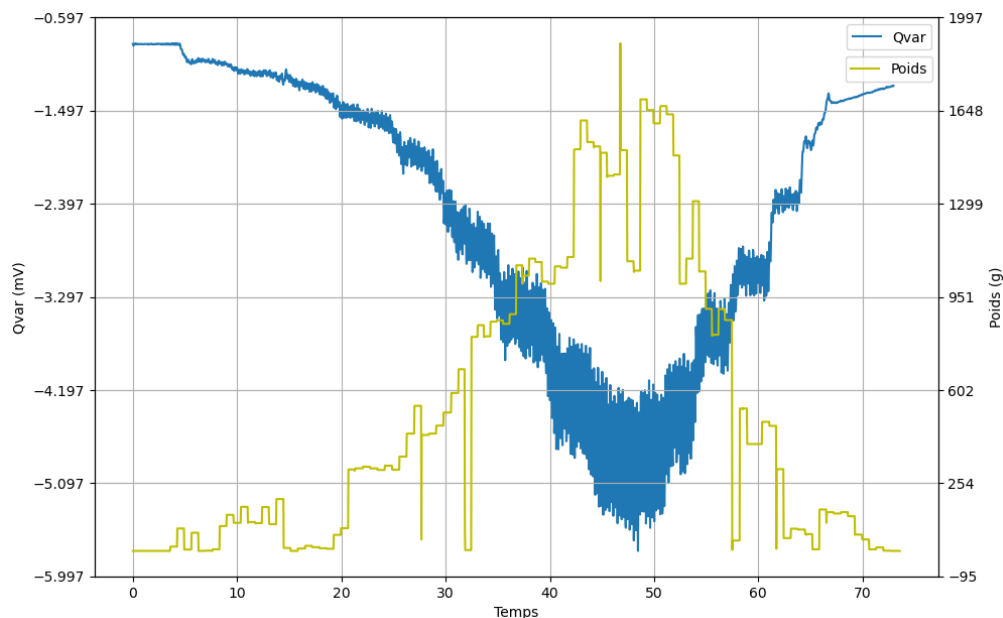


Figure 11 : Evaluation de la détection de pression avec la structure proposée en [Fig. 4](#)

On remarque deux grandeurs sensibles à la l'évolution de la pression qui sont l'amplitude des oscillations et la valeur moyenne (**Fig. 11**). On peut extraire ces deux grandeurs avec un traitement de signal. Sur l'annexe on peut trouver le code utilisé pour les extraire.

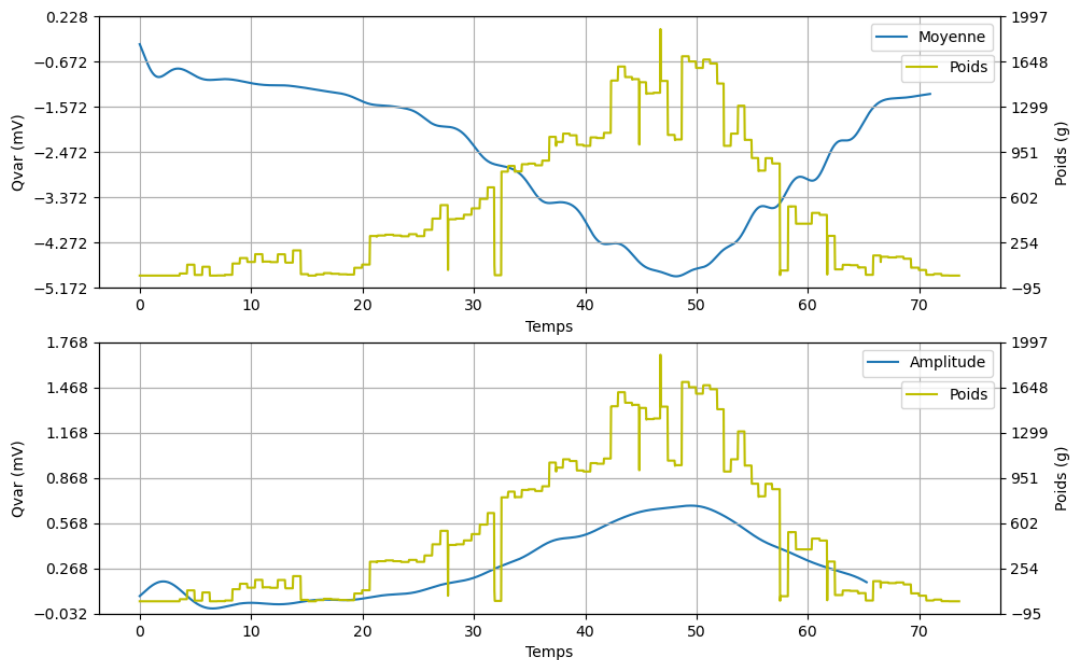


Figure 12 : Tracé de l'évolution de l'amplitude des oscillations ainsi que la valeur moyenne du signal Qvar de la Fig. 9

À partir de ces deux courbes, on peut observer que l'amplitude est proportionnelle à l'évolution du poids, tandis que la moyenne est inversement proportionnelle (**Fig. 12**).

Les fluctuations observées sur le signal représentant le poids sont liées au fait que l'humain peut difficilement exercer une force constante sur un objet sans variations, ce qui est visible ici. Les variations brusques vers zéro sont principalement dues au code et peuvent être améliorées avec plus de précision. Cependant, cela n'est pas nécessaire si le but est uniquement de vérifier la possibilité de détecter la pression.

3.2.5 Perturbations détectées

Des inconvénients du capteur ont été aperçus lors des acquisitions obtenues de nature environnementale principalement.

- Système d'acquisition

Une de ces influences était observée lorsque l'ordinateur était branché au 50 Hz. Cela se traduisait par l'ajout d'un signal sinusoïdale avec une fréquence de 50 Hz à l'acquisition (**Fig. 13**).

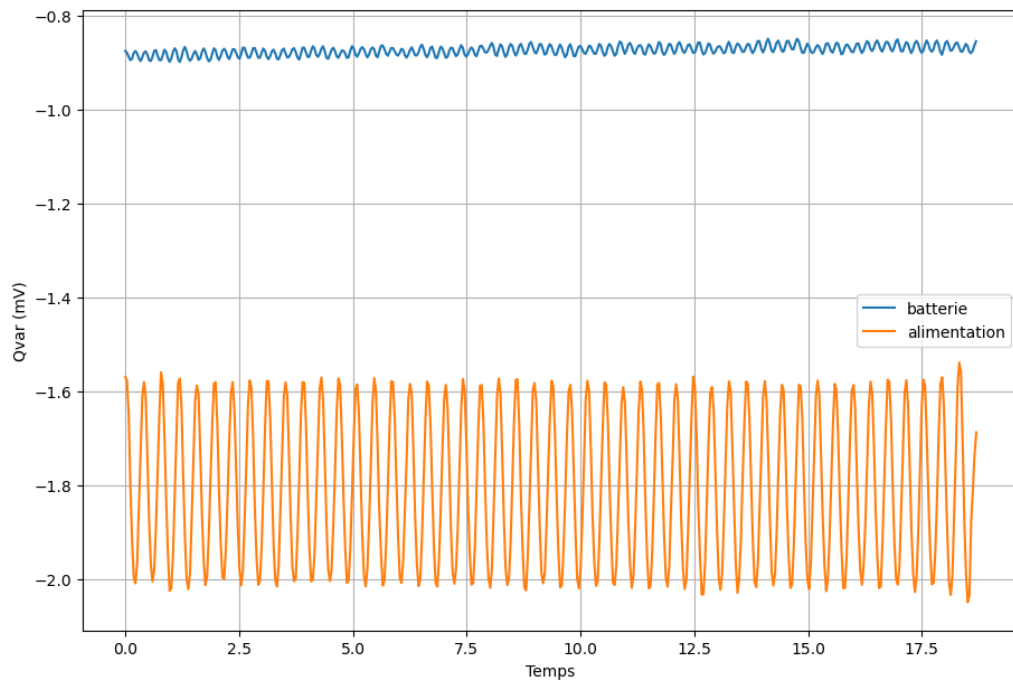


Figure 13 : Effet de l'alimentation sur le signal Qvar mesuré

Une autre était le contact avec l'ordinateur lors de l'acquisition. La **Fig. 14** montre l'influence du contact avec l'ordinateur lors de la mesure.

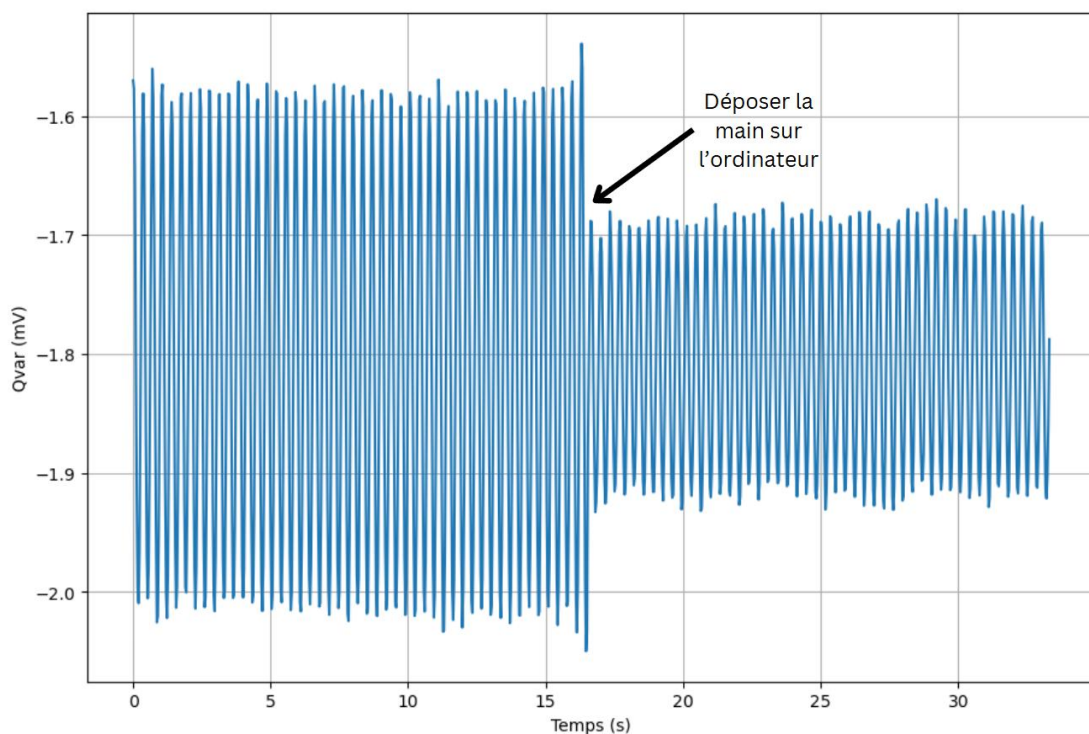


Figure 14 : Effet de toucher l'ordinateur lors de la mesure (source utilisée alimentation)

En observant ce graphe on peut facilement voir la diminution de l'amplitude des oscillations causée par le contact entre la main et l'ordinateur. Ce phénomène est lié à la

perturbation du champ électrique et peut être évité en utilisant la batterie comme source d'alimentation.

- Contact avec le sol

En plus le fait de changer la surface de contact avec la terre en autre soulever un pied ou faire en sorte que seul le talon touche le sol influence la réaction du capteur d'une manière dynamique. La **Fig. 15** montre la réponse du capteur au soulèvement et à la dépose périodique des deux pieds pour simuler le fait de marcher.

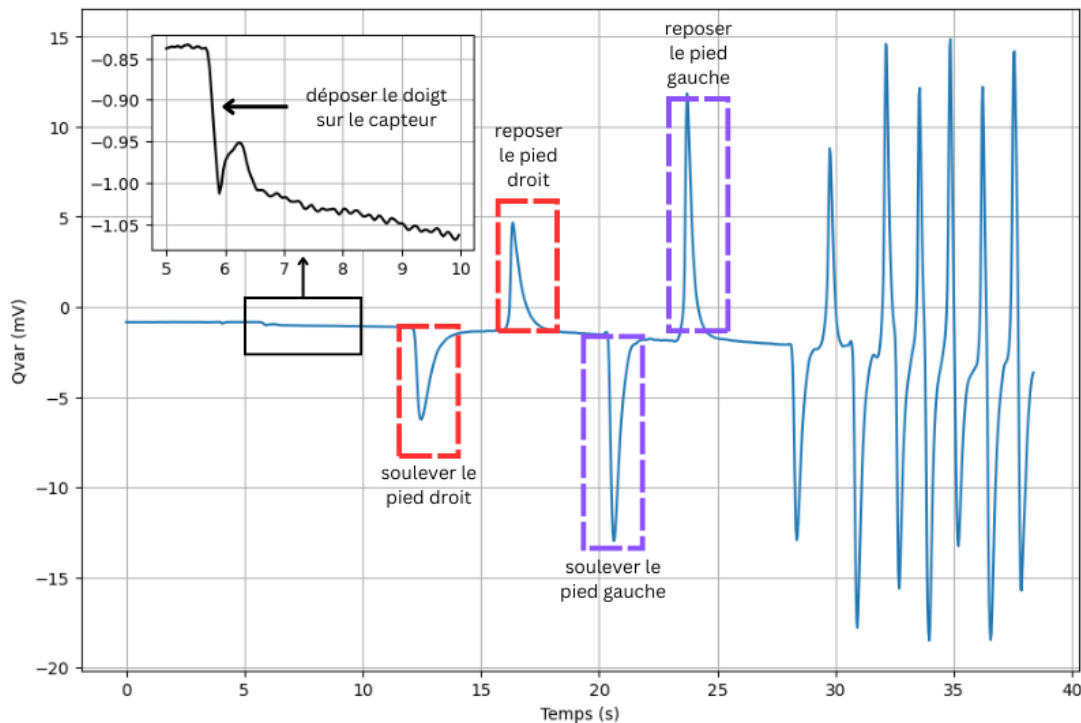


Figure 15 : Effet de la surface de contact avec le sol sur les mesures obtenue du capteur Qvar

Un autre inconvénient problématique, de nature inconnue pour l'instant, est lié à la réponse du capteur face aux tests de pression. Jusqu'à présent, deux types de réponses (**Fig. 11** et **Fig. 16**).

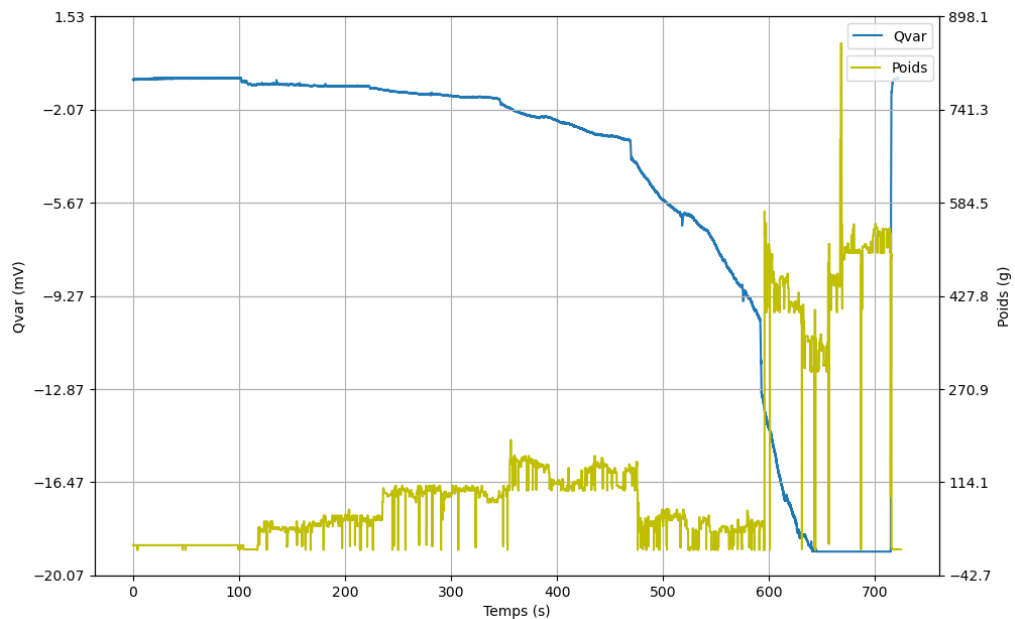


Figure 16 : Tracé montrant l'évolution en fonction de temps par rapport à la pression exercée (effet imprédictible)

Dans cette figure l'évolution est différente. On observe la disparition des oscillations et une pente décroissante après la stabilisation du poids qui tend vers la saturation du signal de sortie. La tangente de la pente dépend du poids exercé mais la saturation présente un problème néanmoins. Dans ce cas la détection se réalise de manière de manière quasi-dynamique.

Tous les inconvénients ont été prise en compte lors des acquisitions faites précédemment sauf pour le dernier qui est imprédictible.

3.2.6 Résumé

Dans ce chapitre, l'étude de la technologie Qvar est abordée en décrivant le matériel utilisé, la méthode d'évaluation de la détection de pression, et la structure du capteur. Les résultats montrent que :

- Les tests de détection de toucher montrent une saturation du signal après contact avec le doigt.
- La détection de distance révèle une augmentation de l'amplitude du signal lorsque la distance entre le doigt et les électrodes diminue.
- La détection de pression indique que l'amplitude des oscillations est proportionnelle au poids exercé alors que la valeur moyenne est inversement proportionnelle à l'évolution du poids.
- Les perturbations observées incluent l'influence de l'alimentation à 50 Hz, le contact avec l'ordinateur, et la surface de contact avec le sol.
- Un inconvénient imprévisible est lié à la réponse du capteur face aux tests de pression, avec deux types de réponses observées.

4 Conclusion et Perspectives

En conclusion, l'étude de la technologie Qvar a révélé plusieurs points clés :

- Les tests de détection de toucher montrent une saturation du signal après contact avec le doigt.
- La détection de distance indique une augmentation de l'amplitude du signal à mesure que la distance entre le doigt et les électrodes diminue.
- La détection de pression révèle que l'amplitude des oscillations est proportionnelle au poids exercé.

Les perturbations observées incluent l'influence de l'alimentation à 50 Hz, le contact avec l'ordinateur et la surface de contact avec le sol. Un inconvénient imprévisible est lié à la réponse du capteur lors des tests de pression, avec deux types de réponses observées. Cependant, il reste à calibrer le capteur plus précisément et à identifier la source de cette réponse imprévisible.

Enfin, je tiens à remercier avant tout mes deux encadrants, Brice Sorli et Ludovic Molle, pour leur encadrement ainsi que leurs précieux conseils techniques et humains. Je souhaite également exprimer ma gratitude au LabEx Numev pour avoir accepté cet appel à projet.

Je remercie également Arnaud Duperon, expert en médecine manuelle, pour avoir pris contact avec nous. Un grand merci à l'équipe d'Euromov et de l'IES, notamment Loris Copin, Chieck, Dialo, Khalido, Coralie, et tous les autres, pour leur soutien et leur collaboration.

5 Bibliographie

1. [Institute of Electronics and Systems \(IES\) - University of Montpellier \(umontpellier.fr\)](https://www.umontpellier.fr/)
2. [Euromov - UFR STAPS Montpellier \(umontpellier.fr\)](https://www.umontpellier.fr/)
3. [LabEx NUMEV \(umontpellier.fr\)](https://www.umontpellier.fr/)
4. Hartvigsen, J., Hancock, M. J., Kongsted, A., Louw, Q., Ferreira, M. L., Genevay, S., Hoy, D. & Karppinen, J. (2018). Series Low back pain 1 What low back pain is and why we need to pay attention. 391. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)30480-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)30480-X)
5. Panjabi, M. M. (2003). Clinical spinal instability and low back pain. *Journal of electromyography and kinesiology*
6. Byrne, R. M., Aiyangar, A. K., & Zhang, X. (2020). Sensitivity of musculoskeletal model-based lumbar spinal loading estimates to type of kinematic input and passive stiffness properties. *Journal of biomechanics*, 102, 109659.
7. Wong, A. Y., & Kawchuk, G. N. (2017). The clinical value of assessing lumbar posteroanterior segmental stiffness: a narrative review of manual and instrumented methods. *PM&R*, 9(8), 816-830.
8. Thi Hong Nhung Dinh. Etudes technologiques de composants PDMS pour applications biomédicales : développement de capteurs souples de pression par transfert de film. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paris Saclay (COMUE), 2015. Français.
9. Pierre Claver, U. and Zhao, G. (2021), Recent Progress in Flexible Pressure Sensors Based Electronic Skin. *Adv. Eng. Mater.*, 23: 2001187. <https://doi.org/10.1002/adem.202001187>
10. R. B. Mishra, N. El-Atab, A. M. Hussain, M. M. Hussain, Recent Progress on Flexible Capacitive Pressure Sensors: From Design and Materials to Applications. *Adv. Mater. Technol.* 2021, 6, 2001023. <https://doi.org/10.1002/admt.202001023>
11. [Capteurs - Définitions, principes de détection : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur \(techniques-ingenieur.fr\)](https://www.techniques-ingenieur.fr/)
12. [FLX Datasheet A201_RevI-3084736.pdf \(mouser.com\)](https://www.mouser.com/pdfdocs/FLX_Datasheet_A201_RevI-3084736.pdf)
13. [Bare Conductive](https://www.bareconductive.com/)
14. Ganna Pugach. Développement d'une peau artificielle pour l'apprentissage d'interactions physiques et sociales sur un robot humanoïde. Robotique [cs.RO]. Université de Cergy Pontoise ; Doneckij nacionalnij universitet (Ukraine), 2017. Français.
15. [an5755-qvar-sensing-channel--stmicroelectronics.pdf](https://www.stmicroelectronics.com/an5755-qvar-sensing-channel--stmicroelectronics.pdf)
16. [STEVAL-MKI109V3 - Professional MEMS tool: ST MEMS adapters motherboard based on the STM32F401VE and compatible with all ST MEMS adapters - STMicroelectronics](https://www.stmicroelectronics.com/STEVAL-MKI109V3 - Professional MEMS tool: ST MEMS adapters motherboard based on the STM32F401VE and compatible with all ST MEMS adapters - STMicroelectronics)
17. [steval-mki223v1k.pdf](https://www.stmicroelectronics.com/steval-mki223v1k.pdf)

6 Abstract

As part of our project to develop flexible pressure sensors, it is crucial to select the most suitable industrial sensors for our application. This selection is based on an in-depth analysis of the different technologies available on the market. We have identified four promising technologies: FlexiForce, Vélostat, BareConductive electric paint, and Qvar. Each of these technologies presents unique characteristics and specific advantages that meet the requirements of our project.

The study of Qvar technology revealed that touch detection tests show signal saturation after contact with the finger. Distance detection shows an increase in signal amplitude as the distance between the finger and the electrodes decreases. Pressure detection indicates that the amplitude of the oscillations is proportional to the applied weight. The observed disturbances include the influence of 50 Hz power supply, contact with the computer, and the contact surface with the ground. An unpredictable drawback is related to the sensor's response to pressure tests, with two types of responses observed.