

N° d'ordre : 3630

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

STRUCTURE DE RECHERCHE : Equipe de Sciences des Matériaux et Rayonnement

DISCIPLINE : Sciences de l'ingénieur

SPECIALITE : Electronique et Informatique Industrielle

Présentée et soutenue le : 03/06/2022 par :

Samia ACHOUCH

Conceptions et réalisations de capteurs et d'interfaces d'acquisition de données expérimentales – Application au MicroLabExAO

JURY

Mohammed Majid HIMMI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat	Président
Pierre NONNON	PES, Université de Montréal, Faculté des Sciences d'Education, Canada	Rapporteur / Examineur
Hafida IDRISSE AZAMI	PES, Université Ibn Zohr, Faculté des Sciences d'Agadir	Rapporteur / Examinatrice
Noreddine ZAHID	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat	Rapporteur / Examineur
Khalid TAGHZOUTI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat	Examineur
Mourad GHARBI	Expert, PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat	Examineur
Fakhita REGRAGUI	Experte, PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat	Examinatrice
Lhoussaine MASMOUDI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat	Co-encadrant
El Houssaine EL RHALEB	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat	Directeur de Thèse

Année Universitaire : 2021/2022

Dédicace

Je remercie mon mari Fahd, sans lequel je n'aurai pas eu assez de courage pour entreprendre mes études doctorales, je le remercie pour sa patience et sa générosité.

Je remercie mon fils Idder Yacine pour le bonheur qu'il m'a apporté et d'avoir été « sage » durant les moments difficiles. J'espère qu'il sera fier d'avoir passé la première année de sa vie avec sa mère dans un laboratoire de recherche.

Je remercie Laila Oubenaissa, qui était à l'origine de cette belle collaboration entre l'Université marocaine et l'Université de Montréal.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance :

A mes parents, mes sœurs, mon frère et mes nièces pour leurs amours et encouragements.

A Houssam et Jihane, avec qui j'ai commencé mes travaux de recherche et qu'ont beaucoup contribué à la réussite de ce projet.

A Rihab d'avoir pris le temps de réviser ce document mais aussi pour son amitié et d'avoir pris soin de mon fils durant mes réunions.

A Nezha, Soumia et Nadia pour leur soutien inestimable ainsi que toutes les belles choses que j'ai apprises auprès d'Elles.

A Zineb et Souad ainsi que tous les doctorants et professeurs de l'Université Mohammed V qui ont participé aux mises à l'essai des capteurs et interfaces réalisés.

A mes amies Hanae, Kaoutar, Hind et Manar pour leurs soutiens indéfectibles et à qui je souhaite une vie pleine de bonheur et réussite.

J'espère que tous vos efforts seront récompensés par la généralisation des résultats des travaux réalisés durant cette thèse au niveau des Universités et Ecoles Marocaines.

Tous les membres du Laboratoire Conception et Système pour leurs soutiens, mais aussi pour avoir accueilli chaleureusement mon fils au sein du laboratoire.

*A Fahd, Idder Yacine
et ma chère Bouchra*

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur **El Houssaine EL RHALEB**, professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité de directeur de thèse, de m'avoir encadré durant ma dernière année de thèse ainsi que pour le temps qu'il a consacré à la lecture et la révision de ce document.

Ainsi je tiens à remercier :

Monsieur **Lhoussaine MASMOUDI**, professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité de co-encadrant, de m'avoir co-encadré et de m'avoir continuellement encouragé ainsi que pour le temps qu'il a consacré à la révision de mes contributions scientifiques.

Monsieur **Mohammed Majid HIMMI**, professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité de Président, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être Président de mon jury de thèse. Ainsi que pour sa contribution à l'amélioration continue des résultats de ce projet.

Monsieur **Pierre NONNON**, Professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité de rapporteur / examinateur, à qui je témoigne toute ma reconnaissance d'avoir partagé généreusement les résultats de recherche de son laboratoire avec nous, ainsi que pour son engagement pour la réussite de mes travaux de recherche.

Madame **Hafida IDRISSE AZAMI**, professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité de rapporteur / examinateur, pour sa participation à mon jury et pour toutes les remarques intéressantes qu'elle m'a faites. Et aussi pour son engagement à implémenter les résultats de ce projet au sein de l'Université Ibn Zohr.

Monsieur **Noreddine ZAHID**, professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité de rapporteur / examinateur, pour sa participation à mon jury et pour le temps consacré à la lecture de cette thèse.

Monsieur **Khalid TAGHZOUTI**, professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité d'examineur, pour sa participation à mon jury et la patience qu'il a témoignée, vis-à-vis la mise à l'essai des protocoles expérimentaux. Ainsi que pour ses efforts pour que l'ExAO en Biologie à l'université marocaine soit aujourd'hui une réalité.

Madame **Fakhita REGRAGUI**, professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité d'experte, pour son soutien permanent et pour les remarques et suggestions pertinentes qu'elle m'a faites en vue d'améliorer mes contributions scientifiques.

Je tiens à remercier Monsieur **Mourad GHARBI**, professeur de l'enseignement supérieur et membre du jury de ma thèse en qualité d'expert, pour la confiance qu'il a en moi ainsi que pour son soutien et encouragements permanents. Aussi pour son esprit d'équipe, ses efforts et son engagement pour que le projet puisse atteindre ces objectifs.

Résumé

Au Maroc, après une restructuration des cursus universitaires et une massification des établissements à accès ouvert, l'enseignement pratique des sciences a été gravement négligé dans certains cas. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de développement, soutenu par le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, dont l'objectif principal est de développer du matériel d'enseignement performant à moindre coût. Notre choix s'est naturellement dirigé vers l'**Expérimentation Assistée par Ordinateur**. Ce travail de recherche s'est réalisé en quatre étapes. Après l'acquisition de la licence de la carte originale « MicrolabExAO », nous avons réalisé une carte d'acquisition dédiée au niveau secondaire. Dans un second temps, nous avons réalisé une multitude de capteurs en (physique, chimie, biologie, géologie...). L'ensemble a été validé par des protocoles expérimentaux. Dans un troisième temps, nous avons développé un capteur de pression par impression 3D et nous avons proposé une nouvelle structure permettant d'améliorer ses performances en termes de sensibilité et de linéarité en comparaison avec les structures proposées dans la littérature. La quatrième et dernière étape a été consacrée au développement de la carte d'acquisition « Recherche ». Cette carte dédiée au monde de la recherche est nettement plus performante en termes de vitesse d'acquisition et de stabilité.

Mots-clefs : Expérimentation assistée par ordinateur (ExAO), Enseignement des sciences, Travaux pratiques, Carte d'acquisition, Capteurs, Capteur de pression, Impression 3D.

Abstract

In Morocco, practical science teaching has been seriously neglected in some cases after restructuring university curricula and massifying open-access institutions. This thesis is part of a development project supported by the Ministry of Higher Education and Research, whose main objective is to develop efficient teaching material at a lower cost. Our choice was naturally oriented toward Computer-Assisted Experimentation. This research work was carried out in four stages: after the license of the original board, "MicrolabExAO," was acquired, we realized an acquisition board dedicated to the secondary level. A second time, we realized a multitude of sensors in (physics, chemistry, biology, and geology...). Experimental protocols validated the whole. In a third step, we developed a pressure sensor by 3D printing. We proposed a new structure to improve its performance in terms of sensitivity and linearity compared to the structures proposed in the literature. The fourth and last step was devoted to developing the "Research" acquisition card. This card dedicated to the research world is much more efficient in terms of acquisition speed and stability.

Key Words: Computer assisted experimentation (CAE), Science education, Practical work, Acquisition board, Sensors, Pressure sensor, 3D printing.

Table de matière

Dédicace	i
Remerciements.....	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des figures	viii
Liste des tableaux.....	xii
Introduction Générale.....	1
Chapitre 1 : État de l’art des technologies utilisées en enseignement.....	5
1. Introduction.....	6
2. Ordinateur et travaux pratiques	6
2.1. L’ExAO	6
2.2. La SAO	9
3. Technologie d’impression 3D et enseignement	10
3.1. Technologie d’impression 3D.....	10
3.2. Études de l’utilisation de l’impression 3D en enseignement.....	12
4. Conclusion.....	14
Chapitre 2 : Les interfaces d’acquisition	16
1. Introduction	17
2. L’interface d’acquisition.....	17
2.1. Contexte.....	17
2.2. Architecture de l’interface d’acquisition	17
2.3. Logique de fonctionnement	20
2.4. Le PIC 18F452.....	20
2.5. Port d’entrée de l’interface	22
2.6. L’amplificateur à décalage programmable	23
2.7. Les microcontrôleurs SAME70 et leurs avantages	23
2.8. Environnement de développement.....	25
2.9. Algorithme de l’application.....	25
3. Conclusion.....	31
Chapitre 3 : Protocoles et capteurs réalisés	32
1. Introduction	33
2. Les travaux pratiques en physique et les capteurs associés	33

2.1. Capsule universelle	33
2.2. Électricité : Caractérisation d'une photopile	34
2.3. Conduction thermique dans une barre métallique.....	37
2.4. Mécanique : Étude des mouvements cinétiques	40
2.5. Étude de la variation de l'indice de l'air par l'interféromètre de Michelson	46
2.6. Autres TP réalisés en physique	48
3. Les travaux pratiques en chimie et les capteurs associés.....	49
3.1. Titrage pH-métrique	49
3.2. Titrage Conductimétrique.....	52
3.3. Autres TP réalisés en chimie	53
4. Les travaux pratiques en biochimie et les capteurs associés.....	53
4.1. Évaluation de la cinétique et de la spécificité de l'enzyme Glucose Oxydase	53
5. Les travaux pratiques en biologie et les capteurs associés.....	55
5.1. Étude de l'activité de l'intestin, utérus et muscle strié.....	55
5.2. Étude des mouvements respiratoires et du contrôle nerveux de la respiration chez le rat.....	60
5.3. La respiration chez l'être humain.....	60
6. Conclusion.....	61
Chapitre 4 : Etat de l'art des capteurs de pression	62
1. Introduction	63
2. Réalisation des capteurs par technologie 3D	63
2.1. Méthodes de fabrication en impression 3D	63
2.2. Principe de détection et impression 3D	63
3. Capteurs de Pression réalisés par impression 3D	64
3.1. Fabrication de capteur de pression avec la méthode hybride	64
3.2. Fabrication de capteur de pression avec la méthode d'infusion de matériaux conducteurs	68
3.3. Fabrication de capteur de pression avec la méthode d'impression multi-matériaux ..	69
4. Utilisation du capteur de pression capacitif	70
4.1. Étude de la capacité en fonction de la pression : solutions analytiques dans le cas des petites et grandes déflexions	70
4.2. Structures de capteur de pression capacitif proposées dans la littérature.....	73
5. Conclusion.....	81

Chapitre 5 : Réalisation de capteurs de pression capacitifs avec impression 3D : Cas de grandes déflexions.....	83
1. Introduction	84
2. Process de fabrication	84
2.1. Imprimante 3D	84
2.2. Matériau de fabrication.....	85
3. Dimensionnement et assemblage du capteur : structure classique.....	87
3.1. Détermination des caractéristiques du capteur	87
3.2. Assemblage du capteur	88
3.3. Caractérisation du capteur	90
3.4. Utilisation du capteur réalisé dans une chaîne ExAO	92
4. Fabrication d'un capteur de pression à C_0 variable	94
4.1. Détermination des caractéristiques du capteur : structure à C_0 variable	94
5. Proposition d'un nouveau modèle.....	97
5.1. Réduction de la non-linéarité	98
5.2. Augmentation de la sensibilité.....	99
5.3. Calcul de la capacité de la nouvelle structure.....	100
5.4. Simulation.....	102
5.5. Amélioration de la structure proposée.....	104
5.6. Prototypes réalisés.....	106
6. Conclusion	108
Conclusion générale	109
Bibliographie	113

Table des figures

Figure 1 : Les éléments d'une chaîne ExAO.....	6
Figure 2 : Concept de lunette cognitive.....	7
Figure 3 : Processus de l'impression 3D.....	11
Figure 4 : Impression 3D : Principes de fabrication.....	12
Figure 5 : Image des interfaces, {a} l'interface « MicroLabExAO », {b} l'interface « Université » et {c} l'interface « Collège ».	18
Figure 6 : Reconnaissance de l'interface « Collège » et du capteur connecté.....	19
Figure 7 : Reconnaissance de l'interface « Université » et du capteur connecté.....	19
Figure 8 : PIC18F452 Block Diagram.	22
Figure 9 : Broches du connecteur USB3 destiné à connecter les capteurs à la carte.....	22
Figure 10 : Principe de l'amplificateur à décalage programmable.....	23
Figure 11 : SAME70 Block Diagram.....	24
Figure 12 : Algorithme du programme.....	28
Figure 13 : L'algorithme de l'application implémentée au niveau du logiciel d'acquisition.	29
Figure 14 : Schéma de la capsule universelle.....	34
Figure 15 : La variation du courant en fonction de la tension aux bornes d'une résistance variable alimentée par la photopile.	34
Figure 16 : Schéma et image du capteur de tension [-15,15] V.....	35
Figure 17 : Schéma et image du capteur de courant [-1,1] A.....	36
Figure 18 : Evolution de la température en 3 positions de la barre traduisant la diffusion de la chaleur.	37
Figure 19 : Caractéristique (Température, Résistance) de la thermistance [100] utilisée.....	38
Figure 20 : Schéma et image du capteur de température.....	39
Figure 21 : Etalonnage du capteur de température avec le logiciel pilote de l'interface.	40
Figure 22 : Schéma illustratif de l'expérience étudiée : "mouvement rectiligne uniformément accéléré".	41
Figure 23 : Graphique obtenu en utilisant la caméra infrarouge.	41
Figure 24 : Schéma du banc de mesure de distance et de vitesse.	42
Figure 25 : Schéma du changement de l'angle de vision en fonction de la position du mobile marqué par (Si,S(i+1)) avec $i = 1$ ou $i = 3$	44
Figure 26 : Acquisition des pixels lumineux avec l'interface MicroLabExAO.....	44
Figure 27 : Schéma de l'interféromètre de Michelson.....	46
Figure 28 : Variation d'intensité lumineuse lors de la variation de la pression dans la cuve.....	46
Figure 29 : Courbe d'étalonnage de la photorésistance.	47
Figure 30 : Schéma et image du luxmètre.	47
Figure 31 : L'évolution du pH en fonction du volume versé.	50
Figure 32 : Schéma et image du capteur de pH.	50
Figure 33 : Schéma et image du capteur de pression [0,4] kPa.	51
Figure 34 : Schéma et image du conductimètre.....	53
Figure 35 : La cinétique de la réaction Glucose oxydase et son substrat : le glucose.	54
Figure 36 : Schéma de principe de l'électrode Clark.....	54
Figure 37 : Schéma et image du capteur d'Oxygène dissout.	55

Figure 38 : Image du système d'acquisition utilisé en biologie.	56
Figure 39 : Tracé du myographe.	56
Figure 40 : Graphique obtenu avec capteur de petits mouvements, mettant en évidence la possibilité d'agrandir les graphiques obtenus.	57
Figure 41 : Schéma du levier mécanique.	58
Figure 42 : (a) Schéma et (b) image du circuit électronique du capteur de petit mouvement.	59
Figure 43 : Dessin 3D du capteur de petit mouvement. (a) vue de dessus. (b) vue arrière. (c) vue de droite.	59
Figure 44 : Image du capteur de petit mouvement réalisé.	60
Figure 45 : Images de la chambre de Venturi montrant les orifices dans lesquelles les capteurs seront connectés.	61
Figure 46 : (a) Une vue schématique du capteur de pression FBG, (b) conception du prototype en PLA, (c) installation du FBG, et (d) le capteur de pression du FBG après fabrication. (Unité : mm).	65
Figure 47 : (a) Une vue schématique du capteur de pression FBG, (b) Capteur de pression FBG pendant l'impression à l'intérieur de l'imprimante 3D, (c) Capteur de pression FBG à l'intérieur de l'imprimante 3D, et (d) capteur de pression FBG après impression.	65
Figure 48 : Capteur capacitif imprimé 3D mis en œuvre a) plaque inférieure fabriquée, b) plaque supérieure fabriquée, c) assemblage des plaques inférieure et supérieure fabriquées, d) vue de profil du capteur assemblé.	66
Figure 49 : Image CAO des plaques supérieure et inférieure proposées du capteur de pression.	66
Figure 50 : Vue partielle en demi-section du modèle 3D du substrat du capteur.	67
Figure 51 : Photographie de deux chambres de pression imprimées en 3D avec connecteurs fluidiques, jauge de contrainte résistive sérigraphiée et connexions électriques (à droite).	67
Figure 52 : Photos (a) du substrat du capteur pendant l'impression à base de DLP ; (b) du substrat du capteur après impression et rinçage ; (c) du capteur de pression après sérigraphie des fils d'argent ; (d) du capteur de pression après sérigraphie des piézorésistance au carbone, (e) du capteur de pression fabriqué.	68
Figure 53 : Exemple de dispositif de mesure montré pour le capteur de pression en céramique.	69
Figure 54 : design de capteur de pression composé de 4 taxels ;(a) model 3D du capteur, (b) vue de côté du schéma diagramme du capteur ;(c) vue éclatée du capteur [134].	70
Figure 55 : photos d'un exemple de capteur de pression à quatre taxels [134].	70
Figure 56 : Schéma synoptique d'un capteur de pression.	71
Figure 57 : Schéma de coupe du capteur en fonctionnement.	71
Figure 58 : Relation (déflexion, distance par rapport au centre), (a) dans le cas d'une membrane plate,(b) dans le cas d'une membrane avec bosse centrale.	74
Figure 59 : Schéma vue de coupe d'une membrane à surface ondulée et ses paramètres caractéristiques.	75
Figure 60 : Relation (Pressure, déflexion) de membranes plates et ondulées.	76
Figure 61 : Schéma d'un capteur de pression en peigne conventionnel.	77

Figure 62 : Structure à peigne avec couplage mécanique l'élément de détection mécanique de l'élément de détection électrique.....	78
Figure 63 : structure du capteur de pression capacitif proposé par [148], (a) vue de dessus de la structure du capteur, (b) vue de coupe de la structure.....	78
Figure 64 : structure du capteur de pression capacitif proposé par [149], (a) vue de la structure du capteur, (b) vue de coupe de la structure.	78
Figure 65 : structure du capteur de pression capacitif proposé par [150], (a) vue de coupe de la structure, (b) vue de la structure du capteur.	79
Figure 66 : Relation (capacité, pression) pour le capteur de pression capacitif proposé par [150], cas de membrane ayant un rayon égal à 90 μm et une membrane mobile ayant un diamètre de 150 μm	80
Figure 67 : Relation (capacité, pression) pour le capteur de pression capacitif proposé par [150], cas de membrane ayant un rayon égal à 100 μm et une membrane mobile ayant un diamètre de 150 μm	80
Figure 68 : structure du capteur de pression capacitif proposé par [151].	81
Figure 69 : Image de l'imprimante 3D utilisée.	84
Figure 70 : Schéma et dimensions de l'échantillon imprimé.	86
Figure 71 : Simulation par éléments finis de la déflexion de la membrane imprimée, montre une déflexion maximale au centre égale à 130 μm sous 9 kPa [160], [161].	87
Figure 72 : Comparaison entre la déflexion en régime des petites et grandes déformations en fonction de la pression.....	88
Figure 73 : dessin 3D du capteur de pression.	89
Figure 74 : Images du capteur imprimé en 3D, {a} différentes parties du capteur avant d'être assemblé, {b} capteur assemblé[160], [161].	90
Figure 75 : Schéma du dispositif expérimental de la caractérisation du capteur de pression réalisé.	90
Figure 76 : Dispositifs expérimentales de la caractérisation du capteur de pression réalisé.....	90
Figure 77 : Réponse du capteur imprimé en 3D à température ambiante[160], [161].....	91
Figure 78 : Circuit de conditionnement pour le capteur fabriqué. Le capteur est modélisé avec une capacité variable (Csensor).	93
Figure 79 : Calcul de volume d'eau avec le capteur fabriqué [160], [161].	94
Figure 80 : Simulation de la réponse du capteur de pression à C_0 variable, pour différentes valeurs de « di » [160], [161].	95
Figure 81 : Réponse à température ambiante du capteur ayant C_0 variable, imprimé en 3D [160], [161].	95
Figure 82 : Les réponses obtenues des capteurs capacitifs imprimés en 3D à température ambiante. La courbe bleue correspond à la réponse du capteur avec C_0 fixe et la courbe orange correspond aux résultats pratiques du capteur avec C_0 variable.	97
Figure 83 : Réponse (capacité, pression) de capteurs de pression pour différentes valeurs de distance inter-armature d.	97
Figure 84 : Schéma de coupe d'un capteur de pression, montrant la grande contribution de la région $[0, R/n]$ par rapport aux bords de la membrane	98
Figure 85 : Réponse de Capteurs de pression capacitifs ayant une zone $[0, R/n]$ non conductrice.....	99

Figure 86 : Présentation en coupe du capteur : en haut, Présentation de la structure classique avec la zone $[0, R/n]$ non métallisé. En bas, la nouvelle forme de capteur : en gris métallisation en aluminium et en doré métallisation en Or.	99
Figure 87 : Schéma de la membrane fixe du capteur de pression à d non-uniforme.	101
Figure 88 : Algorithme de l'application permettant de déterminer les paramètres (n et d) optimaux de la nouvelle structure.	102
Figure 89 : Image de l'interface graphique de l'application dédiée à la détermination des paramètres (n et d) optimaux.	103
Figure 90 : Réponse de la nouvelle forme comparée aux formes classiques pour différentes valeurs de d	104
Figure 91 : Structure capacitive ayant C_0 variable en fonction de la pression appliquée. À gauche la structure proposée par [151] , à droite la nouvelle structure proposée.	105
Figure 92 : Réponse des modèles : classique, à d non-uniforme, à C_0 variable et le modèle à d non-uniforme et C_0 variable.	105
Figure 93 : Image du capteur réalisé. La partie bleue constitue la partie mobile du capteur, la partie réalisée en métal constitue la partie fixe avec d non uniforme.	107
Figure 94 : Comparaison entre la réponse des capteurs fabriqués, $n = 4$ (courbe orange), $n = 6$ (courbe grise) et $n = 8$ (courbe bleue).	107
Figure 95 : Comparaison entre la réponse théorique (courbe jaune) et pratique (courbe grise) du capteur réalisé $n=6$	108

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques du microcontrôleur PIC18F452.	21
Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques des microcontrôleurs utilisés dans chaque type de carte d'acquisition.	25
Tableau 3 : Images des tests effectués, {a} test de détection de carte, {b} reconnaissance de capteur de température, {c} acquisition d'un signal de fréquence 20 kHz en temps réel, {d} acquisition de signal de fréquence 1 MHz en temps différé.	30
Tableau 4 : Incertitude de mesure de distance par caméra infrarouge dans l'intervalle [27,150] cm.	45
Tableau 5 : Incertitude de mesure de distance par caméra infrarouge dans l'intervalle [5-27] cm.	45
Tableau 6 : Erreur de mesure du capteur luxmètre.	48
Tableau 7 : travaux pratiques réalisés en physique avec les capteurs développés.	48
Tableau 8 : travaux pratiques réalisés en chimie avec les capteurs développés.	53
Tableau 9 : Dimensions du capteur de pression proposé par [133].	68
Tableau 10 : Paramètres impression 3D[160], [161].	86
Tableau 11 : Propriétés mécaniques du matériau[160], [161].	86
Tableau 12 : Comparaison des performances (sensibilité et non-linéarité) du modèle théorique et du capteur fabriqué.	92
Tableau 13 : Comparaison des performances théoriques et pratiques du capteur ayant C_0	96
Tableau 14 : Évolution de la sensibilité et la non-linéarité en fonction de la plage de mesure de pression considérée (modèles théoriques).	96
Tableau 15 : Comparaison des performances de la structure classique pour différentes valeurs de la distance inter-armature (d).	98
Tableau 16 : Comparaison de performances du nouveau modèle, avec ceux de la forme classique.	104
Tableau 17 : Comparaison de performances des modèles : classique, à d non-uniforme, à C_0 variable et le modèle à d non-uniforme et C_0 variable.	106

Introduction Générale

Introduction Générale

L'expérimentation pratique doit occuper une place importante dans l'enseignement des sciences : les pédagogues valorisent son rôle et jugent qu'elle a pour objectifs de maintenir la compréhension des phénomènes physiques [1], développer le raisonnement scientifique chez les apprenants [2], permettre l'observation des phénomènes, la confirmation des hypothèses et la vérification des lois. Cette activité permet aux étudiants de développer leurs habilités manipulatoires, les incite à travailler en groupe et de façon autonome [3-5].

Les recherches faites au Maroc à ce sujet, ont démontré que la réalité de la pratique d'expérimentation est peu satisfaisante et contribue au déficit de connaissances scientifiques chez l'élève et l'étudiant marocain.

Au niveau de l'enseignement secondaire, les résultats d'un questionnaire destiné aux enseignants de sciences physique, ont montré que 68% d'entre eux réalisent moins de 50% des expériences programmées dans le manuel scolaire et que 23% de ces expériences sont réalisées par l'enseignant à toute la classe [6].

Ce faible taux de réalisation de Travaux Pratiques (TP) se répercute négativement sur les interprétations scientifiques que font les étudiants sur les phénomènes physiques [7], ainsi que sur l'écart entre les connaissances théoriques et pratiques chez les élèves et étudiants marocains. Une autre étude a pu montrer que l'écart entre les réponses juste des questions théoriques (74%) et celles pratiques (38%) est considérable [8].

Les raisons pour lesquelles le taux de réalisation des travaux pratiques est faible, sont multiples. Nous nous intéressons dans notre recherche au manque de matériel scientifique, qui constitue d'après M. Taoufik et al. [9], une raison majeure (84%) pour la non utilisation des TP autonomes ; la même étude a montré que la majorité des laboratoires (87%) ne sont pas équipées pour effectuer toutes les activités expérimentales programmées.

Au niveau universitaire, d'après le rapport du Conseil Supérieur de l'Education [10] « L'insatisfaction » des étudiants par rapport à l'organisation des enseignements (cours, TD et TP) est un constat avéré. La majorité des modules est dispensée sous forme de cours théoriques généraux qui n'appellent aucune participation des étudiants. Rares sont les véritables travaux pratiques ou dirigés puisque c'est le cours magistral qui prédomine. Même dans les facultés de sciences, le cours magistral est privilégié au détriment de TD et TP et ceci est généralement attribué à la massification.

En effet, le Maroc, comme tout pays en développement, fait face à une inscription massive d'étudiants en sciences et technologie. Tous s'entendent pour condamner un système qui, pour des raisons économiques favoriserait une formation théorique au détriment d'une formation pratique. L'apprentissage constructiviste implanté dans la plupart des pays occidentaux veut répondre à ce problème en proposant un apprentissage par compétence. Celui-ci met l'accent sur les savoirs faire ce qui, en sciences et technologie, exige un recours à une formation plus concrète, dans un environnement de laboratoire.

Les laboratoires d'ExAO (Expérimentation Assistée par Ordinateur) sont une solution à ces problèmes : une alternative aux laboratoires traditionnels. En effet l'ExAO est une technologie d'enseignement utilisant l'ordinateur comme outil d'enseignement, et dont les avantages

didactiques sont associés à la représentation graphique en temps réel des phénomènes observés. Le fait « de représenter en simultanéité l'action expérimentale réelle et sa représentation graphique » est illustré par la métaphore de la lunette cognitive [11]. En plus de cela, elle permet l'affichage de plusieurs mesures provenant de capteurs différents simultanément plutôt que séquentiellement. Ceci permet à l'étudiant de gagner du temps et de mieux comprendre l'interaction entre variables.

Malheureusement la technologie disponible est distribuée par des entreprises occidentales et les prix sont bien élevés.

Dans cette optique, le projet (PPR2 : PPR2/2016/81) « MicroLab-ExAO : développement d'interfaces d'acquisition et de capteurs pour un déploiement à grande échelle de travaux pratiques assistés par ordinateur » a été financé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Formation des Cadres, et cette thèse en fait partie.

Dans ces grandes lignes, le projet prévoit :

- Le transfert de technologie entre universités marocaine et l'Université de Montréal (UdM),
- Le développement d'interfaces adaptées,
- L'acquisition, le développement de capteurs spécifiques et la fabrication d'outils de base de l'ExAO,
- La formation des formateurs : plusieurs cycles de formation au Maroc et au Canada ont été organisés en faveur des enseignants chercheurs et des étudiants de 3ème cycle de l'université Mohammed V de Rabat, majoritairement de la FSR, mais aussi des enseignants du secondaire (collèges et lycées),
- L'application de l'ExAO à de nouvelles expériences à fort intérêt pédagogique,
- L'élaboration de manuels pratiques de plusieurs séances de T.P,
- L'aménagement de salles de T.P ExAO à caractère polyvalent (équipée et fonctionnelle),
- Le développement de sujets de recherche scientifique sur les matériaux et les composants de manipulations ExAO dans l'objectif de la diversification, du perfectionnement et de l'innovation,
- La contribution à l'introduction effective de l'ExAO dans plusieurs établissements universitaires nationaux et africains, avec la collaboration de l'université de Montréal,
- L'organisation de séminaires, d'ateliers et d'écoles d'été ExAO à Rabat et dans d'autres villes universitaires marocaines.

Afin de bien présenter nos travaux de recherches élaborés dans le cadre de cette thèse, le manuscrit est structuré de la manière suivante :

Chapitre 1 : dresse une synthèse bibliographique sur les différentes technologies utilisées comme support de l'enseignement et plus particulièrement l'enseignement des travaux pratiques (TP). Cette synthèse permettra de mieux cerner les avantages et inconvénients de ces technologies. Dans un premier temps ce chapitre donne un aperçu sur les technologies

d'enseignement utilisant l'ordinateur, à savoir : l'**Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO)** et la **Simulation Assistée par Ordinateur (SAO)**. L'étude de l'utilisation de ces technologies au Maroc est également présentée.

Dans un second temps il donne, un aperçu sur la technologie de fabrication additive (impression 3D) et les formes de son utilisation en enseignement.

Chapitre 2 : est consacré à la présentation du cœur de la chaîne ExAO : nous allons y présenter et comparer les trois types d'interfaces d'acquisition utilisées et leurs principaux éléments et caractéristiques : i) l'interface « université », ii) l'interface « collège » et enfin iii) l'interface « recherche ».

Chapitre 3 : décrit succinctement les protocoles expérimentaux qui ont été réalisés dans le cadre de nos travaux de recherche, avec la technologie ExAO et l'impression 3D. Les caractéristiques des capteurs développés pour leurs réalisations y sont également décrites.

Nous allons également présenter tout au long de ce chapitre les avantages qu'offrent ces technologies en comparaison avec les méthodes classiques.

Chapitre 4 : est divisé en deux grandes parties :

Dans la première, nous dressons une synthèse bibliographique des différents capteurs de pression qui ont été réalisés avec la technologie d'impression 3D et nous allons conclure que vue les imprimantes 3D dont on dispose et les matériaux que nous avons, la fabrication hybride et le principe capacitif sont les plus adaptés à notre cas.

Dans la deuxième, nous étudions en détail les capteurs de pression capacitifs et les structures qui ont été proposées dans la littérature en vue d'améliorer ses performances en termes de sensibilité et de linéarité.

Chapitre 5 : présente les différents capteurs de pression capacitifs que nous avons réalisés à l'aide de l'impression 3D, et décrit en détails leurs structures et performances théoriques et pratiques en termes de sensibilité et linéarité.

Nous terminons par une conclusion générale et les perspectives prometteuses de ce travail.

Chapitre 1 :

**État de l’art des technologies utilisées en
enseignement.**

Chapitre 1 : État de l'art des technologies utilisées en enseignement

1. Introduction

Ce chapitre dresse une synthèse bibliographique sur les différentes technologies utilisées comme support de l'enseignement et plus particulièrement l'enseignement des travaux pratiques (TP). Cette synthèse permettra de mieux cerner les avantages et inconvénients de ces technologies. Ce chapitre est ainsi organisé en deux parties :

- Dans la première partie nous allons présenter les technologies d'enseignement utilisant l'ordinateur, à savoir : l'**Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO)** et la **Simulation Assistée par Ordinateur (SAO)**. L'étude de l'utilisation de ces technologies au Maroc est également présentée.
- Dans la deuxième partie nous allons présenter la technologie de fabrication additive (impression 3D) et les formes de son utilisation en enseignement.

2. Ordinateur et travaux pratiques

L'ordinateur est utilisé en enseignement dans plusieurs activités. Il est communément utilisé dans les présentations de cours ou les exercices destinés aux étudiants mais aussi comme moyen pour évaluer leurs performances.

Au laboratoire, en sciences expérimentales, d'autres formes d'utilisations coexistent à savoir l'ExAO et la SAO.

2.1. L'ExAO

L'ExAO est un environnement d'apprentissage qui existe depuis plus de 40 ans [11], et qui consiste à réaliser des expériences par l'intermédiaire de capteurs et d'une interface d'acquisition afin de représenter en temps réel et sur l'écran de l'ordinateur l'évolution des variables étudiées.

De nos jours, l'ExAO présente un domaine important d'utilisation des Technologies d'Information et de Communication de l'Enseignement (TICE) en sciences expérimentales, où l'ordinateur est utilisé pour ses fonctions de scrutation, d'analyse, de contrôle et de modélisation.

La chaîne d'ExAO est composé de : un capteur, une interface d'acquisition, un ordinateur et un logiciel (figure 1).

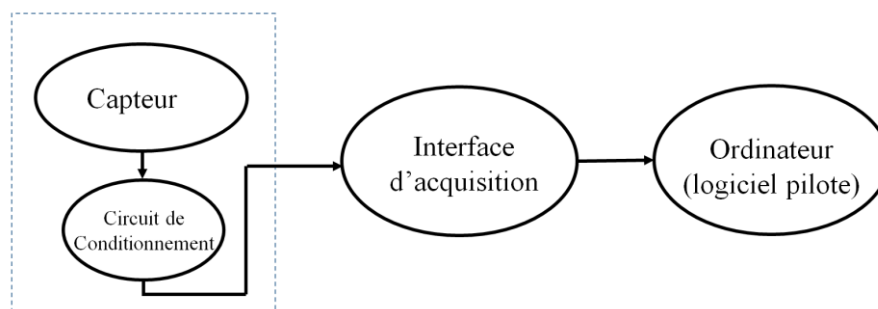


Figure 1 : Les éléments d'une chaîne ExAO.

Les concepts scientifiques étant abstraits, l'usage de l'ExAO permet le passage par une démarche progressive qui débute par du matériel concret en allant vers l'abstrait, ce qui facilite la compréhension du concept étudié par les apprenants.

Selon Pierre Nonnon [12], l'ExAO ne diffère pas vraiment du processus expérimental traditionnel. Elle laisse à l'apprenant tout le contrôle expérimental nécessaire, sauf que le processus est plus rapide puisque les données sont acquises automatiquement par des capteurs électroniques, traitées et présentées en temps réel sur des instruments virtuels à l'écran sous forme de vumètres, graphiques ($y = f(t)$ et $y = f(x)$) ou de tableurs.

En plus de l'acquisition automatique des données, l'ordinateur en ExAO assiste l'apprenant dans la mise en œuvre de ses expérimentations en lui offrant la possibilité de construire rapidement un modèle mathématique provenant d'une interaction de variables physiques. En produisant automatiquement des tableaux et des graphiques, et ce, simultanément au phénomène physique observé, l'ordinateur facilite donc la démarche d'investigation scientifique en laissant davantage de temps à l'apprenant pour se consacrer aux aspects plus créatifs de l'investigation scientifique.

La possibilité de visualiser les résultats graphiquement en même temps que l'expérience se déroule, est illustrée par Pierre Nonnon [11] par le concept métaphorique de la lunette cognitive (figure 2).

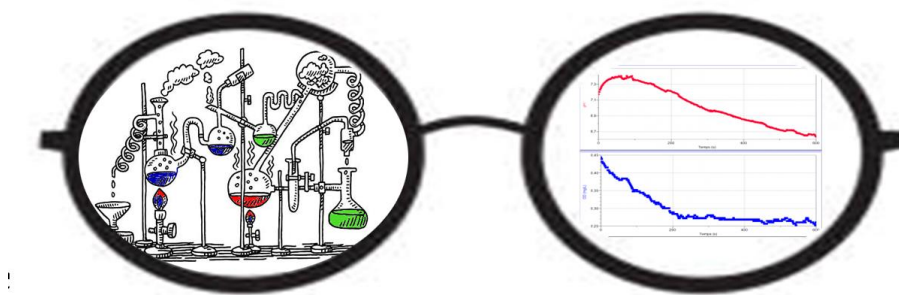


Figure 2 : Concept de lunette cognitive.

Ce concept est une concrétisation de l'hypothèse de double codage de Paivio [13] qui définit les activités psychologiques des individus par l'utilisation de deux systèmes de codage de l'information : un système de représentation imagée qui procède à partir d'expérimentations concrètes et un système de représentation symbolique (par exemple, représentation graphique ou algébrique) qui procède de manière abstraite.

Ce concept s'appuie également sur les théories de l'information [14] puisqu'au regard de cette théorie, la représentation graphique du phénomène sur un écran externe soulagerait la mémoire à court terme de l'étudiant, ce qui la rendrait plus disponible pour résoudre les problèmes scientifiques.

La plupart des recherches faites au sujet de l'ExAO démontrent qu'un enseignement assisté par ordinateur exerce une influence positive sur l'apprentissage des élèves [16-19] et leur apports à l'enseignement des sciences expérimentales sont admis par plusieurs auteurs comme Beaufiles et al. [17]. Hucke et Fischer [18] et Firpo et al. [19] :

- cette technologie permet de réaliser des expériences concrètes sur des phénomènes accessibles et même inaccessibles jusqu'à présent;
- les expériences peuvent être renouvelées rapidement et des exemples différents peuvent être multipliés;
- c'est une technique qui procure des gains en rapidité, précision, abondance et fiabilité sur les mesures expérimentales. Ainsi, l'apprenant peut aller directement aux mesures significatives et utiles au problème traité ;
- l'ordinateur utilisé en ExAO comme outil de laboratoire fait apparaître des phénomènes non perceptibles et ainsi rendre le graphique plus signifiant ;
- l'ExAO n'est pas seulement un outil de démonstration des concepts scientifiques, mais un outil cognitif pour faciliter l'investigation scientifique ;
- l'ordinateur offre un support aux élèves, les responsabilise davantage, favorise leur autonomie, développe leur esprit d'initiative et valorise leurs activités.

L'ExAO au Maroc

Au Maroc l'équipement en masse des établissements scolaires (collège et lycée) par le matériel ExAO a commencé depuis 2009. Récemment des études ont été faites autour de son utilisation, dans l'objectif d'identifier les opportunités et obstacles de l'adoption de cette technologie pour l'enseignement des travaux pratiques dans le contexte marocain.

Dans la région de Marrakech-Safi, l'étude menée par El-ouargui et al. [20] auprès de 580 enseignants de science Physiques de la région, a montré que près de 60% des établissements sont équipés de matériel ExAO. Cependant, 28% uniquement des enseignants interrogés déclarent avoir reçu une formation sur l'utilisation de ce matériel, et 38,49% seulement l'utilise avec leurs étudiants. Ce faible taux d'utilisation est justifié par le nombre insuffisant des équipements, la répartition inégale de capteurs disponibles entre établissements et le manque de formation continue des enseignants.

Dans la région du grand Casablanca, l'étude menée par Elkababi et al. [21] auprès de 22 lycées de la région a montré que, bien que presque tous les établissements soient équipés de matériel ExAO, 36% uniquement des enseignants (physiques, chimie) interrogés déclarent l'avoir utiliser. 71% d'entre eux déclarent ne pas avoir l'utilisé par manque de formation et 53% par manque des équipements informatiques dans les établissements.

Dans la ville d'El Jadida l'étude menée par Bitar et al. [22] auprès de 12 établissements scolaires du secondaire (7 publics et 5 privés), a montré que la majorité des établissements publics sont équipés de matériel de l'ExAO. 75% du staff pédagogiques questionnés déclarent avoir des connaissances sur l'ExAO soit par autoformation (28%) ou par une formation officielle (38%).

Selon cette étude, la majorité des enseignants n'utilisent pas l'ExAO (69%) et 31% d'entre eux l'ont utilisé 1 à 4 fois seulement. Ceci est dû au fait que le matériel n'est pas complet ou non fonctionnel. Cependant, 53% des enseignants aimeraient bien utiliser l'ExAO et 72% sont convaincu que cet outil pédagogique pourrait améliorer l'apprentissage.

La majorité des apprenants (80%) n'avaient aucune connaissance sur l'ExAO. Cependant, après avoir reçu des explications sur le fonctionnement et l'utilisation de cet outil pédagogique, 72% d'entre eux l'ont trouvé intéressant, simple et utile.

2.2. La SAO

La SAO quant à elle est un environnement qui utilise les possibilités de calcul et d'affichage de l'ordinateur pour simuler un phénomène et le représenter à l'écran avec différents niveaux de complexité, d'interactivité et de réalisme. Cet environnement repose sur la mise en œuvre de modèles théoriques et sert à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. Richoux et al. [23] présentent les simulations comme appartenant à un plan intermédiaire entre le modèle théorique et la réalité.

D'autre part, Niedderer et al. [24] rapportent que si les activités expérimentales habituelles donnent une part importante à la manipulation d'appareils et à la réalisation de mesures, l'utilisation de simulations favorise la réflexion théorique.

Guéraud et al. [25] résument les principaux objectifs de la simulation dans le contexte éducatif :

- simuler pour comprendre un phénomène : la simulation permet de proposer un modèle numérique qui permet d'évaluer la validité d'une théorie ;
- simuler pour construire : la simulation permet de vérifier le modèle numérique avant la réalisation matérielles d'un nouvel objet ;
- simuler pour apprendre : l'utilisation de la simulation dans le processus d'apprentissage améliore le niveau de compréhension des phénomènes étudiés et elle augmente la motivation de l'apprenant.

D'après Droui et El Hajjami [26] la simulation dans l'enseignement des sciences présente un intérêt pédagogique. Ils précisent que ces simulations sont de plus en plus efficaces si elles sont intégrées au bon moment, pour la bonne activité et avec des objectifs pédagogiques bien précises (surmonter une difficulté théorique, montrer les limites d'une théorie naïve, etc.) .

Les apports de la simulation sont admis par plusieurs auteurs [30-34]. Parmi ces apports on cite que la simulation :

- permet de présenter des systèmes réels complexes et dynamiques d'une manière simplifiée afin de permettre aux élèves de se concentrer sur l'information critique ou les compétences à développer, et par conséquent faciliter leur apprentissage ;
- permet de développer du matériel didactique approprié pour des expérimentations inaccessibles d'une manière conventionnelle au laboratoire en classe ou pour des expérimentations onéreuses ;
- permet l'exploration du comportement d'un système donné et la vérification d'hypothèses et de théories émises par l'apprenant ;
- utilisée comme outil d'investigation, elle améliore la motivation et l'intérêt ;
- conduite avec un objectif bien précis peut être l'outil approprié pour minimiser des déficiences d'apprentissage.

- peut jouer un rôle de « pont cognitif » entre la théorie et l'expérience
- permet de gagner du temps, quand elle est combinée avec l'expérimentation au laboratoire.

Malgré ces avantages, plusieurs auteurs ont adressé des critiques à l'utilisation de la simulation en éducation. D'après Richoux [32] les simulations peuvent présenter une vision simpliste de la réalité ou introduire des comportements erronés associés au modèle physique utilisé ou au modèle informatique du modèle physique. D'après Hebenstreit [33] une dépendance à l'ordinateur peut être engendrée par une utilisation fréquente des simulations et mentionne également que les utilisateurs risquent de confondre un phénomène réel et sa représentation en simulation. Mark [34] note que les simulations omettent nécessairement certains facteurs que les élèves risquent d'en oublier l'existence. Thomas et Hooper [31] ajoutent que dans certaines situations, l'apport des simulations est incertain voire nul.

Ce risque de confusion possible entre théorie et réalité constaté par ces auteurs, peut être diminué en donnant, au moyen de l'ExAO plus de place à des données expérimentales dans les environnements d'apprentissage comportant des simulations. Comme dans le travail de Riopel et al. [35] où l'apprenant enregistre premièrement une vidéo de l'expérimentation à étudier, puis utilise des modèles virtuels superposés à la séquence vidéo pour avoir à la fin le modèle scientifique correspondant au phénomène étudié.

La SAO au Maroc

Au Maroc une étude menée par Chekour et al. [36] a montré que 75% des enseignants de sciences physiques pensent que les simulations peuvent remplacer certaines expériences en électricité. Cependant, uniquement 14% intègre la simulation dans les classes. Dans la recherche exploratoire de Mahdi et al. [37], le faible taux de l'intégration de la simulation dans l'enseignement des sciences physiques est justifié par le fait que la majorité des enseignants de sciences physiques ont besoin de formations continues dans ce domaine. Toutefois, dans une autre étude Ahaji et al. [38] ont montré que 81% des élèves interrogés sont conscients de la complexité de l'apprentissage de concepts en sciences physiques et pensent que l'intégration de simulation peut franchir certains obstacles dans leurs processus d'apprentissage.

3. Technologie d'impression 3D et enseignement

3.1. Technologie d'impression 3D

L'impression 3D connue sous le nom de fabrication additive, désigne une famille de techniques de fabrication 3D basée sur des méthodes permettant de créer des composants couche par couche. Cette technologie de fabrication a suscité beaucoup d'intérêt en raison de sa simplicité de fabrication, de la complexité des pièces imprimables, de l'augmentation des types de matériaux utilisés, de la capacité de fabriquer des objets multi-matériaux, des microstructures adaptées et des options en matière de coût qu'elle offre. Les matériaux les plus populaires sont les polymères, les métaux, les composites et les céramiques.

Elle permet de produire presque tous les objets complexes de manière simple et peu coûteuse. Pour ce faire un modèle numérique de l'objet à imprimer doit être réalisé. Le modèle numérique peut être réalisé à l'aide d'un scanner tridimensionnel (comme la tomographie), d'un

logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) ou en utilisant la technologie de photogrammétrie qui permet d'obtenir le modèle par la combinaison d'images de l'objet obtenues par un processus de numérisation de photos réalisées à partir de différentes positions. Le modèle 3D doit être converti en un fichier STL après sa création.

Ce fichier STL contient une liste de coordonnées des sections triangulées qui stockent les informations sur les surfaces du modèle. Tous les logiciels d'impression 3D peuvent lire les fichiers STL, pour découper ensuite l'objet en une série de couches de sections transversales 2D par une approche discrète dans la direction Z. Enfin, l'objet 3D souhaité est créé par impression couche par couche (figure 3).

Selon les principes de fabrication, les technologies d'impression 3D sont classées par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) dans sept catégories : technologies basées sur la photo polymérisation, sur le laminage de feuilles, sur l'extrusion de matériaux, sur la fusion sur lit fluidisé, sur le dépôt direct d'énergie, sur le jet de liant et sur commande électrostatique. Les technologies d'impression 3D couramment utilisées sont présentées sur la figure 4.

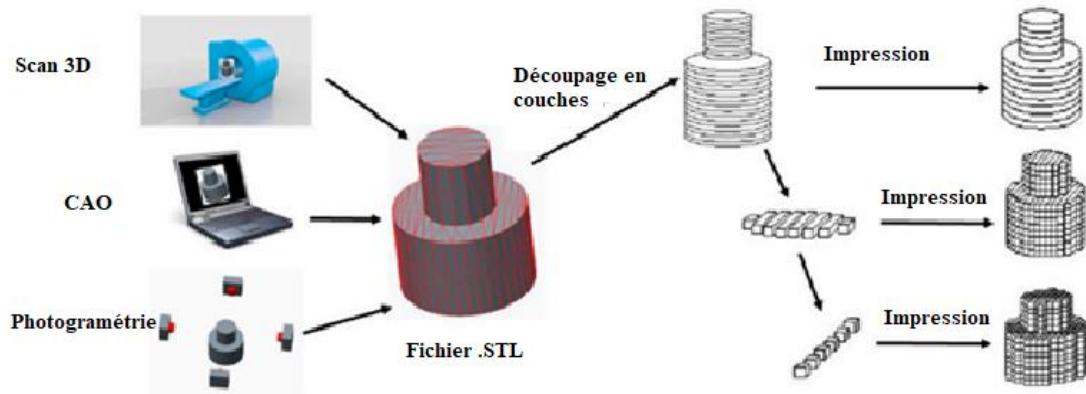


Figure 3 : Processus de l'impression 3D.

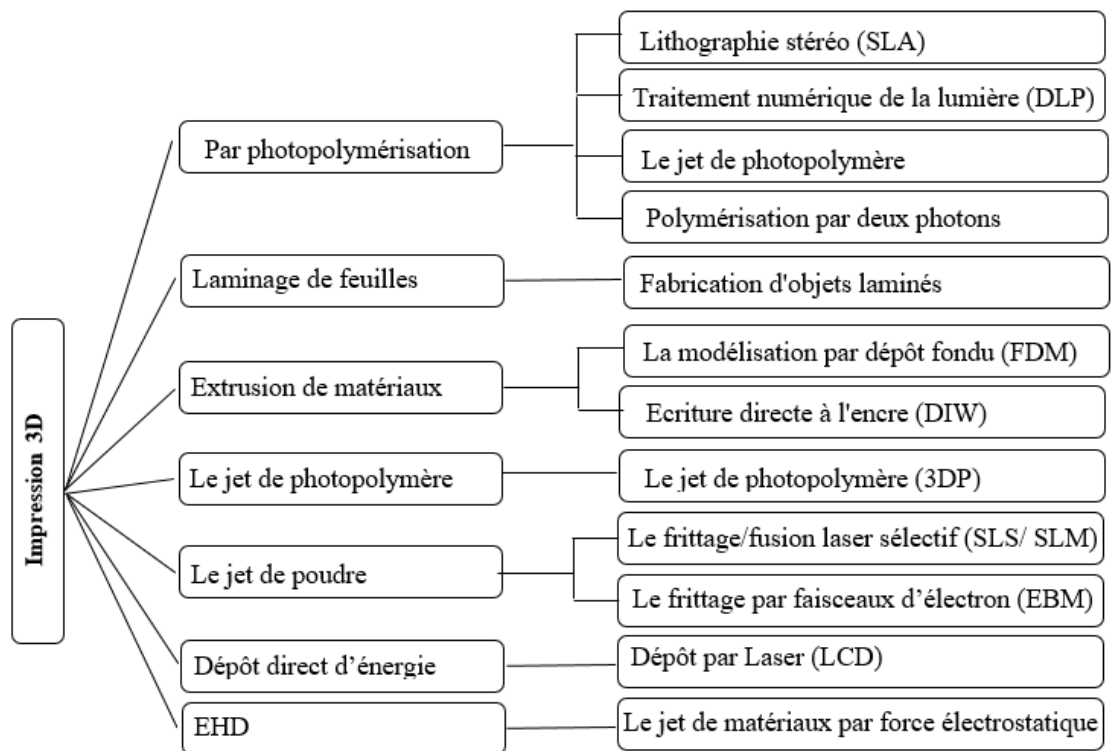


Figure 4 : Impression 3D : Principes de fabrication.

3.2. Études de l'utilisation de l'impression 3D en enseignement

L'utilisation des technologies de fabrication numérique telles que l'impression 3D pour soutenir l'éducation est loin d'être nouvelle. Les disciplines de l'architecture et de l'ingénierie ont été les premières à adopter les technologies de prototypage rapide [42-45], et plusieurs avantages ont été identifiés suite à leur intégration dans l'enseignement.

Simon Ford et Tim Minshall [43] ont étudié l'utilisation de la technologie d'impression 3D dans les écoles, les universités, les bibliothèques et les établissements d'enseignement spécialisé, et ont identifié six catégories d'utilisation : (1) enseigner l'impression 3D aux étudiants ; (2) enseigner l'impression 3D aux éducateurs ; (3) servir de technologie de soutien pendant l'enseignement ; (4) produire des artefacts qui facilitent l'apprentissage ; (5) créer des technologies d'assistance ; et (6) soutenir les activités de vulgarisation.

Les mêmes auteurs [43] précisent que cette technologie est utilisée en enseignement soit (i) dans le développement de cours et de projets qui se concentrent explicitement sur l'enseignement des compétences de dessin et d'impression 3D, ou (ii) dans le cadre de cours et de projets pour soutenir l'enseignement d'autres matières et faciliter les approches multi et interdisciplinaires [47,48], généralement à travers l'utilisation d'artefacts imprimés en 3D [46].

Pour développer des cours de robotique par exemple, l'impression 3D est devenue un outil populaire, car elle constitue un moyen peu coûteux pour développer des robots éducatifs [50-53] et des dispositifs haptiques [51]. L'utilisation d'un châssis imprimé en 3D pour des plateformes robotiques open source à bas prix permet aux étudiants de modifier le robot et de partager ces modifications avec d'autres étudiants [52]. Aussi la construction d'imprimantes 3D elles-mêmes fait l'objet de cours dans le domaine de la technologie et de l'ingénierie, de projets de mécatronique et d'instrumentation [53].

La production des artefacts destinés à faciliter l'apprentissage quant à elle, est rapporté dans un certain nombre de matières comme, la physique [54], la chimie [58-60], les mathématiques [60-62], l'ingénierie aéronautique [63-65], l'ingénierie mécanique [66-68], la biologie [69,70] et l'anatomie [71-73].

Un autre domaine d'utilisation de l'impression 3D est l'enseignement spécialisé pour les personnes souffrant de handicaps visuels, moteurs et cognitifs. Dans ces contextes, il existe plusieurs exemples d'utilisation de l'impression 3D par des élèves présentant des déficiences visuelles [74,75], motrices [76-78] et cognitives [76]. L'utilisation de l'impression 3D dans de tels contextes permet la création d'appareils d'adaptation et d'aides pédagogiques personnalisés et d'artefacts tactiles [80,81], notamment des graphiques destinés à faciliter l'enseignement de la programmation [79], des mathématiques [80], de l'alphabétisation [81], des livres d'images [71], des cartes géo-scientifiques [82] et des manuels d'histoire [72].

Les avantages de l'utilisation de l'impression 3D en enseignement sont reconnus par plusieurs chercheurs [44,61,77], [86-90]. En effet cette technologie :

- apporte de l'enthousiasme et du réalisme dans la salle de classe, et accroît l'engagement et la motivation des élèves.
- permet aux étudiants de développer leurs compétences en matière de créativité, de dessin technique, de conception et de développement de produits. Des exemples spécifiques de ce dernier point peuvent être trouvés dans des cas réels de création de mains prothétiques, dans des écoles primaires et des lycées.
- améliore les compétences mathématiques des élèves, tandis que la compréhension de la géométrie est améliorée par la fabrication de formes tridimensionnelles.
- améliore la confiance des étudiants en termes de présentation orale lorsqu'ils font la démonstration de leur imprimante 3D et communiquent leur apprentissage.

L'adoption de l'impression 3D dans un environnement d'apprentissage par projet présente certains avantages :

- encourage un apprentissage dirigé par l'étudiant et conduit à des améliorations observables dans le travail de l'étudiant ;
- modifie la relation entre les étudiants et les enseignants au fur et à mesure que l'apprentissage électronique se développe. Ce point est important car l'apprentissage centré sur l'étudiant implique un équilibre dans l'expérience d'apprentissage qui passe du professeur à l'étudiant. Traditionnellement, l'enseignant dispose d'une expertise pratique importante à transmettre aux étudiants, mais ce n'est souvent pas le cas avec une nouvelle technologie comme la 3DP;
- lie l'apprentissage des étudiants et leurs responsabilités éthiques envers le monde, comme la durabilité environnementale.

De nombreuses études [91,47] soulignent particulièrement les avantages des artefacts imprimés en 3D par rapport aux artefacts virtuels sur écran. En effet :

- ils permettent une construction autodirigée et une capacité de travail indépendant et introverti.

- ils peuvent également faciliter l'apprentissage, développer les compétences et accroître l'engagement des élèves;
- inspirent la créativité, améliorent les attitudes à l'égard des matières et des carrières STIM (science, technologie, ingénierie, et mathématiques), tout en augmentant l'intérêt et l'engagement des enseignants.

Il existe également des avantages spécifiques à certains sujets [71,72], [92-94]:

- En anatomie les modèles imprimés en 3D sont durables, précis, faciles à reproduire, permettent l'évitement des problèmes de santé et de sécurité associés aux spécimens de cadavres fixés par voie humide ou aux spécimens plastinés.
- En termes de coût, il a été estimé que les modèles imprimés en 3D sont 10 à 20 fois moins chers que les modèles plastinés créés à partir de cadavres.
- L'utilisation de répliques imprimées en 3D permet aux étudiants de les examiner sans endommager les originaux, tout en réduisant la demande de parties du corps humain et en apaisant les préoccupations éthiques et juridiques concernant l'utilisation de cadavres.
- Le faible coût de la production de supports pédagogiques à l'aide de la 3D a également été reconnu par les chimistes. Une estimation du coût de l'impression 3D de structures moléculaires conçues à l'aide d'un logiciel de CAO gratuit a montré qu'elles coûtaient moins d'un cinquantième du prix des modèles disponibles dans le commerce.

L'intégration de la 3D dans l'enseignement d'autres matières n'est pas sans inconvénients et plusieurs difficultés ont été signalées [95-98]. Parmi ceux-ci, citons :

- les difficultés rencontrées par les étudiants qui n'ont pas d'expérience en modélisation 3D ;
- les problèmes survenant au cours du processus de modélisation et d'impression qui nécessitent l'aide d'un professionnel ;
- les matériaux imprimés en 3D qui ne donnent pas les résultats escomptés, en particulier dans les contextes expérimentaux ;
- le temps nécessaire à l'impression des modèles 3D.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les technologies utilisées pour supporter l'enseignement en classe. L'objectif est d'étudier les différentes avantages et limitations de chaque technologie.

Nous avons vu qu'au Maroc, le recours à l'utilisation des TICs en enseignement est fortement encouragé par le ministère de tutelle. Cependant, les études faites dans différentes régions du Maroc portant sur l'utilisation de matériel ExAO montrent que, malgré qu'environ 60% des établissements scolaires soient équipés de matériel ExAO, un maximum 39% d'enseignants l'utilisent. Les raisons sont principalement : (i) le manque de formation des enseignants, (ii) matériel incomplet (manque de capteurs ou manque de matériel informatique nécessaire) ou non-fonctionnel. La SAO, présentée comme solution alternative est aussi rarement utilisée, vu le manque de formation des enseignants dans ce domaine également.

Nous avons également présenté les avantages de l'utilisation de l'impression 3D en enseignement, et nous avons exploré les façons actuelles de son utilisation. Nous avons vu qu'elle est largement utilisée dans les cours axés sur l'enseignement de cours de dessin et impression 3D, ou pour soutenir l'enseignement d'autres cours, généralement en faisant appel à des artefacts fabriqués en 3D.

Pour nos travaux, nous allons développer et/ou mettre au point des capteurs pour une utilisation en environnement ExAO et nous ferons appel à l'impression 3D pour fabriquer certains d'entre eux. Ainsi, nous allons combiner la technologie ExAO et impression 3D pour tirer un maximum d'avantages des deux technologies et équiper à faible coût nos salles de TP.

La technologie SAO quant à elle est laissée au choix des professeurs et est utilisée par les étudiants en projet de fin d'année pour réaliser des tests virtuels avant de passer à la réalisation concrète de leurs projets.

Chapitre 2 :

Les interfaces d'acquisition

Chapitre 2 : L'interface d'acquisition.

1. Introduction

Dans le chapitre précédant, nous avons dressé une liste des types d'enseignement en classe et choisi de faire appel à la technologie ExAO pour supporter l'enseignement des TP.

Ce chapitre est consacré à la présentation du cœur de la chaîne ExAO : nous allons présenter les interfaces d'acquisition utilisées et développées. Tout d'abord nous décrirons l'interface d'origine « MicroLabExAO » telle que nous l'avons acquise et qui est à la base de nos développements. Nous présenterons ensuite les autres interfaces sur lesquelles nous avons travaillé et axé notre recherche : i) l'interface « université », ii) l'interface « collège » et enfin iii) l'interface « recherche ».

2. L'interface d'acquisition

2.1. Contexte

L'interface « MicroLabExAO » développée par le Pr. Pierre Nonnon et son équipe, au sein de son laboratoire (Laboratoire de Robotique Pédagogique) à la Faculté des Sciences de l'Éducation (FSE) de l'université de Montréal, est comparable à un dispositif de laboratoire complet, simple et mobile. Ce système s'adapterait parfaitement aux besoins de l'apprenant quel que soit son niveau de scolarité. En effet, l'ExAO rend l'apprentissage plus interactif en simplifiant et transformant le processus d'acquisition de données des laboratoires scientifiques quel que soit la discipline. Le « MicroLabExAO » apporte ainsi de nombreux avantages tant à l'apprenant qu'à l'enseignant : en permettant de réaliser des expériences plus rapides, un enseignement plus ludique et une autonomie d'apprentissage plus grande, le « MicroLabExAO » contribue ainsi à révolutionner l'enseignement des sciences.

La technologie développée par l'équipe du Pr. P. Nonnon [13] permet de réaliser des représentations graphiques d'un phénomène physique en temps réel. Cette technologie, performante et polyvalente, s'articule autour d'un microcontrôleur relié à plusieurs capteurs, d'un logiciel polyvalent ainsi que d'une partie didactique destinée à guider le raisonnement de l'apprenant. Ce système permet ainsi à l'étudiant de se familiariser avec les phénomènes physiques, chimiques, biologiques, ... en construisant son propre montage. En plus de son utilisation aisée et de son coût relativement bas, la plus-value de cette technologie réside principalement dans la grande autonomie accordée à l'étudiant : le professeur ne jouerait qu'un rôle d'arrière-plan car l'apprentissage se construit sans sa supervision. Ce système innovant a été testé et éprouvé depuis plus de 35 ans et est actuellement utilisé dans plusieurs pays.

2.2. Architecture de l'interface d'acquisition

L'interface « MicroLabExAO » est construite autour d'un microcontrôleur PIC18F452 reprogrammable en circuit (in situ). Elle est connectée à l'ordinateur via une liaison RS232 et pilotée grâce au logiciel « MicroLab ». Deux versions ont été mises au point, dans le cadre de nos travaux, sur la base du PIC18F452 et une troisième, beaucoup plus performante, construite autour d'un microcontrôleur de nouvelle génération en utilisant toujours la même logique :

- La version « Université » que nous avons dédiée aux travaux pratiques réalisés au niveau universitaire, a été modifiée pour normaliser l'entrée des capteurs (analogiques et numériques) en utilisant une connectique standard et bon marché : l'USB3. Elle intègre quatre ports d'entrée dont deux peuvent être amplifiés en utilisant les amplificateurs à décalage programmable intégrés ;
- La version « Collège » que nous avons dédiée au niveau secondaire (collège, lycée), est réalisée autour du même microcontrôleur et possède deux entrées uniquement. Allégée et moins coûteuse elle permet de couvrir la majorité des expérimentations réalisées au niveau secondaire : en effet, la plupart des phénomènes à observer à ce niveau d'étude sont effectués à l'aide de deux variables au maximum en fonction du temps. L'amplificateur à décalage programmable est externalisé, afin de réduire un peu plus le coût total de cette interface allégée ;
- La version « Recherche », que nous traiterons en détail, embarque quant à elle un microcontrôleur ATSAMS70Q21 [96].

Dans leurs fonctionnements, les quatre interfaces sont similaires. Elles se distinguent soit par leur connectique, le nombre de capteurs susceptibles d'être connectés ou par la vitesse d'exécution.

La Figure 5 présente les images des interfaces (a) d'origine, (b) « université » et (c) « collège ».



Figure 5 : Image des interfaces, {a} l'interface « MicroLabExAO », {b} l'interface « Université » et {c} l'interface « Collège ».

2.2.1. L'interface « Collège ».

Comme nous l'avons relaté plus haut, l'interface collège ne comporte que deux ports d'entrées : possibilité de connecter au maximum deux capteurs. Pour cela, sur la base de l'interface d'origine nous avons, dans un premier temps, modifié la connectique : transformation en type USB.3. Dans un second temps, nous avons purement et simplement supprimé les ports 1 et 4 qui comportent chacun un amplificateur à décalage programmable. Nous avons aussi négligé l'entrée numérique et de ce fait choisi de faire fonctionner cette version uniquement en mode analogique. Ses performances quant à elles restent identiques à celles de l'interface d'origine à l'exception de ne plus utiliser le mode « zoom ».

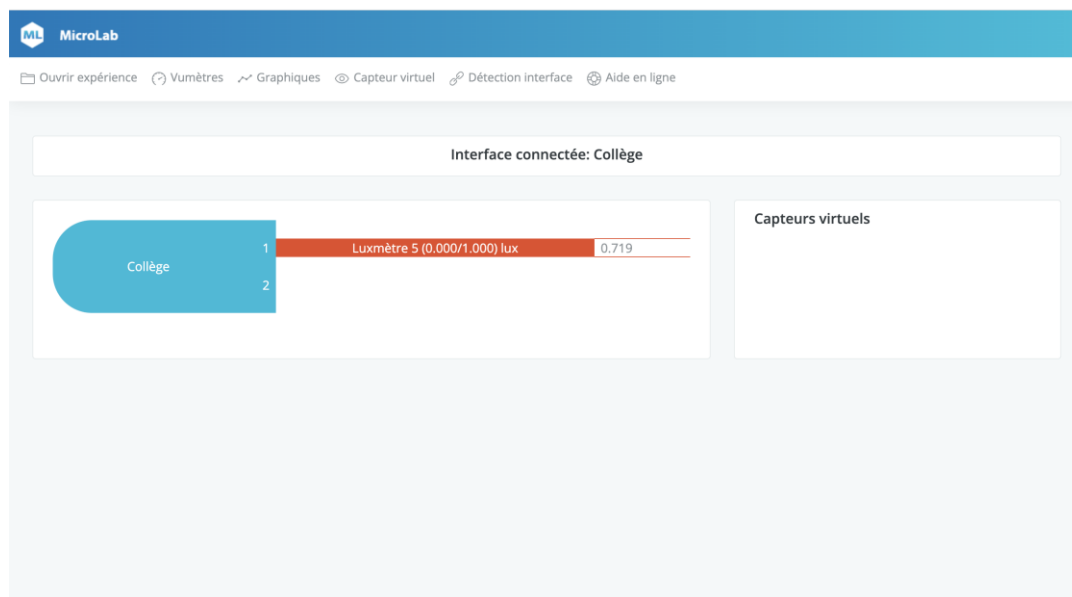


Figure 6 : Reconnaissance de l'interface « Collège » et du capteur connecté.

2.2.2. L'interface « Université »

Cette version est restée identique à celle d'origine à l'exception de la connectique : transformation en type USB.3. Son fonctionnement et ses performances restent inchangés. Compte tenu du nombre de pins disponibles sur la norme USB.3 et du nombre d'interconnexions souhaitées, nous avons ajouté un cavalier (jumper) sur chaque entrée pour commuter du mode analogique (par défaut) au mode numérique.

La carte communique avec l'ordinateur avec une vitesse de 115200 bits/s, ce qui se traduit par une fréquence maximale d'acquisition égale à 2 kHz, lorsqu'un seul capteur est connecté. Dans le cas où plusieurs capteurs sont connectés, cette fréquence maximale est divisée par le nombre de capteurs connectés. Ceci revient à dire, que la fréquence maximale dans le cas où quatre capteurs sont connectés, est égale à 0.5 kHz.

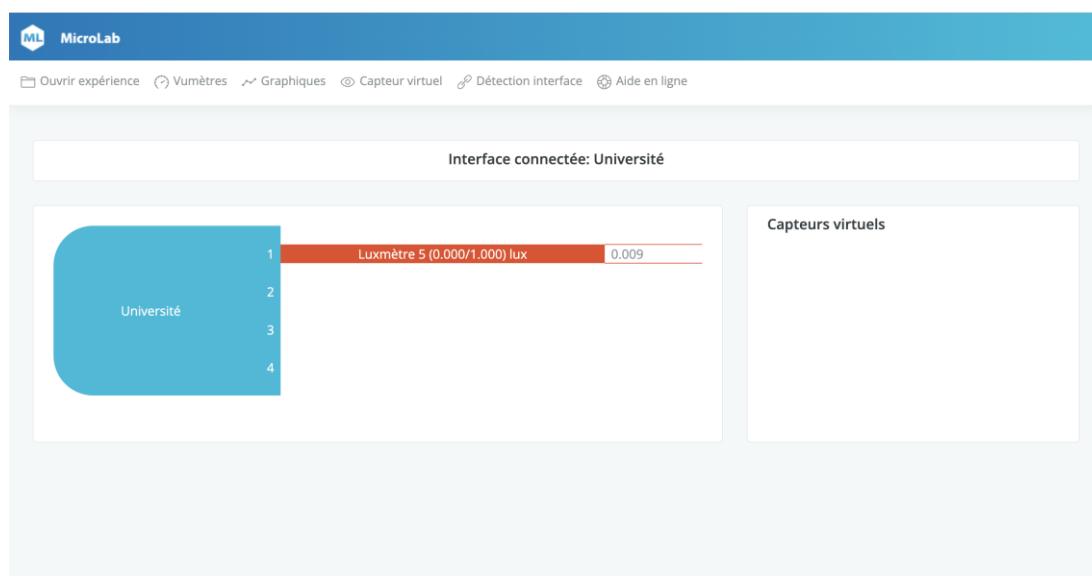


Figure 7 : Reconnaissance de l'interface « Université » et du capteur connecté.

Au niveau du logiciel, l'interface connectée est détectée : la page Interface/Capteur est affichée (figure. 6 et 7), elles contiennent :

- le nom de l'interface en haut et sur l'illustration de l'interface (rectangle bleu);
- les capteurs connectés qui s'affichent sur le même emplacement des broches USB de l'interface, ainsi que leurs variations ;

Dès qu'un capteur est connecté à l'interface, il sera détecté et reconnu par celle-ci et affichera sur l'écran la grandeur mesurée.

2.2.3. L'interface « Recherche »

Dans le monde universitaire, la frontière entre enseignement fondamental et recherche reste très perméable. Cependant, les besoins en recherche sont beaucoup plus contraignants. Afin de pouvoir analyser des phénomènes ayant une fréquence supérieure à la fréquence maximale de la carte université, nous avons donc développé une nouvelle interface d'acquisition que l'on a nommé « Recherche ». Pour cela, nous avons adopté la carte SAME70 explained comme base pour tester et développer le premier prototype de cette version.

La description détaillée de cette carte, la comparaison avec la carte MicroLab et les résultats des premiers tests sont présentées dans la suite de ce chapitre.

2.3. Logique de fonctionnement

La logique de fonctionnement de ces cartes reste la même : seules les performances ou le nombre de capteurs connectés diffèrent. Cependant, pour une utilisation multidisciplinaire simpliste à compliquée et selon le niveau d'étude, le logiciel d'utilisation pilote l'interface et affiche les résultats expérimentaux. Pour une utilisation plus large, il pourra être installé sur toutes les plateformes informatiques grand public existantes (Windows, Mac Os, Linux, Android). Le logiciel de la carte reçoit les commandes, les analyse et répond ensuite suivant l'action préprogrammée avec une vitesse de 115200 bits/s. Ces commandes concernent essentiellement, la vérification de la présence d'une carte d'acquisition, l'identification du type de carte (MicroLabExAO, collège, université ou recherche), l'identification des capteurs connectés à la carte et l'acquisition des données provenant de ces capteurs.

La carte est connectée à l'ordinateur via un câble USB.2. L'alimentation se fait à partir de ce même câble ; cependant une alimentation externe est envisageable via une batterie ou un transformateur externe. Cette alternative permet d'alimenter la carte sous 9 V (Max) pour permettre l'utilisation de certains capteurs gourmands en énergie. L'interface intègre en outre un module d'alimentation -5V et un module d'alimentation stabilisée 3.5 V qui sert essentiellement à alimenter le Convertisseur Analogique/Numérique (CAN) du PIC.

2.4. Le PIC 18F452

Le PIC18F452-I/P est un microcontrôleur Flash amélioré hautes performances avec 8 canaux de convertisseur analogique-numérique (A/N) 10 bits. Le PIC18F452 dispose d'un environnement de développement convivial pour le compilateur C, de 256 octets d'EEPROM, d'une auto-programmation, d'un ICD, de 2 fonctions de capture/comparaison/PWM, le port série synchrone peut être configuré en tant qu'interface périphérique série à 3 fils (SPI™) ou le

bus de circuit inter-intégré à 2 fils (I²C™) et l'émetteur-récepteur asynchrone universel adressable (AUSART). Toutes ces caractéristiques le rendent idéal pour la fabrication d'équipements, l'acquisition de données, le conditionnement de puissance et la surveillance environnementale.

Sur le tableau suivant, nous résumons les principales caractéristiques de ce microcontrôleur.

Caractéristiques	PIC18F452
Fréquence de fonctionnement	DC - 40 MHz
Mémoire programme(Octettes)	32K
Mémoire programme (Instructions)	16384
Mémoires de données (Octettes)	1536
Mémoires de données EEPROM (Octettes)	256
Sources d'interruption	18
Ports E/S	Ports A, B, C, D, E
Minuteries (Timers)	4
Modules Capture/Compare/PWM	2
Communications série	MSSP, USART Addressable
Communications Parallèle	PSP
CAN 10-bit	8 entrées
RESETS (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST)
Détection de basse tension programmable	Oui
Réinitialisation programmable en cas de défaillance	Oui
Jeu d'instructions	75 Instructions
Packages	40-pin DIP 44-pin PLCC 44-pin TQFP

Tableau 1 : Principales caractéristiques du microcontrôleur PIC18F452.

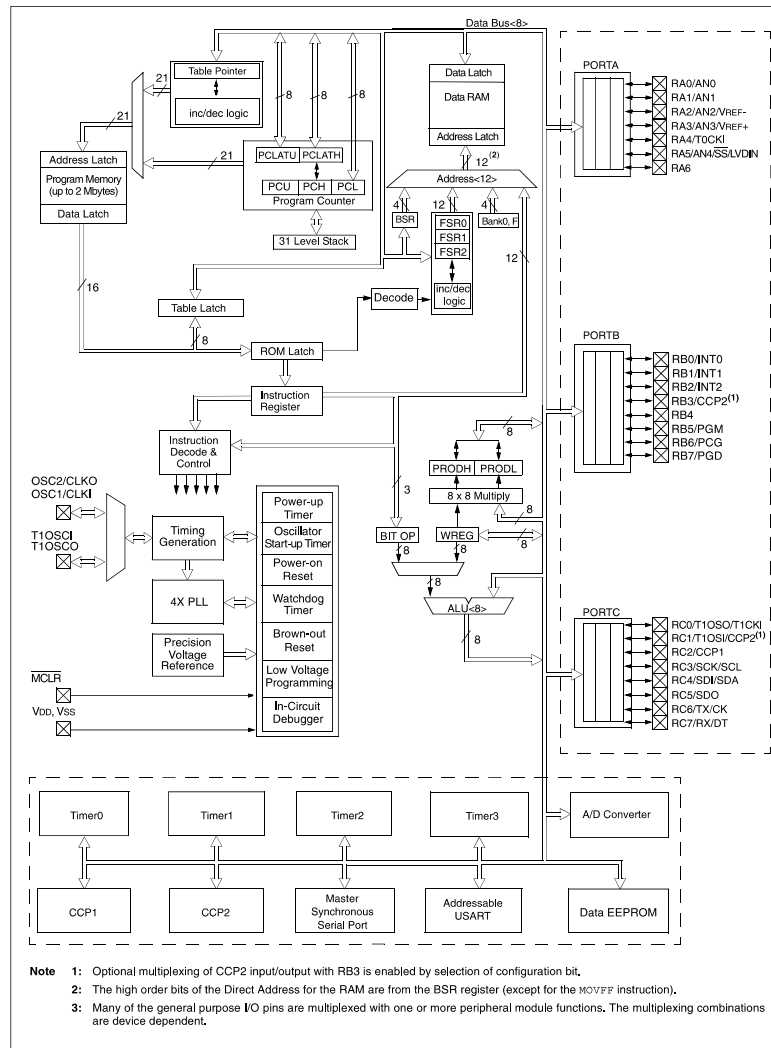


Figure 8 : PIC18F452 Block Diagram.

2.5. Port d'entrée de l'interface

La première version de l'interface « MicroLabExAO » était dotée d'un port d'entrée constitué de 50 pins comme le montre la figure 5 (a). Pour simplifier la connexion entre les capteurs et la carte d'acquisition, nous avons opté pour l'utilisation d'une connectique facile à mettre en œuvre mais aussi « bon marché ». Nous utiliserons donc le standard USB que nous modifierons à nos besoins. La nouvelle version de l'interface « MicroLabExAO », l'interface « Université » est maintenant dotée de quatre ports USB.3 Figure 5-b.

Les broches du port USB.3 sont présentées sur la Figure 9.

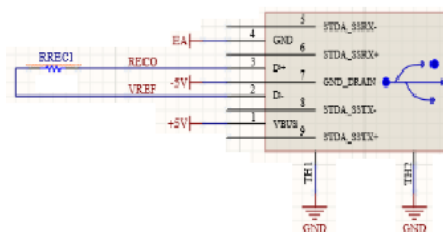


Figure 9 : Broches du connecteur USB3 destiné à connecter les capteurs à la carte.

Les principales broches sont les broches dédiées à l'alimentation (GND, 5V et -5V) des circuits de conditionnement des capteurs, les broches dédiées à la reconnaissance de capteurs E_{reco} et la broche d'acquisition E_A .

Sachant que le CAN de la carte d'acquisition est alimenté entre 0 et 3.5V, tout capteur à développer devra être conditionné de telle sorte à avoir une tension exploitable en entrée de l'interface variable dans cette même plage, à savoir [0,3.5V].

Afin d'identifier le capteur connecté à la carte sans intervention de l'utilisateur, chaque capteur est doté d'une résistance de reconnaissance connectée entre la broche E_{reco} (entrée de reconnaissance) et la broche 3.5 V. Cette résistance constitue un pont diviseur de tension, avec une résistance fixe de 100 k Ω logée sur la carte d'acquisition et connectée entre la broche E_{reco} (entrée de reconnaissance) et la masse : GND.

Le microcontrôleur utilisé possède uniquement 8 entrées analogiques : 4 sont dédiées à la fonction principale de la carte qui est l'acquisition des données, 2 pour les sorties des amplificateurs programmables et il en reste 2 pour l'identification des capteurs. Pour remédier à cela, les entrées de reconnaissance de capteurs sont multiplexées ; ainsi une seule entrée du PIC est utilisée pour cette fonctionnalité.

2.6. L'amplificateur à décalage programmable

Un élément important de la carte d'acquisition qui sert à analyser les signaux de faibles amplitudes est l'amplificateur à décalage programmable [97].

Pour amplifier un signal en utilisant cet amplificateur, l'utilisateur précise le seuil inférieur et supérieur en utilisant l'outil graphique du logiciel. Ainsi la composante continue du signal est déterminée et enlevée avant que le signal soit amplifié (Figure 10). Le gain de l'amplificateur est programmable via une communication SPI entre le pic et des résistances programmables MCP42100 [98].

Ce circuit permet de dépasser les inconvénients d'un zoom électronique simple, car il permet d'exploiter la totalité de la résolution du CAN pour présenter l'information recherchée.

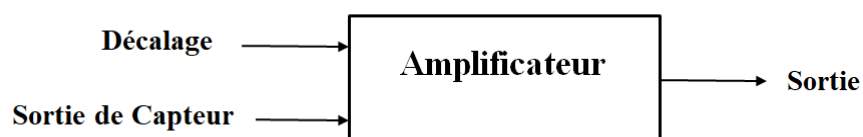


Figure 10 : Principe de l'amplificateur à décalage programmable.

2.7. Les microcontrôleurs SAME70 et leurs avantages

La nouvelle carte d'acquisition, est conçue autour de la carte SAME70 Explained. Cette dernière embarque le microcontrôleur ATSAMS70Q21 de la famille SAME70, basé sur les microprocesseurs RISC Arm Cortex-M7 32 bits.

En effet ces microprocesseurs Cortex-M sont caractérisés par leur unité de calcul en virgule flottante (FPU) de haute précision. Pour cela ils sont utilisés comme étant des processeurs de

signaux numériques (DSP), pour des applications telles que la synthèse sonore et la reconnaissance vocale.

Les microcontrôleurs SAME70 quant à eux s'adressent aux applications IoT exigeant un ensemble étendu de périphériques de connectivité. Pour cela cette série de microcontrôleurs possède un ensemble de périphériques de connectivité avancés, à savoir : un MAC Ethernet 10/100 Mbps prenant en charge le protocole IEEE 1588, double CAN FD 1.0, hôte et périphérique USB haut débit avec PHY haut débit sur puce.

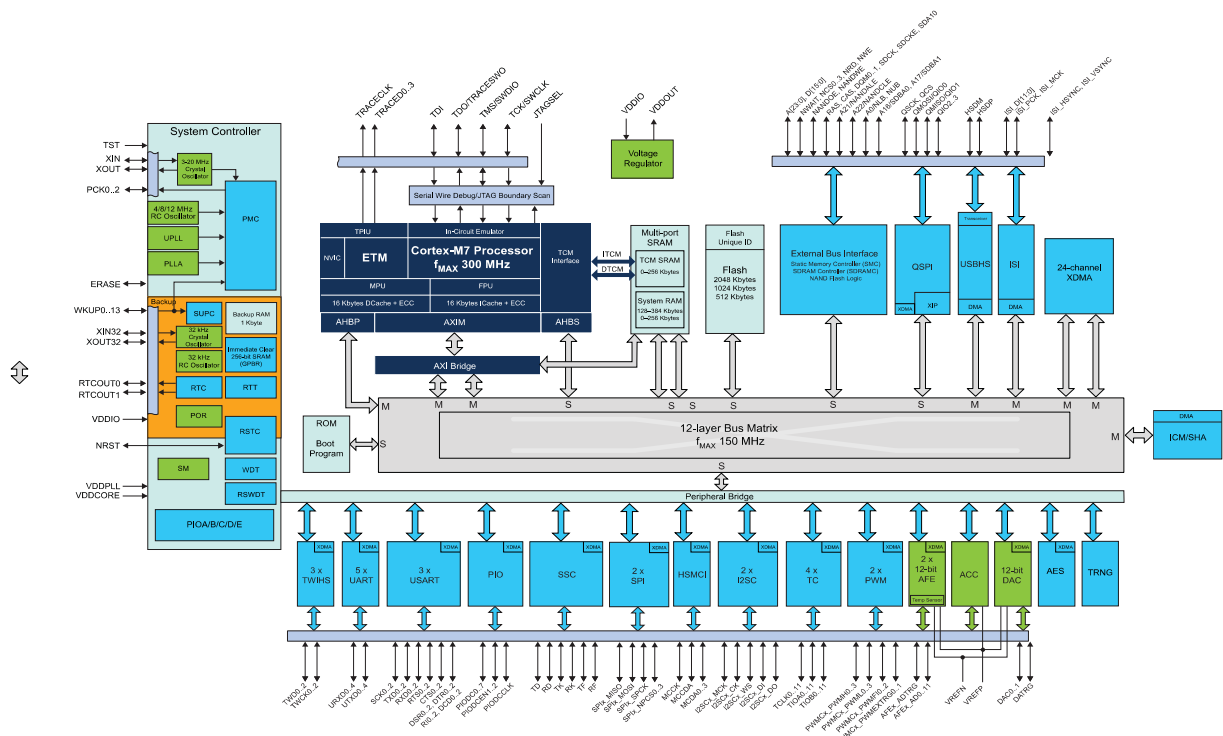


Figure 11 : SAME70 Block Diagram.

Les microcontrôleurs SAME70 fonctionnent à une vitesse maximale de 300 MHz et possèdent jusqu'à 2 Mo de mémoire Flash, deux mémoires cache de 16 Ko et jusqu'à 384 Ko de mémoire SRAM. Ces microcontrôleurs, possèdent également deux Front-end analogiques avancés basés sur deux ADC 12 bits offrant une correction des erreurs de décalage et un contrôle de gain.

Les Microcontrôleurs ARM cortex, possèdent une fonctionnalité appelée « sleepwalking » sur les interfaces UART et I²C, permettant de réactiver temporairement et de manière asynchrone un périphérique pour effectuer une tâche sans faire sortir l'unité centrale du mode veille. Cette fonctionnalité permet une optimisation énergétique.

La plage de température de fonctionnement est comprise entre -40°C et 105°C.

Une comparaison entre les microcontrôleurs utilisés dans chaque version est présentée sur le tableau suivant :

Caractéristiques		Pic 18F452	ATSAMS70Q21
Taille de mémoire programme (kB)		32	2048
vitesse maximale (MHz)		40	300
type de UCT		Risc UCT	ARM-Cortex7
Résolution de CAN (bits)		10	12
Taux d'échantillonnage (ksps)		100	1700
Nombre d'E/S		40	114
Taille d'instructions (bits)		16	32
Protocoles de communications	Canaux CAN	10	24
	RS232	x	x
	USB	-	x
	SPI	x	x
	I2C	x	x
	Ethernet	-	x

Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques des microcontrôleurs utilisés dans chaque type de carte d'acquisition.

2.8. Environnement de développement

Pour programmer la nouvelle carte d'acquisition, nous avons opté pour le langage C et la plateforme Atmel studio 7. Ce dernier est un environnement de développement intégré (IDE) pour l'écriture et le débogage des programmes AVR/ARM sous Windows XP/Windows Vista/Windows 7/8. Il fournit un outil de gestion de projet, un éditeur de fichiers source, un simulateur, la programmation et le débogage sur puce.

Cet IDE permet de réduire les délais de développement, vu qu'il contient les pilotes, bibliothèques et des exemples de projets facilitant le développement de projet à base de microcontrôleurs Atmel.

2.9. Algorithme de l'application

L'application initialise l'horloge, les ports, les AFEC et les autres périphériques.

Une fois la carte d'acquisition connectée, une LED verte s'allume pour confirmer à l'utilisateur son bon fonctionnement. Les actions qui suivent dépendent des commandes reçues via le port série RS232. Une fois une commande reçue, une vérification de cette dernière est effectuée pour pouvoir déterminer les sous-routines à exécuter.

Tout d'abord le logiciel exécute une commande de demande d'authentications : la carte reçoit cette commande d'identification de type d'interface connectée (MicroLab (d'origine), collège, université ou recherche.).

En effet l'identification du type de la carte est essentielle pour activer ou désactiver certaines fonction et mode d'acquisition sur le logiciel, identifier le nombre de capteurs pris en compte par l'interface et aussi pour choisir le « look-up table » des résistances de reconnaissance des capteurs, vu que le CAN des cartes université et collège sont sur 10 bits et ceux de la carte recherche sont de 12 bits.

La deuxième étape consiste à identifier les capteurs connectés (nombre, type, gamme de mesure, fonction d'étalonnage...).

La dernière étape consiste à acquérir les données envoyées par le capteur et les envoyer. Ici on distingue deux modes de fonctionnement :

- **Mode normal** : pour des signaux où la fréquence maximale ne dépasse pas les 20 kHz, l'acquisition est faite en temps réel dur. Cette limite est exigée par le baudrate maximal utilisé (921600).
- **Mode rapide** : pour des signaux dont la fréquence est comprise entre 20 kHz et 4 Mhz, l'acquisition est faite en temps différé. D'abord l'acquisition est faite au niveau de l'interface, puis les données sont envoyées à l'ordinateur sous forme de « packet » pour traitement et affichage.

La période d'acquisition est choisie par l'utilisateur et ne dépasse pas les 20 mins, période calculée en se basant sur la mémoire de l'interface. Cette période est suffisante, vu qu'un phénomène ne peut pas être à la fois rapide et progressif dans le temps, ce qui est très exigeant en terme d'énergie (au moins pour la carte d'acquisition).

En ce qui concerne la fréquence d'échantillonnage, deux possibilités ont été programmées et sont offertes :

- **Utilisateur** : l'utilisateur a la possibilité de déterminer lui-même l'intervalle entre deux acquisitions.
- **Automatique** : pour des phénomènes inconnus et/ou les utilisateurs non familiers à la notion d'échantillonnage, une sous-routine permettant d'identifier la fréquence du signal est exécutée. La fréquence d'échantillonnage est choisie en se basant sur le théorème de Shannon.

L'algorithme de l'application implémentée au niveau de la carte d'acquisition est présenté sur la figure 12, celui de logiciel pilote est présenté sur la figure 13 et les résultats obtenus sont présentés sur le tableau 3.

L'ordinateur envoie des commandes au PIC ; ce dernier répond à ces commandes. L'ordinateur analyse les données reçues et effectue leurs traitements.

Identification de la carte : une fois la carte connectée la LED verte s'allume et la carte vérifie en boucle infinie si une commande est envoyée sur le lien série.

Tant que le logiciel n'est pas exécuté, cette dernière ne reçoit rien, sauf s'il s'agit de commandes tests envoyées sur le lien série depuis le « data visualizer » de l'environnement Atmel studio.

Une fois le logiciel exécuté, la carte connectée reçoit la demande d'identification de type. En réponse à cette requête, elle envoie un chiffre préprogrammé sur le microcontrôleur au logiciel de l'ordinateur. En se basant sur le chiffre reçu, le logiciel identifie le type de la carte connectée (MicroLabExAO, Université, Collège ou Recherche).

Du point de vue ordinateur, si le logiciel envoie cette commande, mais ne reçoit rien ou reçoit une réponse qui n'est pas attendue, le logiciel considère qu'aucune carte d'acquisition n'est connectée et s'initialise en mode simulation. Ce mode permet d'ouvrir des expériences déjà

réalisées et qui ont été sauvegardées. Ceci permet d'effectuer le traitement des données enregistrées (modélisation mathématiques des données, ajout des commentaires ...).

Reconnaissance de capteur : Lorsque la carte reçoit une commande d'identification de capteur connecté, elle vérifie toutes les entrées dédiées à cette reconnaissance et renvoie les valeurs lues sur ces entrées dans l'ordre (i de 0 à 3), séparées par une virgule. Ainsi l'ordinateur pourra identifier le type de capteur connecté sur chaque port de la carte. Si la valeur de reconnaissance envoyée est inférieure à 12, l'ordinateur considérera qu'aucun capteur n'est connecté et qu'il s'agit uniquement de bruit au niveau de cette entrée. Cette valeur (< 12) est déterminée expérimentalement.

Dans le cas où la valeur est supérieure à 12, l'ordinateur identifie le capteur en se basant sur le tableau des résistances de reconnaissance résidant dans un fichier xml externe au logiciel, dans le cas des cartes (MicroLab, Université, Collège) cette valeur varie entre 13 et 1023, et dans le cas de la carte recherche cette valeur varie entre 13 et 4095.

Tant que l'acquisition en mode graphique n'est pas exécutée, l'ordinateur envoie des requêtes d'identification de capteurs connectés. Ainsi, l'ordinateur pourra identifier si un capteur a été retiré, remplacé ou si un autre a été connecté. Cependant, afin de gagner en terme de vitesse d'acquisition, cette option n'est pas vérifiée au moment de l'acquisition sur graphique. Donc, si un capteur est déconnecté en cours d'acquisition par l'utilisateur, le logiciel continue à le considérer comme présent sur l'entrée où il a été connecté.

Acquisition des données : Si un capteur n'est pas connecté ($\text{Reco}(i) < 12$), l'ordinateur n'envoie pas de requête d'acquisition des données de l'entrée analogique associée. Dans le cas contraire, l'ordinateur envoie des requêtes d'acquisition de données dans l'ordre (i allant de 0 à 3) chaque 100 ms (valeur par défaut). En réponse à cette requête, la carte retourne la valeur lue sur l'entrée analogique correspondante à l'ordinateur. Ce dernier appelle la fonction d'étalonnage correspondante au type de capteur identifiée par $\text{Reco}(i)$ et affiche la valeur de la mesurande.

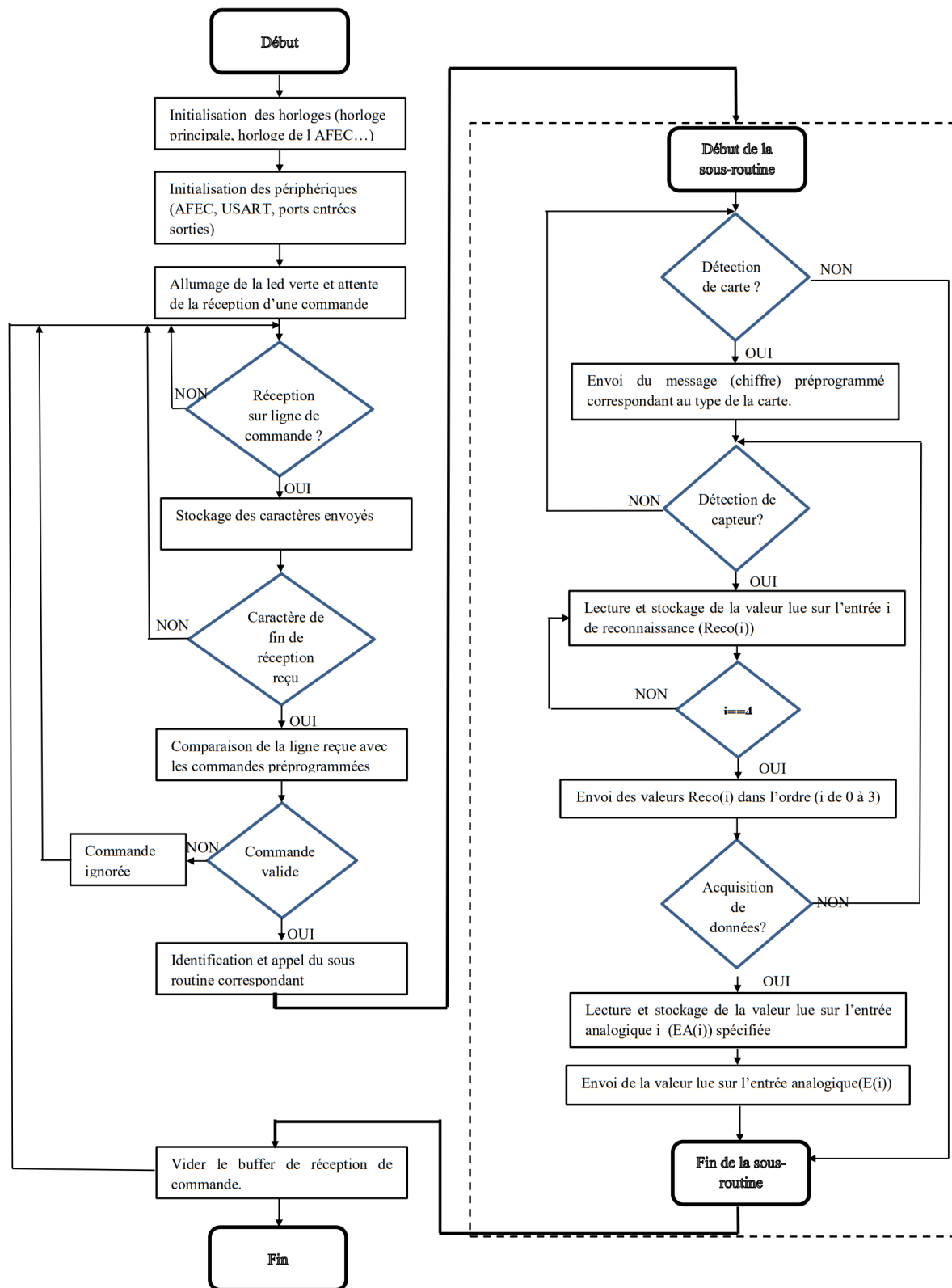


Figure 12 : Algorithme du programme.

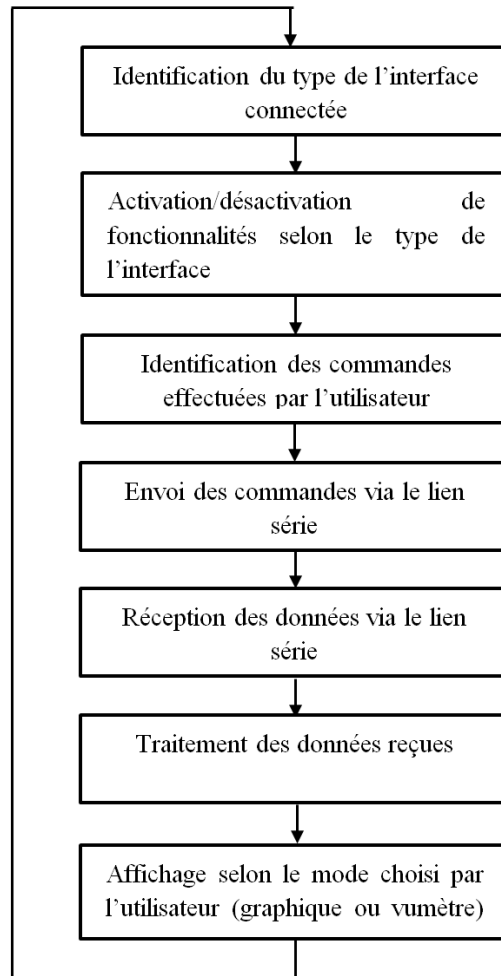


Figure 13 : L'algorithme de l'application implémentée au niveau du logiciel d'acquisition.

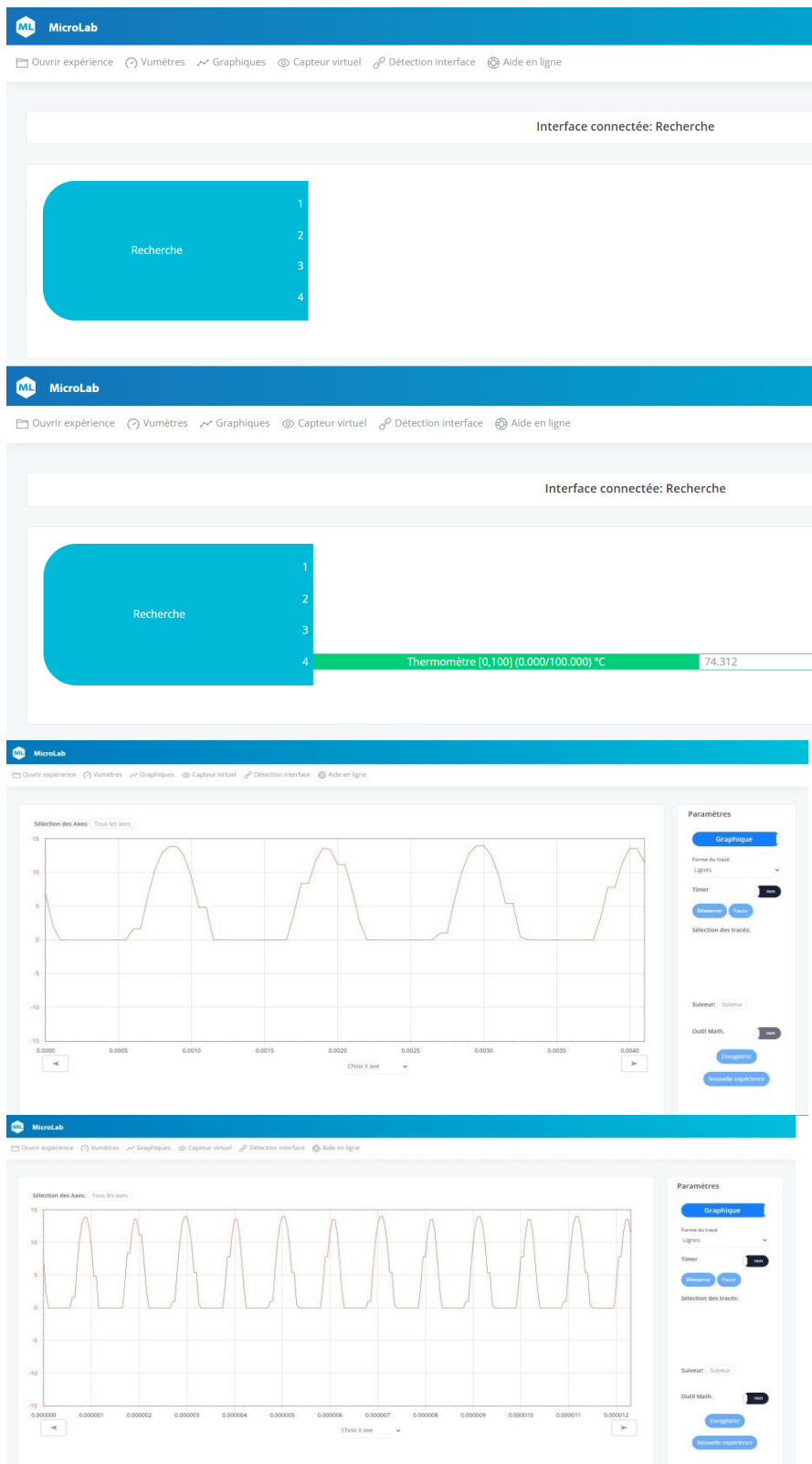


Tableau 3 : Images des tests effectués, {a} test de détection de carte, {b} reconnaissance de capteur de température, {c} acquisition d'un signal de fréquence 20 kHz en temps réel, {d} acquisition de signal de fréquence 1 MHz en temps différé.

3. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les trois types d'interfaces d'acquisition utilisées et leurs principaux éléments et caractéristiques.

Nous avons comparé les performances des microcontrôleurs utilisés dans les différentes interfaces, et nous avons particulièrement présenté les résultats des premiers tests effectués avec l'interface « recherche ». En effet cette interface permet de traiter des signaux dont la fréquence atteint les 2 MHz, soit une fréquence 1000 fois plus grande que la fréquence maximale du signal qu'on peut acquérir avec les deux interfaces Collège et Université.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les protocoles expérimentaux qui ont été réalisés avec la technologie ExAO et l'impression 3D, ainsi que les caractéristiques des capteurs développés pour leurs réalisations.

Chapitre 3 :

Protocoles et capteurs réalisés

Chapitre 3 : Protocoles et capteurs réalisés

1. Introduction

Dans le chapitre précédant, nous avons présenté notre contribution dans le développement des interfaces d'acquisition.

Dans ce chapitre, nous allons présenter tous les capteurs que nous avons développés et/ou mis au point dans le cadre de nos travaux de recherche. Ces capteurs ont d'abord été mis au point pour une application bien précise avant d'être normalisé et produit pour d'autres applications. Tout au début, le problème était de répondre à la demande d'un enseignant pour la conversion d'un travail pratique (TP) en une expérimentation assistée par ordinateur (ExAO). En tant que physiciens nous réfléchissons à une solution que nous résolvons en proposant aux électroniciens un montage qui permettra, quant à lui, de traduire la grandeur physique en une grandeur électrique. Ainsi, pour illustrer ceci, nous décrirons succinctement le travail pratique en premier, suivi du ou des capteurs réalisés dans ce cadre-là et ceci pour toutes les disciplines : biologie, chimie, physique, géologie

2. Les travaux pratiques en physique et les capteurs associés

2.1. Capsule universelle

Afin d'initier les étudiants à l'ExAO, ou pour tester certains capteurs dont la sortie est une résistance (thermistance, photorésistance ...) ou tension simple variables (piézo-électrique...), nous disposons d'un circuit que nous appelons « Capsule universelle ». Le principe de ce circuit, est basé sur le circuit du pont diviseur comme le montre la figure 14. Le pont est constitué d'une résistance fixe soudée sur le circuit de la capsule, et une résistance variable qui est le capteur utilisé.

Un ensemble de capteurs peut être utilisé facilement pour réaliser différents TPs. Prenons l'exemple du TP de « l'étude des mouvements de pendule pesant ». Pour effectuer ce TP, l'étudiant utilise une résistance variable liée au pendule : nous utilisons pour cela un potentiomètre rotatif sans fin. La seule contrainte est de trouver des potentiomètres à très faibles forces de frottement. (Dans la même logique, on pourra aussi réaliser le pendule de torsion ou les pendules couplés).

Lors de son mouvement, le pendule fait varier la résistance. Cette variation est traduite en une variation de tension à l'entrée de la carte d'acquisition via la capsule universelle.

L'étudiant a la possibilité d'effectuer lui-même l'étalonnage de son instrument de mesure. Sur le logiciel pilote, l'étudiant saisie les valeurs de l'angle de rotation Θ du pendule, lues sur un rapporteur. La fonction $\Theta = f(U)$ peut être obtenue en utilisant l'outil mathématique de l'interface.

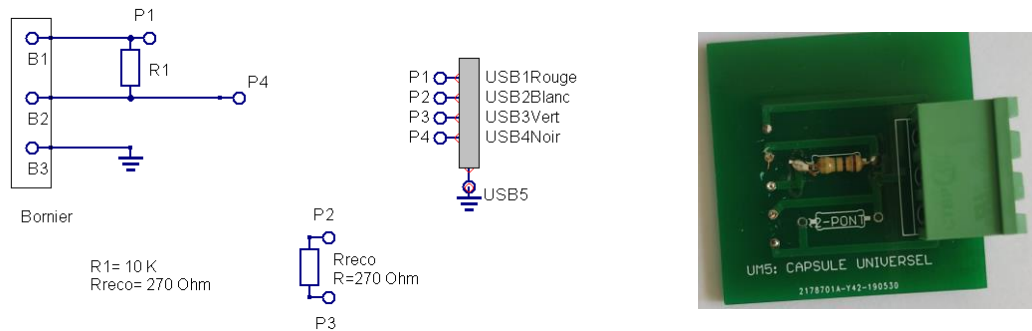


Figure 14 : Schéma de la capsule universelle.

2.2. Électricité : Caractérisation d'une photopile

L'objectif de ce TP est de déterminer l'effet de l'éclairement d'une photopile sur sa caractéristique courant-tension. Pour réaliser ce TP, une source lumineuse est placée à une distance de 30 cm de la photopile. L'étudiant établit d'abord et ajuste un éclairement de 500 W/m^2 ; il procède ensuite à une mesure de tension et de courant aux bornes d'une résistance variable alimentée par la photopile.

Pour se faire, les étudiants utilisent un voltmètre et un ampèremètre traditionnels et relèvent les résultats manuellement sur un tableau. Les résultats sont à la fin du TP représentés sur papier millimétré.

Pour réaliser ce TP en ExAO, nous avons besoin de deux capteurs : un capteur de tension $[-15,15] \text{ V}$ et un capteur de courant $[-1,1] \text{ A}$.

Le résultat obtenu est présenté sur la figure 15.

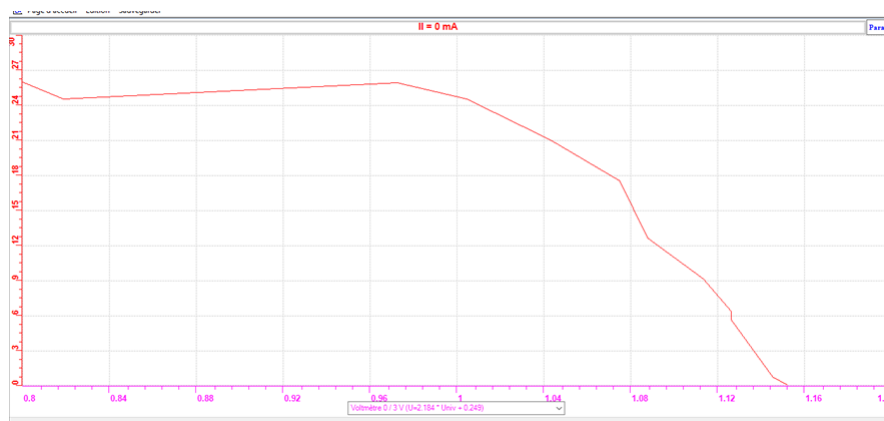


Figure 15 : La variation du courant en fonction de la tension aux bornes d'une résistance variable alimentée par la photopile.

2.2.1. Capteur de tension $[-15,15] \text{ V}$

Comme nous l'avons vu plus haut, la tension exploitable en entrée de l'interface varie dans un intervalle $[0,3.5 \text{ V}]$. Pour pouvoir mesurer des valeurs symétriques (négatives et positives), nous divisons cet intervalle en deux parties : $[0,1.75 \text{ V}]$ pour les valeurs négatives et $[1.75,3.5 \text{ V}]$ pour les valeurs positives. Pour avoir un maximum de tension d'entrée égal à 1.75 V , la tension d'entrée sera divisée par un facteur de 8.6. Un décalage de 1.75 V est ensuite

appliqué à cette tension pour pouvoir lire les tensions négatives. Ainsi la tension d'entrée variable entre $[-15,15]$ V est vu comme une tension variante entre $[0,30]$ V. Le circuit du capteur réalisé est présenté sur la figure 16.

• Performances du capteur

L'amplificateur utilisé doit avoir une tension de saturation supérieure à 3.5 V et une vitesse de balayage (slew rate) adaptée qui permettra de mesurer la tension sans distorsion. Dans notre cas, nous utilisons l'amplificateur LM324 [99]. La tension de saturation de cet amplificateur est 3.7 V pour une alimentation bipolaire ± 5 V, et sa vitesse de balayage (V_b) est 0.3 V/ μ s.

A savoir que :

$$V_b = 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot U \quad (1)$$

Avec U la tension pic à pic en entrée de l'amplificateur et f la fréquence de signal en Hz.

Le capteur fabriqué, nous permet de mesurer sans distorsion une tension variable entre $[-15,15]$ V, ayant une fréquence maximale de 13.5 kHz. Ces performances sont satisfaisantes dans les conditions actuelles. Cependant l'utilisation d'un autre amplificateur, tel que le TL074, dont la vitesse de balayage est égale à 13 V/ μ s, permettra de mesurer sans distorsion une tension variable entre $[-15,15]$ V ayant une fréquence de 591 kHz.

La résolution (R_s) du capteur quant à elle, est principalement liée au pas de quantification du convertisseur analogique numérique de la carte d'acquisition, en effet :

$$R_s = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{2^n} \quad (2)$$

Avec n le nombre de bits du convertisseur utilisé, égale à 10.

La résolution du capteur est donc égale à 29 mV.

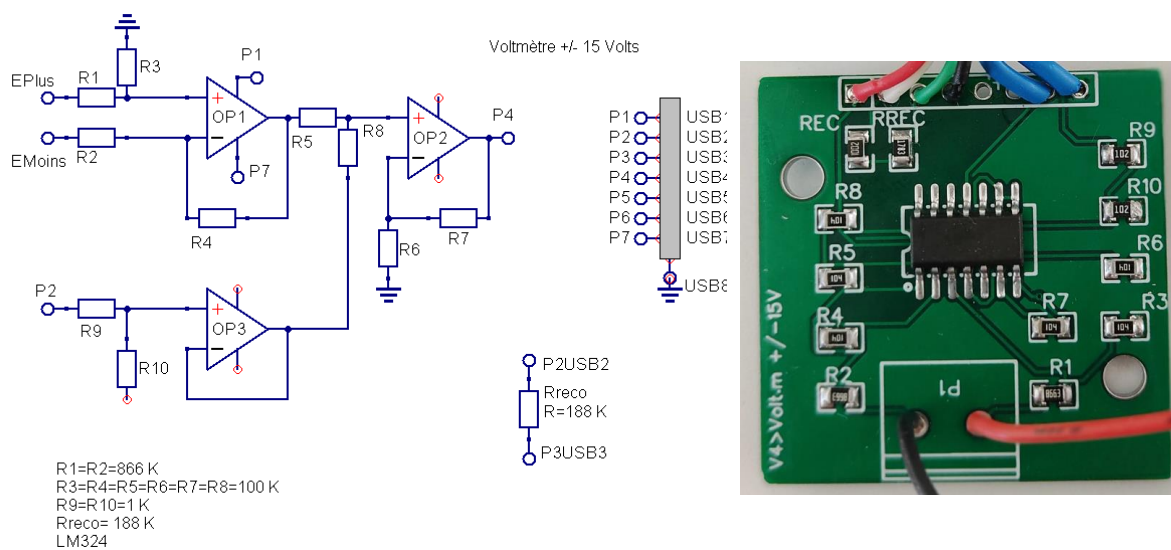


Figure 16 : Schéma et image du capteur de tension $[-15,15]$ V.

La **sensibilité** des voltmètres est déterminée en divisant la résistance interne par le calibre. Dans notre cas la sensibilité est égale à $32.2 \Omega/\text{mV}$.

L'**incertitude** de mesure est de $\pm 0.1\%$.

2.2.2. Capteur de courant [-1,1] A

Plusieurs méthodes permettent de mesurer le courant, suivant la plage de mesure souhaitée, avec ou sans isolation galvanique, avec ou sans composante continue...etc. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser le montage à base de résistance de shunt.

Cette méthode, consiste à mesurer la tension aux bornes d'une résistance pour déterminer le courant la traversant. La résistance de shunt utilisée est d'une valeur égale à 0.25Ω et une puissance de 2 W. Le circuit du capteur réalisé est présenté sur la figure 17.

• Performances du capteur

L'amplificateur utilisé est le LM324, permet de mesurer sans distorsion, un courant en entrée variable entre [-1,1] A avec une fréquence maximale de 13.5 kHz.

La **résolution** du capteur est également liée au CAN et est égale à 0.49 mA.

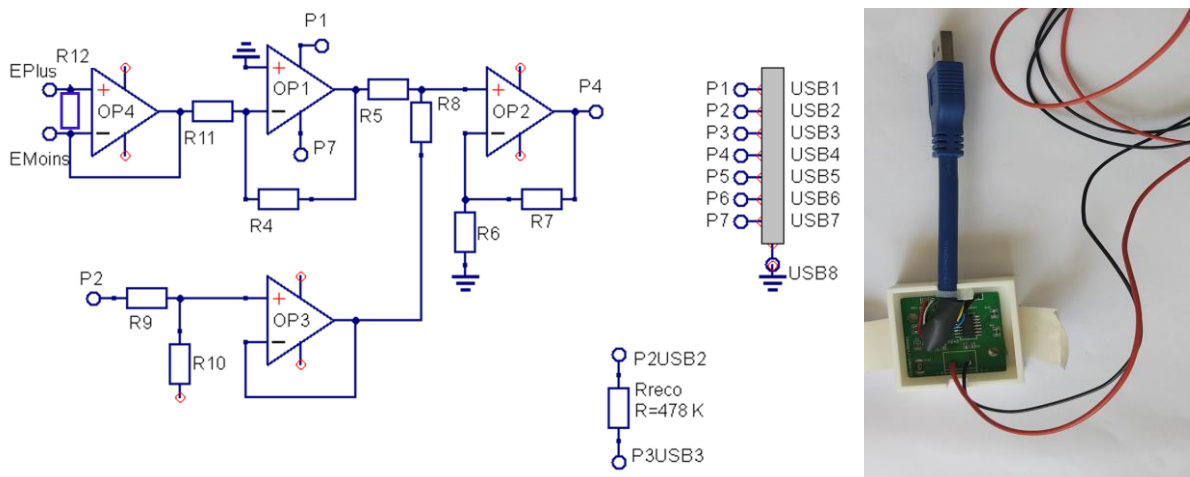


Figure 17 : Schéma et image du capteur de courant [-1,1] A.

La **sensibilité** est la pente de la fonction $I = f(U)$, et est égale à 1.75 V/A .

L'**incertitude** de mesure est de $\pm 0.1\%$.

Les capteurs de tension et de courant, sont deux capteurs essentiels pour l'expérimentation en physique. Ils sont utilisés non seulement pour mesurer le courant et la tension, mais aussi pour mesurer les puissances électriques, les résistances etc.

En effet, pour construire un capteur de puissance à partir des capteurs de courant et de tension, l'utilisateur fait appel à l'outil « **capteur virtuel** » de l'interface. Cet outil, permet d'exploiter les formules physiques pour mesurer des variables indirectement à partir des capteurs connectés. Dans le cas de la construction de Wattmètre, l'utilisateur fait appel à la relation $W = U.I$ et utilise les capteurs de courant et de tension connectés à l'interface. De la même

façon, en utilisant la relation $U = R.I$, nous pouvons construire un Ohm-mètre sur la base des deux capteurs connectés.

2.3. Conduction thermique dans une barre métallique

L'objectif de ce TP est l'étude de la conduction thermique le long d'une barre métallique et la mesure de la diffusivité thermique du métal qui la constitue.

En effet, la conduction thermique est le mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact sans déplacement appréciable de matière.

Pour étudier ce phénomène, nous utilisons une barre métallique de rayon r et de longueur L (avec $L \gg r$), chauffée par effet Joule à une de ses extrémités à l'aide d'une résistance chauffante. Un régulateur de tension permet de réguler la température en ce point. Pour relever la température au cœur du matériau à différentes distances de la source de chaleur, la barre est percée d'orifices ($\varnothing 1,5$ mm) où l'on place des capteurs de température.

La méthode traditionnelle, consiste à utiliser quatre thermocouples. La précision des résultats obtenus dépend de la précision des thermocouples utilisés, mais aussi de la synchronisation entre étudiants surveillant les thermocouples au moment de la prise de mesure. Aussi la barre doit être suffisamment longue sans encombrer l'espace de travail. Pour pouvoir considérer la barre infiniment longue : nous prendrons $L = 100 r$.

Pour pouvoir réaliser cette expérience en ExAO, nous avons réalisé des capteurs de température à base de thermistance. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 18.

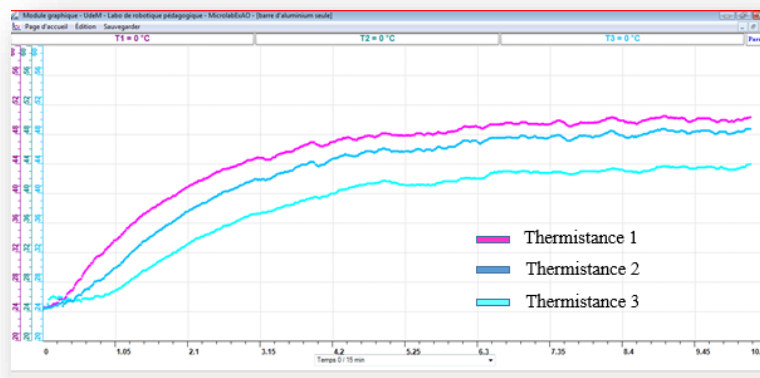


Figure 18 : Evolution de la température en 3 positions de la barre traduisant la diffusion de la chaleur.

Capteur de température

Pour construire un capteur de température, nous utilisons la thermistance de type CTN (Coefficient de température négatif) RL0503-2890-95-MS [100].

La réponse des thermistances est hautement non-linéaire et est modélisée par l'équation de Steinhart-Hart [103,104] :

$$1/T = A + B \times \ln(R) + C \times (\ln(R))^3 \quad (3)$$

Qui peut s'écrire sous la forme :

$$R(T) = R_{T_0} \cdot \exp \left[\beta \frac{T_0}{T - 1} \right] \quad (4)$$

Les températures sont exprimées en degrés Kelvin ; β est un paramètre caractéristique de la thermistance, qui exprime la pente de la courbe résistance-température et est calculée en mesurant les valeurs de résistance du dispositif à trois points de température. Dans notre cas β est égal à 3984. R_{T_0} est la valeur de la résistance à $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

La réponse de la thermistance utilisée est présentée sur la figure 19.

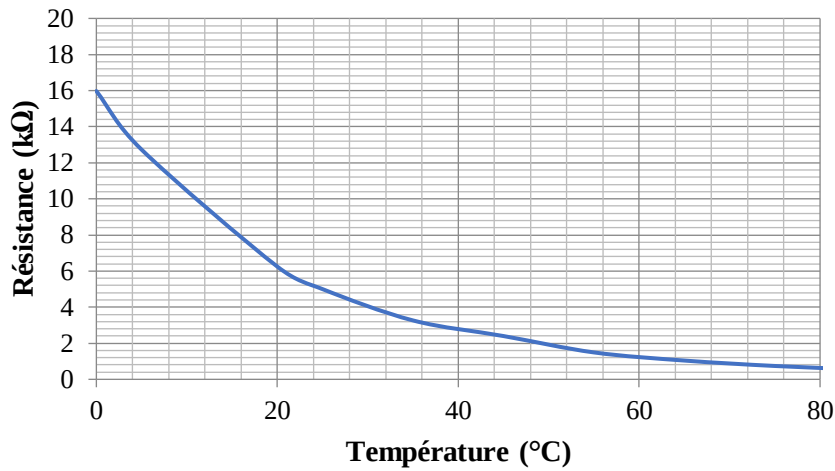


Figure 19 : Caractéristique (Température, Résistance) de la thermistance [100] utilisée.

L'équation (4) suppose que la thermistance fonctionne sous la condition de puissance nulle, ça veut dire que l'alimentation ne provoque pas d'auto-échauffement de la thermistance.

Pour vérifier cette condition, nous calculons le courant admissible maximal qui peut traverser la thermistance. Ce courant maximal est donné par l'équation suivante [103]:

$$I_{\max} = \left(\frac{\Delta TC}{R_{T,\min}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$I_{\max} = 0.37 \text{ A}$$

Avec ΔT l'erreur d'auto-échauffement minimal, que nous avons fixé à 0.05°C , C désigne la constante de dissipation de la thermistance égale à 1.4 mW/C , $R_{T,\min}$ est la valeur minimale de la résistance de la thermistance dans l'intervalle de fonctionnement choisi.

Il existe deux méthodes de linéarisation : la première est basée sur le pont de Wheatstone, et la 2^{ème} est un montage résistances-série-parallèle [106,107].

Dans notre cas, nous avons opté pour la seconde méthode vue la simplicité du montage et de son utilisation.

La fonction de transfert du montage s'écrit :

$$f(T) = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_p} + \frac{R_s}{R_T}} \quad (6)$$

Avec R_s la résistance en série et R_p la résistance en parallèle à R_T .

Dans la perspective de linéariser la réponse du montage réalisé (voltage, température notée $f(T)$), sur une plage de fonctionnement déterminée, il nous faudra choisir les composants de sorte que la dérivée seconde de la fonction de transfert du montage par rapport à la température soit nulle sur cette plage.

La forme de la fonction de transfert, ne simplifie pas la résolution de cette équation, vu qu'elle fait apparaître au moins deux inconnus et une variable R_T . Pour cela, le choix du couple (R_s , R_p) a été fixé en se basant sur le calcul de l'erreur de linéarisation.

En effet, après avoir tracé la réponse (voltage, température) pour un couple (R_s , R_p), la fonction $f(T)$ est déterminée par la méthode des moindres carrés. Le couple choisi est celui pour lequel $f(T)$ présente une erreur de linéarisation minimale.

Après avoir déterminé la valeur de R_1 et R_2 , (voir figure 20) nous avons procédé à une vérification du courant maximal traversant la thermistance.

En effet : $I = 1,32\text{mA} < I_{\text{max}}$

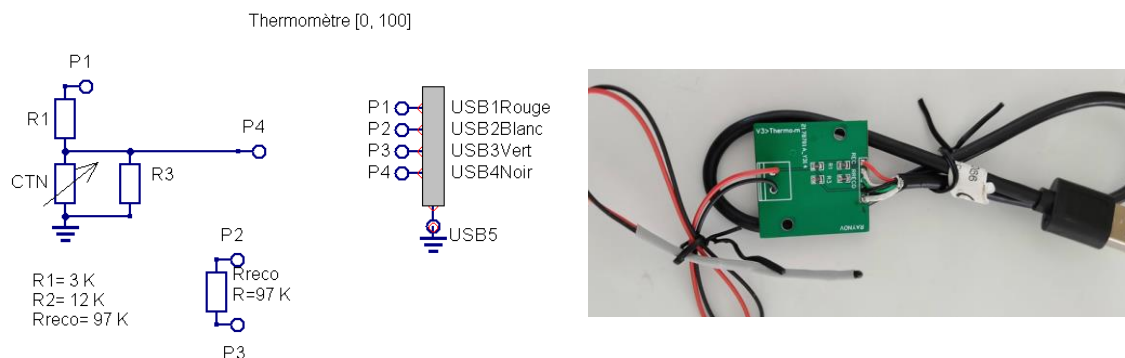


Figure 20 : Schéma et image du capteur de température.

• Performances du capteur

En se basant sur le pas de quantification du CAN et l'expression de la fonction d'étalonnage du capteur (figure 20), la **résolution** du capteur fabriqué est égale à 0.11°C .

La **sensibilité** du capteur réalisé vaut $0.035 \text{ V}/^\circ\text{C}$.

Le **temps de réponse** de la thermistance utilisée est déterminé pratiquement est vaut : 4.2 s .

Calcul de l'incertitude :

Plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'erreur de mesure. En effet, outre les erreurs dues à l'auto-échauffement de la thermistance ou à des incertitudes liées aux résistances utilisées, on doit également tenir compte des erreurs de linéarisation.

Sur la figure 21 est présentée la courbe d'étalonnage du capteur réalisé : On y voit clairement que le montage proposé permet de linéariser la réponse du circuit en température en fonction de la tension en sortie.

L'incertitude de mesure est de $\pm 1.3\%$.

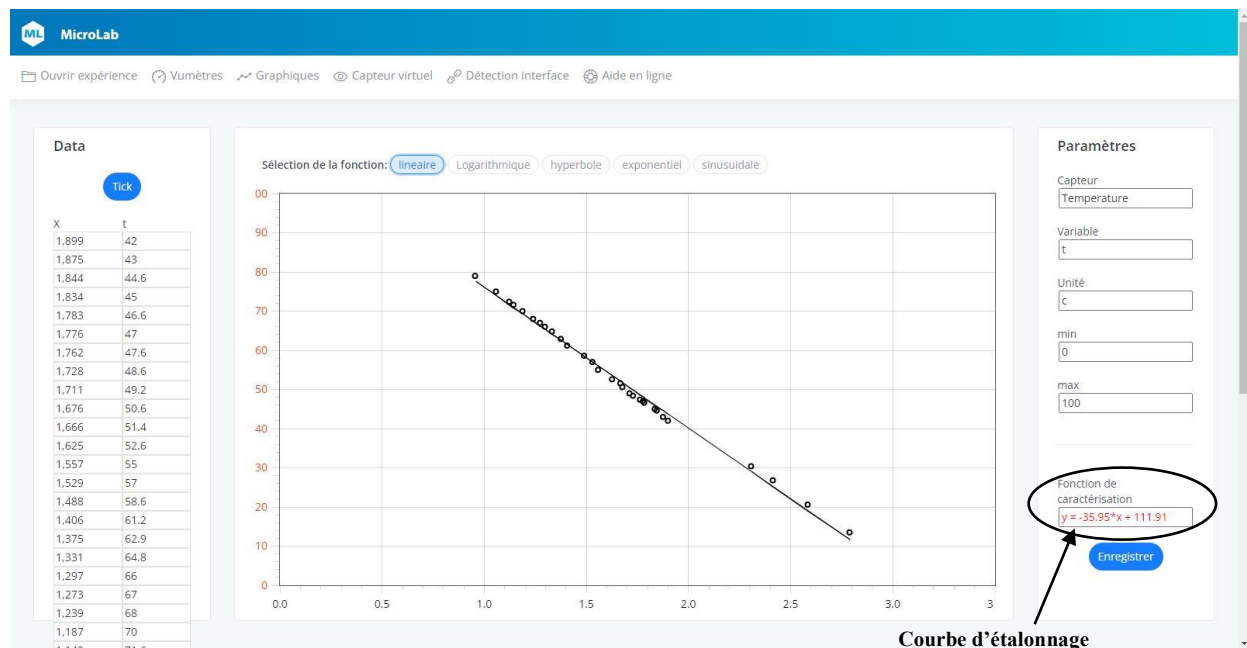


Figure 21 : Etalonnage du capteur de température avec le logiciel pilote de l'interface.

L'adoption de cette solution permet de réduire considérablement le temps de réalisation du TP. Ce dernier peut être enrichi par conséquence, en comparant les résultats obtenus avec des barres fabriquées par différents matériaux, diamètres, formes...

La résolution et la taille des CTNs, permettent de réduire également la taille des barres métalliques utilisées, ce qui permet de désencombrer l'espace de travail.

La précision des mesures est également augmentée, vu que les erreurs accidentelles sont quasiment supprimées : l'acquisition se fait en temps réel sans intervention de l'étudiant.

2.4. Mécanique : Étude des mouvements cinétiques

L'objectif de ce TP est d'étudier le mouvement rectiligne uniformément accéléré d'un mobile le long d'une trajectoire. La valeur théorique de l'accélération est égale :

$$a = \frac{m \times g}{M + m} \quad (7)$$

Avec : g l'accélération de la pesanteur égale approximativement à $9,81 \text{ m/s}^2$,

m le poids du plateaux,

M le poids du mobile (voir figure 22).

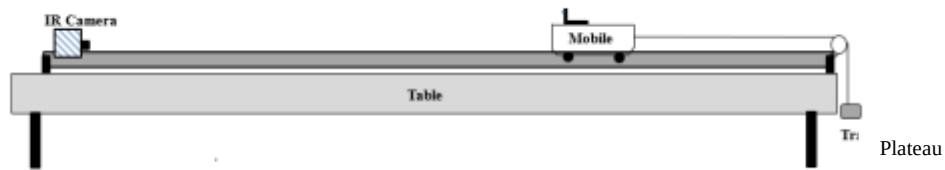


Figure 22 : Schéma illustratif de l'expérience étudiée : "mouvement rectiligne uniformément accéléré".

Ce TP est généralement réalisé à l'aide d'un capteur à ultrason. Cependant, malgré sa popularité et son faible coût, ce capteur présente certains inconvénients : principalement le calcul de la distance est entaché d'erreurs dues à la dépendance de la vitesse du son à la température et l'humidité. Ainsi, l'erreur de mesure dans l'intervalle $[0,20]$ cm peut atteindre 14.91% [108 - 110].

Pour écarter cet inconvénient, nous avons opté pour l'utilisation de l'infra-rouge au lieu des ultra-sons. Nous utilisons pour cela la caméra infra-rouge SEN 0158 [108].

Le résultat obtenu en utilisant la caméra infrarouge est présenté sur la figure 23.

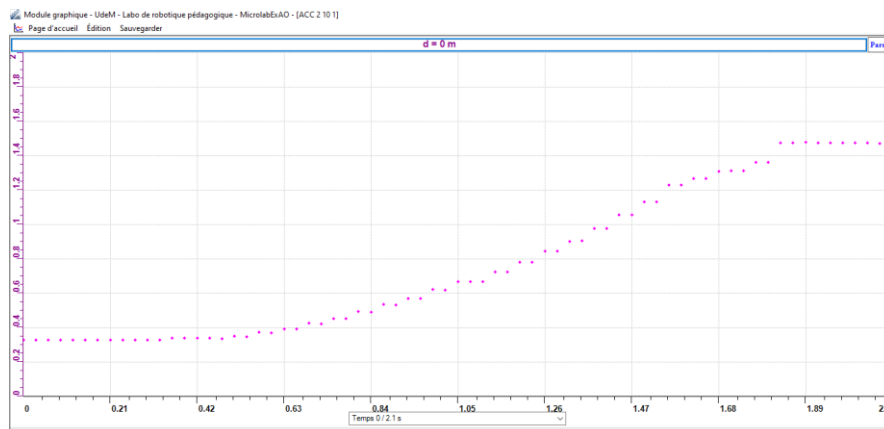


Figure 23 : Graphique obtenu en utilisant la caméra infrarouge.

Capteur caméra infra-rouge

La caméra infra-rouge SEN 0158 a la particularité de détecter jusqu'à 4 sources infra-rouges et possède les caractéristiques suivantes :

- Distance de détection allant jusqu'à 3 mètres ;
- Angle horizontale de 33° ;
- Angle verticale de 23° ;
- Résolution : 1024x768 pixels.

Pour déterminer ces coordonnées, nous avons marqué le chariot mobile par 4 sources infra-rouges (LED), formant deux couples (S1, S2) et (S3, S4).

L'objet en mouvement se déplace perpendiculairement par rapport au plan de la caméra, alors que les quatre sources infrarouges sont maintenues sur un plan parallèle à ce dernier (figure 24). La distance entre les LED étant constante, cela nous permet de déduire la position du mobile à

l'aide du principe de la triangulation optique en exploitant les coordonnées en pixels envoyés à la caméra par les deux couples lumineux.

La distance entre (S1, S2) est choisie afin de pouvoir détecter l'objet à $D_{\max}$, alors que celle entre (S3, S4) est choisie pour minimiser la zone aveugle, où le premier couple se trouve hors du champ de vision de la caméra quand le mobile est proche de cette dernière.

Pour assurer le parallélisme entre le plan de la caméra et celui des 4 sources IR, nous avons conçu et imprimé des supports à l'aide de l'imprimante 3D.

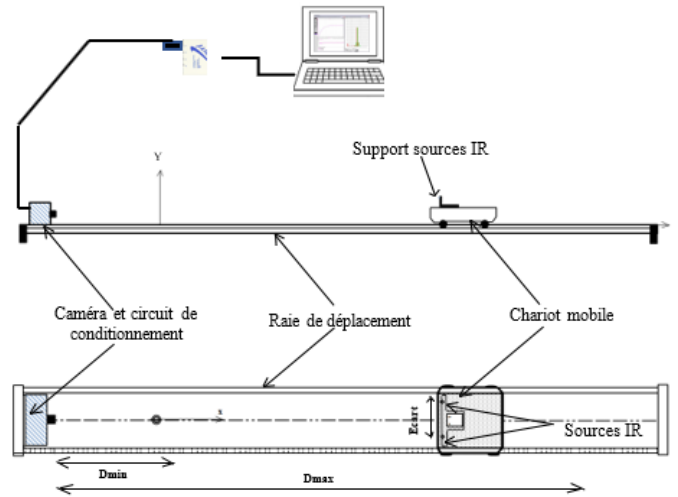


Figure 24 : Schéma du banc de mesure de distance et de vitesse.

Afin de pouvoir calculer la position du mobile, les LED doivent rester dans le champ de vision de la caméra. Ainsi nous avons placé les LED à la même hauteur que le centre de la caméra et nous avons calculé l'écart entre eux en fonction de la distance de détection qu'on souhaite avoir et de l'angle d'ouverture horizontale de la caméra.

Afin de protéger la caméra, nous la plaçons à 5 cm du champ de déplacement du mobile en tenant compte de la distance maximale de détection de l'objet, qu'on souhaite atteindre, à savoir $D_{\max}=150$ cm. Nous avons calculé l'écart entre les deux sources infrarouge (S1, S2) comme suit :

- à $D_{\max}=150$ cm : l'angle de vision doit être supérieur à 0° , pour avoir une sensibilité suffisante. La valeur empirique de cet angle est $\varphi = 3^\circ$:

$$\frac{E_{\text{cart1}}}{2 \times (D_{\max} + 5)} > \tan(3^\circ) \quad (8)$$

Nous avons pris, $E_{\text{cart}} = 16$ cm.

- Pour calculer la distance minimale de détection $D_{\min1}$ des deux points (S1, S2) nous avons:

$$\frac{E_{\text{cart1}}}{2 \times D_{\min1}} = \tan\left(\frac{33^\circ}{2}\right) \quad (9)$$

La distance de détection minimale est donc : $D_{\min1} = 27$ cm.

Pour détecter l'objet dans la zone [0,27], nous avons rajouté 2 sources IR (S3, S4). Nous avons procédé de la même manière pour calculer l'écart 2, entre ces deux sources.

- A : $D_{\max 2} = D_{\min 1} = 27 \text{ cm}$:

$$\frac{E_{\text{cart}2}}{2 \times (D_{\max 2})} > \tan(3^\circ) \quad (10)$$

Nous avons pris, $E_{\text{cart}} = 3 \text{ cm}$.

Pour vérifier la distance minimale de détection $D_{\min 2}$.

$$\frac{E_{\text{cart}2}}{2 \times D_{\min 2}} = \tan\left(\frac{33^\circ}{2}\right) \quad (11)$$

$$D_{\min 2} = 5 \text{ cm}$$

Cette distance correspond bien à la distance que nous avons prévue pour protéger la caméra.

Pour calculer la position du mobile nous allons exploiter deux données :

- La distance entre les deux points lumineux est constante,
- Les coordonnées en pixels dans une position prise comme référence sont connues.

Soient :

$N_{\max}$: Le nombre maximal de pixels,

N_{ref} : Le nombre de pixels,

N_x : Le nombre de pixels correspondant à l'écart entre les points lumineux dans une position inconnue D_x .

D'après la figure 25, à $d = D_{\text{ref}}$ nous avons :

$$\frac{E_{\text{carti}}}{L_{\text{ref}}} = \frac{N_{\text{ref}}}{N_{\max}} \quad (12)$$

$$\frac{E_{\text{carti}}}{L_x} = \frac{N_x}{N_{\max}} \quad (13)$$

On déduit à partir des équations précédentes que :

$$\frac{L_{\text{ref}}}{L_x} = \frac{N_x}{N_{\text{ref}}} \quad (14)$$

$$\frac{L_{\text{ref}}}{D_{\text{ref}}} = \frac{L_x}{D_x} \rightarrow \frac{L_{\text{ref}}}{L_x} = \frac{D_{\text{ref}}}{D_x} \quad (15)$$

Donc :

$$\frac{N_x}{N_{\text{ref}}} = \frac{D_{\text{ref}}}{D_x} \quad (16)$$

On en déduit que :

$$D_x = D_{ref} \times \frac{N_{ref}}{N_x} \quad (17)$$

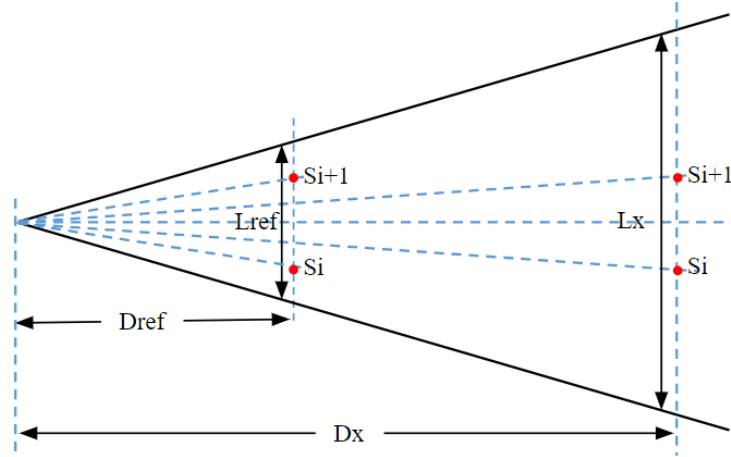


Figure 25 : Schéma du changement de l'angle de vision en fonction de la position du mobile marqué par (Si,S(i+1)) avec i = 1 ou i = 3.

La caméra SEN0158 que nous avons utilisé, communique les coordonnées des pixels lumineux en protocole I2C, les envoie à une carte « Arduino Nano » pour identifier les points (S1, S2, S3, S4) et effectuer le calcul de la distance. Alors que l'interface MicroLabExAO ne possède pas d'entrées I2C, nous avons converti le résultat obtenu en signal analogique pour pouvoir exploiter les graphes résultants avec son logiciel pilote.

Pour ce faire, nous avons utilisé un potentiomètre numérique MCP42100 pour convertir la partie entière et décimale en analogique ; la sommation est faite ensuite à l'aide d'un capteur virtuel de l'interface MicroLabExAO (figure 26).

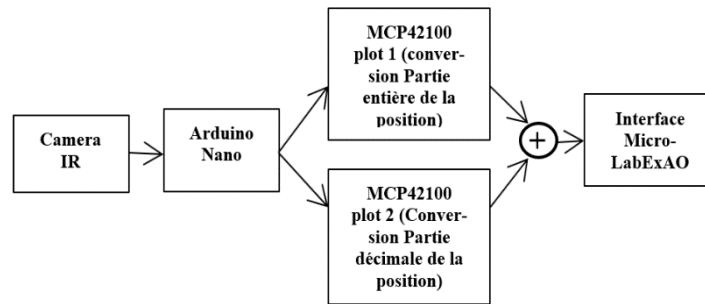


Figure 26 : Acquisition des pixels lumineux avec l'interface MicroLabExAO.

L'équation d'étalonnage de la position en fonction de la différence de potentiel (DDP), aux bornes des deux plots de la résistance numérique, obtenue par l'interface est :

$$d = (67.089 \times U1 - 4.393) + (0.67 \times U2 - 0.44)$$

Avec U1 : tension de sortie du plot 1 de la résistance en Volt,

U2 : tension de sortie du plot 2 de la résistance en Volt.

Calcul de l'incertitude :

Le calcul de la distance se fait en exploitant l'équation (17), en choisissant le point de référence dans les deux cas d'étude et en calculant le nombre de pixels N_x correspondant à la position du mobile.

Nous avons pris le point $D_{ref} = 30.3$ cm pour calculer la position du mobile dans l'intervalle [27,150] cm. Les mesures ont été prises avec un pas de 2 cm, et sont présentées dans le tableau 4 avec un pas de 10 cm.

Distance calculée (cm)	(px)	Distance mesurée (cm)	Erreur %	Distance calculée (cm)	(px)	Distance mesurée (cm)	Erreur %
30.3	769	Reference					
36.3	640	36.4	0.30%	96.3	240	97.08	-0.82%
46.3	505	46.14	0.35%	106.3	220	105.91	0.36%
56.3	415	56.15	0.27%	116.3	200	116.5	-0.17%
66.3	352	66.2	0.16%	126.3	186	125.27	0.81%
76.3	305	76.4	-0.13%	136.3	171	136.26	0.03%
86.3	271	85.98	0.37%	146.3	160	145.63	0.46%

Tableau 4 : Incertitude de mesure de distance par caméra infrarouge dans l'intervalle [27,150] cm.

Les résultats obtenus montrent une erreur inférieure à 0.37% pour les distances entre [27,90] cm et inférieure à 1% dans l'intervalle] 90,150] cm.

Les résultats obtenus en utilisant le couple (S3, S4) sont résumés dans le tableau 5.

Distance calculée (cm)	ΔNP	Distance mesurée (cm)	Erreur %
16.3	203	Reference	
18.3	180	18.38	-0.45%
20.3	162	20.42	-0.62%
22.3	148	22.36	-0.26%
24.3	136	24.33	-0.12%
26.3	126	26.26	0.15%

Tableau 5 : Incertitude de mesure de distance par caméra infrarouge dans l'intervalle [5-27] cm.

Ces résultats expérimentaux montrent une erreur inférieure à 0.62% dans l'intervalle [5,27[cm.

L'erreur de conversion en analogique de la résistance numérique utilisée est de $\pm \frac{1}{4}$ LSB .

La tension d'alimentation étant de 5 V, ceci implique une erreur de 0.27 cm.

Cette erreur ajoutée à celle dans les tableaux 3 et 4, nous donne une erreur maximale de 1.07% sur tout l'intervalle d'étude.

2.5. Étude de la variation de l'indice de l'air par l'interféromètre de Michelson

L'objectif de cette expérimentation est d'exploiter les interférences résultant de l'interaction entre plusieurs ondes électromagnétiques pour déterminer la variation de l'indice de l'air en fonction de pression.

Dans l'interféromètre de Michelson, l'état d'interférence dépend du déphasage entre les deux faisceaux. Il existe deux façons de modifier ce déphasage :

- Modifier le chemin optique d'un faisceau ;
- Varier les caractéristiques du milieu dans lequel se propagent l'un ou les deux faisceaux.

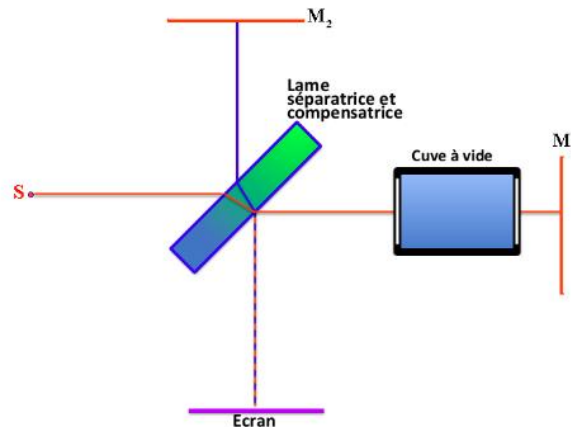


Figure 27 : Schéma de l'interféromètre de Michelson.

La cuve à vide présenté sur la figure 27, permet la mesure de l'indice de l'air par comptage des franges issues d'un interféromètre lors de la remise à pression atmosphérique de l'enceinte.

Pour mesurer l'indice de réfraction de l'air (figure 28) avec la deuxième méthode en ExAO, nous allons utiliser un capteur de pression pour le prélèvement de la variation de pression de l'air dans la chambre à vide et un capteur luxmètre pour compter en même temps le nombre d'anneaux qui défilent.

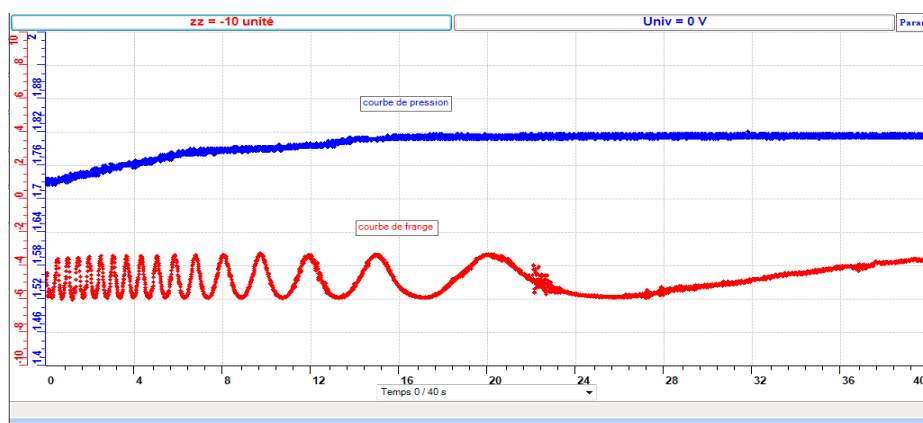


Figure 28 : Variation d'intensité lumineuse lors de la variation de la pression dans la cuve.

Le capteur de pression sera présenté ultérieurement ; dans cette section nous allons présenter uniquement le capteur luxmètre.

Capteur luxmètre

Pour construire un luxmètre, plusieurs capteurs peuvent être utilisés. Les plus populaires, étant les photorésistances, les photodiodes, les capteurs CCD et les cellules photoélectriques [112-114]. Dans notre cas, nous avons construit un luxmètre à base de photorésistance.

Afin de caractériser la photorésistance utilisée, nous avons effectué un étalonnage (Résistance, Flux lumineux) dans une chambre noire, en utilisant un luxmètre étalon et un Ohmmètre. La lumière est projetée perpendiculairement sur la photorésistance et le luxmètre. Pour différents éclairagements, la résistance est mesurée. La courbe d'étalonnage obtenue est présentée sur la figure 29.

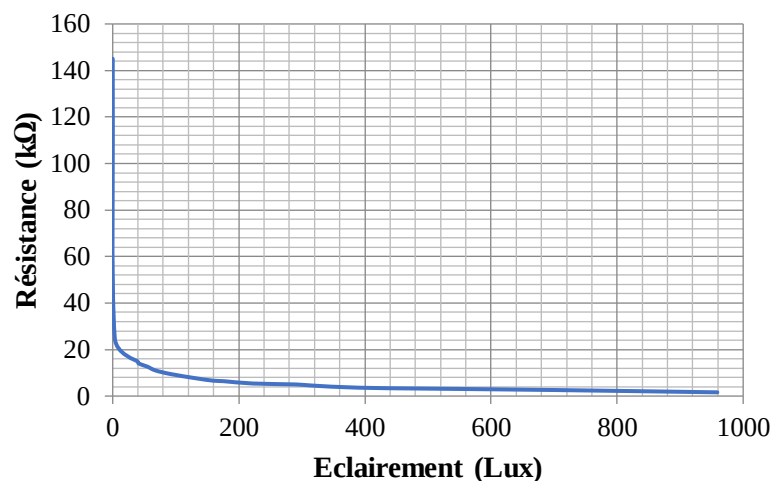


Figure 29 : Courbe d'étalonnage de la photorésistance.

Le circuit de conditionnement est basé sur un pont diviseur de tension comme le montre la figure 30. La gamme de mesure est [0,1050] Lux.

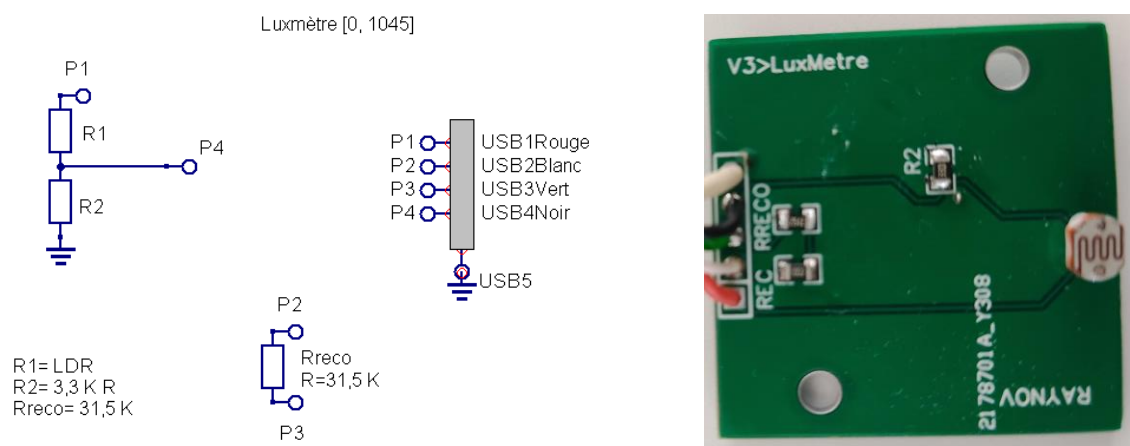


Figure 30 : Schéma et image du luxmètre.

▪ Performance du capteur

La sensibilité de ce capteur est de 3 mV/Lux.

La résolution du capteur calculé en se basant sur la fonction $L = f(U)$ et la résolution du CAN est égal à 17 Lux.

La courbe d'étalonnage est un polynôme du second degré ; le capteur présente une incertitude de calcul de $\pm 5.4\%$ sur tout l'intervalle de mesure, comme le montre le tableau suivant :

Éclairement mesuré par luxmètre étalon	Éclairement mesuré par luxmètre fabriqué	Erreur	Éclairement mesuré par luxmètre étalon	Éclairement mesuré par luxmètre fabriqué	Erreur
3.5	3.36	-4.07%	176	180.82	2.74%
28.5	27.05	-5.10%	230	239.41	4.09%
33.8	32.40	-4.15%	285	269.61	-5.40%
44	42.23	-4.03%	317	314.71	-0.72%
62	60.40	-2.58%	440	424.28	-3.57%
90	86.13	-4.30%	500	489.40	-2.12 %
133	132.38	-0.46%	650	614.83	-5.41%
165	171.37	3.86%	959	942.87	-1.68%

Tableau 6 : Erreur de mesure du capteur luxmètre.

2.6. Autres TP réalisés en physique

Le tableau ci-dessous résume les travaux pratiques qui ont été réalisés avec les capteurs développés.

	Manipulation	Capteur	Nombre	gamme	Unité
Physique	Lois des Gaz parfaits : - Loi de Boyle-Marriotte - Loi de Charles	Thermomètre	1	[0, 80]	°C
		Pression	1	[20,250]	Kpa
		Capteur virtuel de volume	1	-	mm ³
	Loi d'Ohm	Capteur de tension	1	[0,15]	V
		Capteur de courant	1	[0, 100]	mA
	Loi de Faraday	Capteur de tension	1	[-15,+15]	V
	Charge et décharge d'un condensateur	Capteur de tension	1	[-15,+15]	V
	Caractérisation d'une diode	Capteur de tension	1	[-15,+15]	V
		Capteur de courant	1	[0, 100]	mA
	Étude multi vibratoire d'un astable (NE555)	Capteur de tension	1	[-15,+15]	V
	Étude du pendule simple	Résistance variable connectée à la Capsule universelle	1		°
	Étude du pendule couplé	Potentiomètre sans fin	2		
	Étude du disque pesant	Capteur infra-rouge	1		
		Tesla mètre	1		

Tableau 7 : travaux pratiques réalisés en physique avec les capteurs développés.

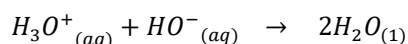
3. Les travaux pratiques en chimie et les capteurs associés

3.1. Titrage pH-métrique

L'objectif de ce TP est de déterminer la concentration d'une solution par titrage pH-métrique en utilisant une réaction chimique durant laquelle l'évolution du pH de la solution est étudiée en fonction du volume.

En effet le titrage pH-métrique est utilisé pour les titrages acido-basiques faisant intervenir un échange de proton. Lors de ce titrage, le suivi du pH de la solution titrée en fonction du volume de solution titrante versée donne une courbe de titrage. Le passage de l'équivalence est repéré par un saut de pH.

L'équation de la réaction de titrage s'écrit :



Les ions $Cl^-_{(aq)}$ et $Na^+_{(aq)}$ sont spectateurs. La quantité d'ions hydroxyde introduits en versant le volume V_b de solution d'hydroxyde de sodium s'écrit :

$$n(HO^-) = C_b V_b \quad (18)$$

A l'équivalence le volume versé est noté, V_{bE} d'hydroxyde de sodium. H_3O^+ est le réactif limitant donc :

$$n(H_3O^+) - C_b V_{bE} = 0 \quad (19)$$

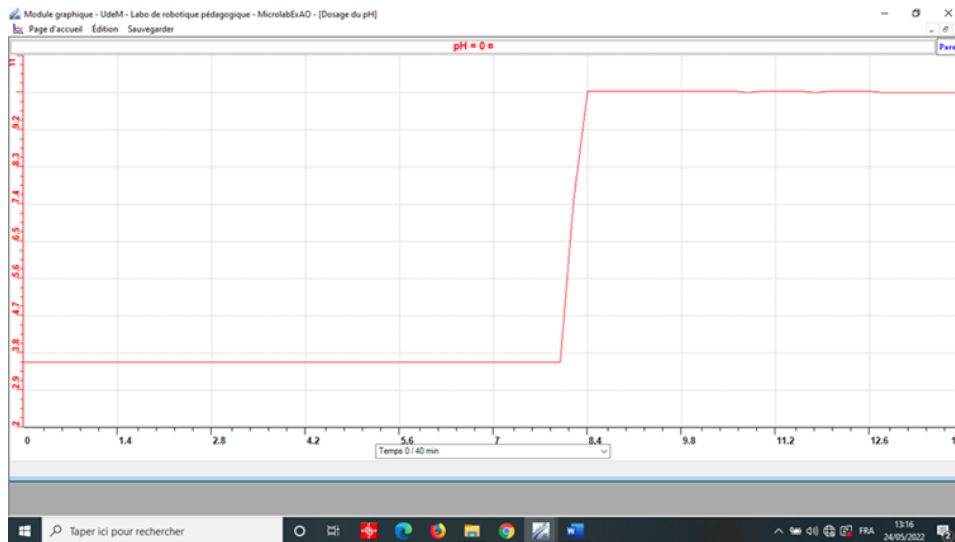
La quantité d'ions oxonium dosés est donc :

$$n(H_3O^+) = C_b V_{bE} \quad (20)$$

La méthode classique pour réaliser ce TP, consiste à utiliser un appareil pH-mètre pour suivre l'évolution du pH. Le volume quant à lui est souscrit manuellement par les étudiants. Un tableau (pH, volume) est rempli à fur et à mesure du déroulement de TP.

À la fin du TP, l'étudiant trace la courbe (pH, volume) sur papier millimétré. Toute erreur au moment de l'enregistrement du volume impacte le résultat final.

Pour réaliser ce TP en ExAO (figure 31), nous utilisons deux capteurs : le 1^{er}, un pH-mètre pour déterminer le pH de la solution et le 2^{ème}, un capteur de pression pour déterminer le volume versé.



Capteur pH-mètre

Sorensen a proposé le principe du pH en 1909 [112], qui est défini comme le cologarithme du H^+ .

$\text{pH} = -\text{Log}^{a(\text{H}^+)}$, avec $a(\text{H}^+)$ étant l'activité de l'ion hydrogène dans une solution.

Pour mesurer le pH d'une solution, la méthode la plus courante fait appel aux techniques potentiométriques. Elle a l'avantage d'être précise et d'offrir la possibilité de mesure en continue. Il existe plusieurs types d'électrodes de mesure ; celle que nous utilisons est une électrode combinée.

Le circuit du conditionnement du signal est donné sur la figure 32. La tension en sortie de la sonde pH varie entre $[-200, 200]$ mV, le circuit est donc basé sur le principe d'amplificateur à décalage. L'amplificateur utilisé en entrée est le TL074 [113]. Son impédance d'entrée atteint $1\text{ T}\Omega$, correspond à l'impédance de sortie de l'électrode combinée de pH, qui est supérieure à $100\text{ M}\Omega$.

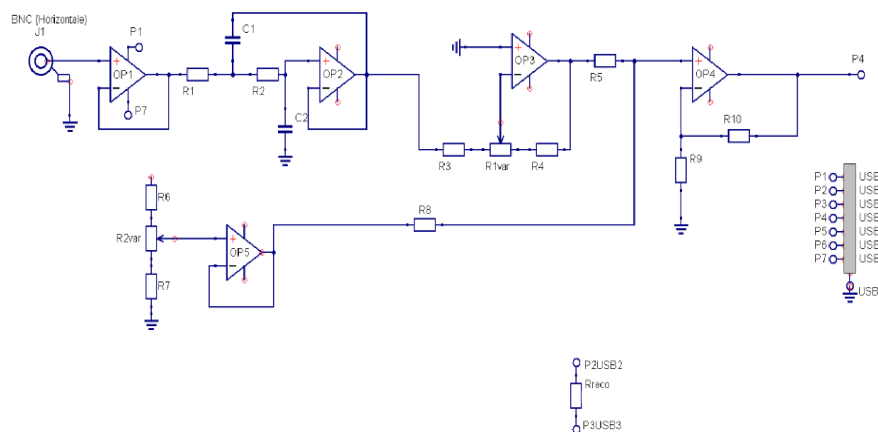


Figure 32 : Schéma et image du capteur de pH.

Le circuit possède deux résistances variables. La première permet de calibrer le pH à 7 (voltage en sortie égal à 1.75 V), la deuxième permet d'ajuster le gain du circuit, lors de l'étalonnage avec les solutions tampon pH = 4 et pH = 10.

- **Performances du capteur**

En se basant toujours sur **la résolution** du CAN et la fonction de transfert du circuit, la résolution du capteur est de 0.014 pH.

La sensibilité du capteur est quant à elle de 0.25 V/pH.

L'incertitude de mesure est égale à $\pm 0.13\%$.

Capteur de volume

Un capteur de volume peut être réalisé par différentes méthodes et en exploitant différents phénomènes physiques. Dans notre cas, nous exploitons la loi de la pression hydrostatique pour déterminer le volume versé indirectement à partir de la formule suivante :

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (21)$$

Avec P la pression hydrostatique, g l'accélération de la pesanteur et h la hauteur du fluide.

La section de la burette étant fixe, le volume est déterminé par la formule suivante :

$$V = P \cdot (S / \rho \cdot g) \quad (22)$$

Le capteur de pression utilisé pour ce TP est le : MPXV5004 [114], dont la gamme est donnée pour [0, 3.92] kPa.

Ce capteur est de type piézo-résistif, et son circuit de conditionnement est présenté sur la figure 33.

- **Performances du capteur**

La sensibilité du capteur de pression utilisé est égale à 1 V/kPa et son incertitude est égale à $\pm 1.5\%$.

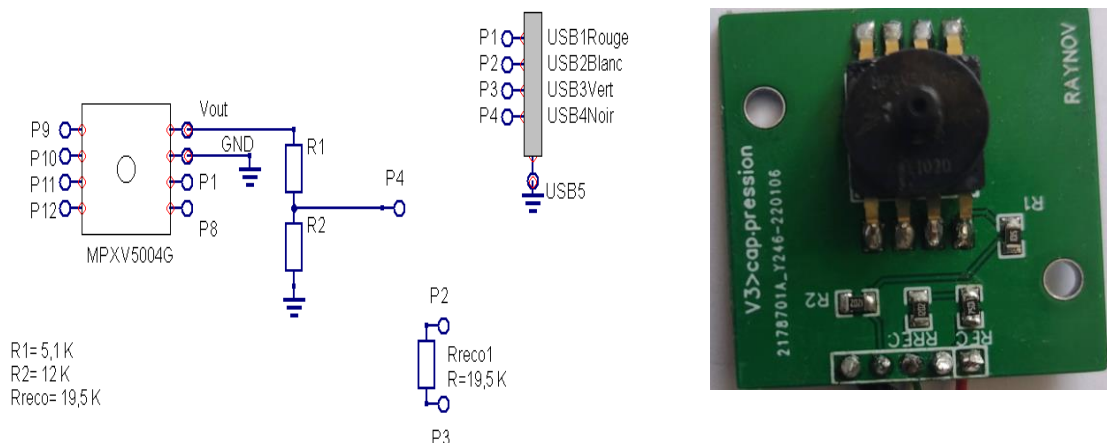


Figure 33 : Schéma et image du capteur de pression [0,4] kPa.

L'utilisation de l'ExAO pour la réalisation de ce TP, permet de réduire considérablement le temps de son exécution. La précision des résultats obtenus est aussi améliorée, vu que

l'acquisition du volume versé est faite via un capteur, et que le suivi en temps réel est aussi possible.

3.2. Titrage Conductimétrique

L'objectif du TP est de déterminer la concentration d'une solution par titrage conductimétrique en utilisant une réaction chimique durant laquelle on étudie l'évolution de la conductance de la solution.

La conductimétrie est la mesure de la conductance G d'une portion de solution délimitée par une cellule de conductimétrie constituée de deux électrodes parallèles de surface S et séparées d'une distance d [115]. La conductance vaut :

$$G = \sigma \frac{S}{d} \quad (23)$$

Avec σ la conductivité de la solution.

A volume constant la conductivité d'une solution électrolytique dépend du nombre d'ions effectivement présents. D'une façon générale, pour une solution électrolytique contenant p types d'ions notés X_i , de concentrations $[X_i]$ et de conductivités molaires ioniques λ_i (i varie de 1 à p), la conductivité σ de la solution est donnée par la relation :

$$\sigma = \sum_{i=1}^p \lambda_i X_i [X_i] \quad (24)$$

Comme pour le TP du pH-mètre, l'étudiant utilise le conductimètre pour suivre l'évolution de la conductivité. Le volume quant à lui est souscrit manuellement.

Pour réaliser ce TP en ExAO, nous avons développé un capteur conductimètre. L'acquisition du volume est faite avec un capteur de pression comme présenté précédemment.

Capteur conductimètre

Pour réaliser ce TP, nous avons construit des électrodes avec la mine des crayons de menuisier qui sont en graphite. La mesure de conductivité se fait en courant alternatif pour éviter l'oxydation des électrodes liée à l'électrolyse de l'eau. Pour cela, le premier étage du circuit de conditionnement est constitué d'un pont de Wien. Le parallélisme entre électrodes est assuré par une pièce imprimée en 3D. La constante de la cellule réalisée est définie par :

$$k = \frac{S}{d} \quad (25)$$

Le circuit de conditionnement est présenté sur la figure 34.

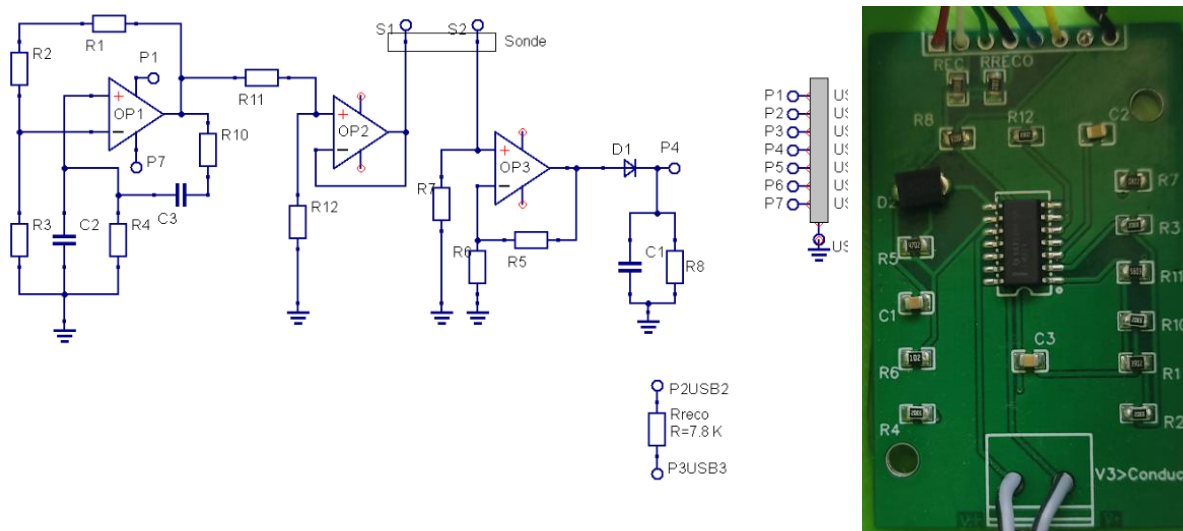


Figure 34 : Schéma et image du conductimètre.

3.3. Autres TP réalisés en chimie

Le tableau ci-dessous résume les travaux pratiques qui ont été réalisés avec les capteurs développés en chimie.

Discipline	Manipulation	Capteur	Nombre	gamme	Unité
Chimie	Concentration d'une solution	Luxmètre	1	[0, 1000]	Lux
	Cinétique d'une réaction chimique	Pression	1	[20-250]	kPa
	Transfert de chaleur	Thermomètre	2	[0-100]	°C

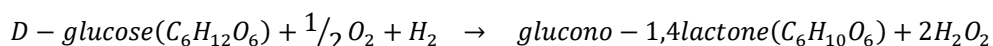
Tableau 8 : travaux pratiques réalisés en chimie avec les capteurs développés.

4. Les travaux pratiques en biochimie et les capteurs associés

4.1. Évaluation de la cinétique et de la spécificité de l'enzyme Glucose Oxydase

L'objectif de ce TP est de mettre en évidence, la spécificité du glucose Oxydase à son substrat le Glucose.

L'équation de la réaction s'écrit :



Afin de suivre cette réaction, le principe consiste à suivre la disparition de l'oxygène (O₂) consommé lors de l'oxydation enzymatique du D-glucose. Le suivi de cette disparition est évalué en fonction du temps et en présence d'autres glucides.

Classiquement, ce TP est réalisé en suivant le taux d'oxygène à l'aide d'indicateurs visuels (disparition de l'oxygène). L'étude en fonction du temps n'est pas possible avec cette méthode voire très lourde à faire.

Pour réaliser ce TP en ExAO (figure 35), nous utilisons un capteur d'oxygène dissout.

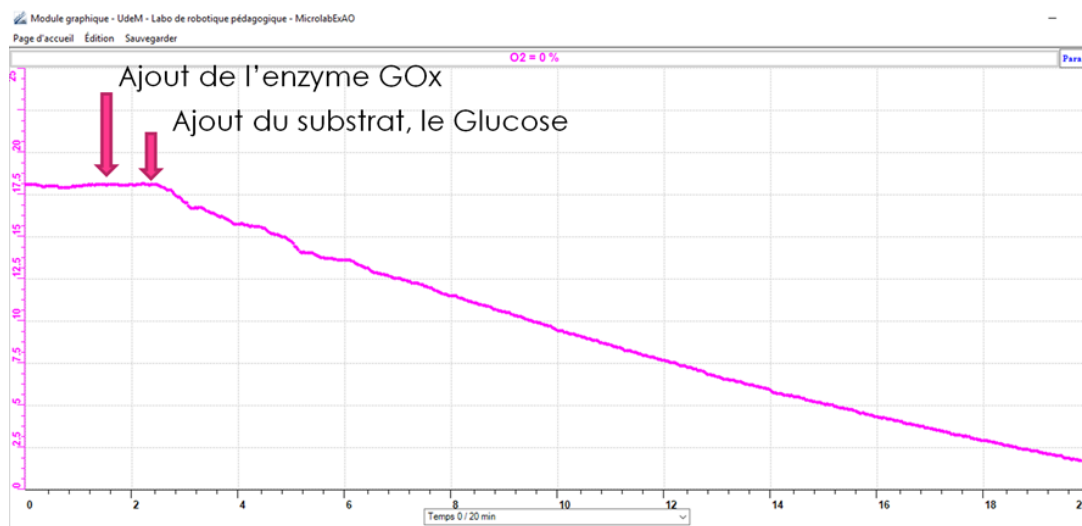


Figure 35 : La cinétique de la réaction Glucose oxydase et son substrat : le glucose.

Capteur d'Oxygène dissout

L'électrode à oxygène est une électrode de Clarke, formée d'une cathode de platine (au centre) et d'une anode d'argent (anneau) entre lesquelles on maintient une différence de potentiel (figure 36). Sous l'influence de cette tension (potentiel redox), l'oxygène dissous dans la solution de KCl est ionisé. Il en résulte un courant très faible, proportionnel à la concentration du dioxygène dans lequel baigne l'électrode. C'est ce courant qui est amplifié et mesuré. Une membrane de téflon (hydrophobe), perméable à l'oxygène mais imperméable à l'eau et aux ions dissous, isole la solution de KCl du milieu d'expérience. La mesure se fait dans l'électrolyte et dépend de la vitesse de renouvellement de l'oxygène sous la membrane. La mesure dépend donc de la teneur en oxygène du milieu où se trouve l'extrémité de l'électrode, mais aussi de la vitesse de diffusion de ce gaz au travers de la membrane. C'est pour cela que l'agitation du milieu modifie la valeur mesurée. La plus grande précision de mesure est obtenue dans une solution aqueuse régulièrement agitée [119,120] .

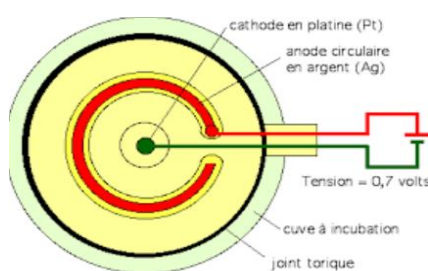


Figure 36 : Schéma de principe de l'électrode Clark.

La sonde que nous utilisons, la DO-957/958, produit un courant variable entre [0,100] mA et sa gamme de mesure est 0-20 mg/L. Ce courant est amplifié et converti en une tension entre [0,3.5] V proportionnelle à la concentration en dioxygène par un montage Trans-impédance comme le montre la figure 37.

Le circuit de conditionnement contient une résistance variable permettant de calibrer le capteur.

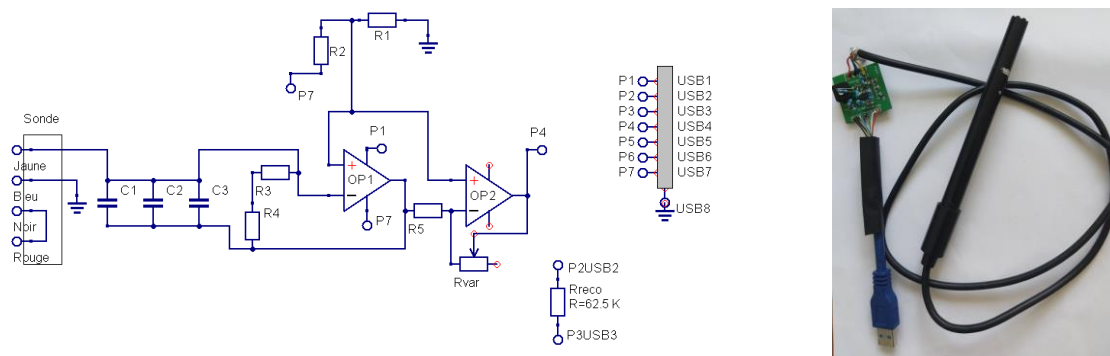


Figure 37 : Schéma et image du capteur d'Oxygène dissout.

• Performances du capteur

Afin de déterminer le temps de réponse du capteur, la sonde est calibrée premièrement dans une eau saturée en oxygène (taux égale à 21%) et ensuite placée dans une solution appauvrie en oxygène.

Le temps de réponse du capteur, déterminé expérimentalement est de 50 s.

La sensibilité du capteur est 0.28 V/%, et sa résolution est de 0.024%.

5. Les travaux pratiques en biologie et les capteurs associés

5.1. Étude de l'activité de l'intestin, utérus et muscle strié

L'objectif du TP est l'étude de phénomènes biologiques in situ dans leur état naturel d'activité et/ou en réponse à des sollicitations mécaniques, électriques ou chimiques, telles que :

- Rythme cardiaque chez la souris ou la grenouille,
- Réponse des muscles striés de la grenouille,
- Contractions intestinales ou utérines de la rate,

Lors du TP, le muscle à étudier est isolé dans le respect total des règles de la bioéthique et maintenu dans des conditions optimales pour maintenir les tissus en vie pour quelques heures, le temps nécessaire pour faire l'expérience et récupérer les résultats. Le muscle ainsi isolé est installé en suspension dans un dispositif qui permet l'enregistrement de la mécanique contractile. En effet, le muscle est attaché du côté inférieur à l'aide de fil de couture à un support métallique qui permet de limiter les mouvements latéraux qui peuvent parasiter l'enregistrement du mouvement de contraction. Le muscle est attaché par son côté supérieur à l'aide d'un second fil de couture à un balancier qui porte un stylet que les étudiants remplissent d'encre et mettent en contact avec le papier d'enregistrement placé autour du tambour d'un cylindre enregistreur qui tourne à une vitesse prédéfinie. Après stimulation électrique du muscle à l'aide d'un stimulateur électrique (Grass SD9 B Square Pulse Stimulator), le muscle se contracte et tire sur le fil supérieur qui tire le balancier vers le bas et donc le stylet va se déplacer vers le haut et sa trajectoire va être tracée sur le papier en rotation. Au relâchement du muscle, le stylet revient à sa position initiale et le tracé revient au niveau de départ. La secousse musculaire est ainsi récupérée sur le papier cylindre (figure 38).



Figure 38 : Image du système d'acquisition utilisé en biologie.

Ce système présente plusieurs inconvénients à savoir, problèmes de réglage initial de système afin de réduire les frottements du stylet avec le cylindre, le système ne possède pas de moyen pour amplifier le signal résultant des mouvements de l'organe...

Pour réaliser ce TP en ExAO, nous avons réalisé un capteur de petits mouvements en se basant essentiellement sur l'impression 3D. La réalisation de ce TP en ExAO a pour objectifs de réduire les frottements mais aussi de pouvoir amplifier le signal recueilli.

Les résultats obtenus en utilisant le système traditionnel et le capteur petit mouvement sont représentés sur les figures 39 et 40.

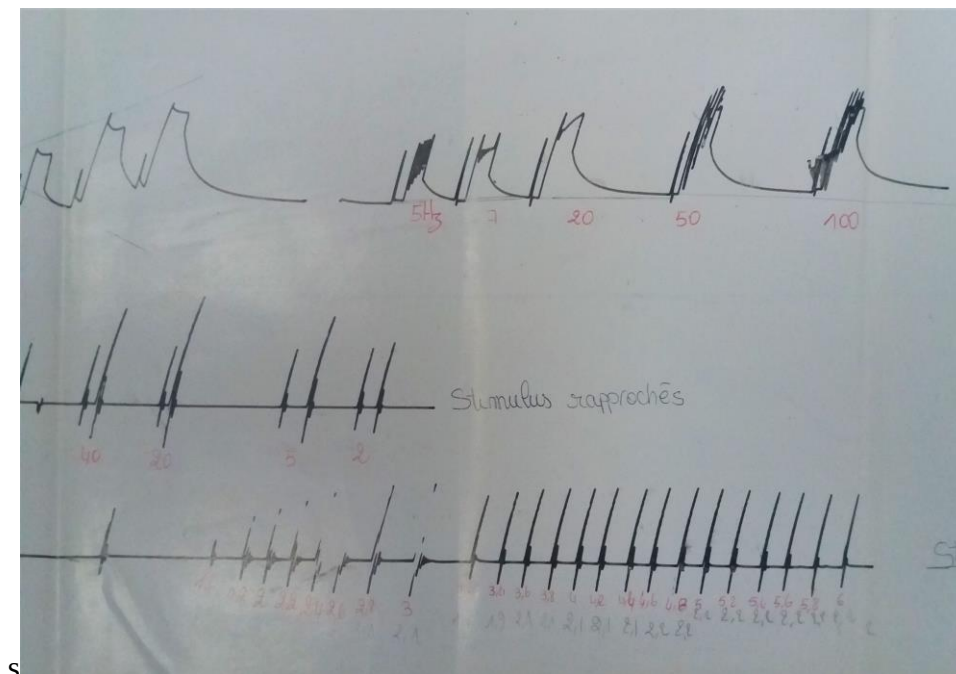


Figure 39 : Tracé du myographe.

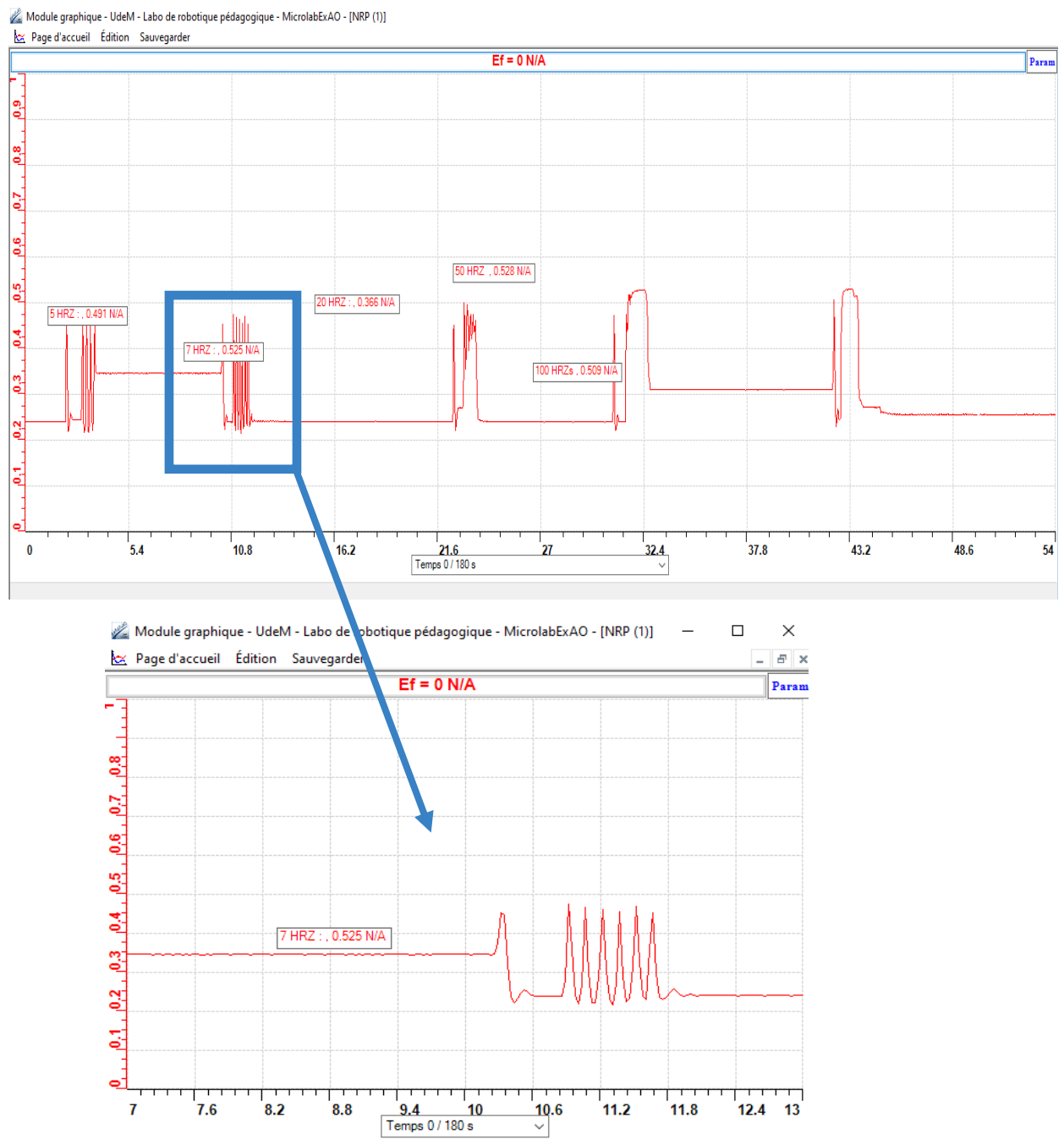


Figure 40 : Graphique obtenu avec capteur de petits mouvements, mettant en évidence la possibilité d'agrandir les graphiques obtenus.

Capteur de petits mouvements

Le capteur imprimé en 3D se compose de deux parties, la 1^{ère} est la partie mécanique et la 2^{ème} est la partie électronique. La partie mécanique du capteur se compose principalement d'un bras de levier encapsulé dans une boîte pour isoler le senseur de la lumière externe, et aussi pour qu'il soit assez robuste à l'utilisation par les étudiants. La partie électronique quand elle est basée sur une diode lumineuse (LED) et une photorésistance.

- **Étude mécanique du capteur**

Les mouvements de muscles, utérus, intestin étant très faibles, l'idée est d'amplifier leurs mouvements en utilisant un levier mécanique.

Dans l'état initial, le levier est en équilibre mécanique placé sur un support fixe. Le levier est équipé d'une couche réfléchissante au niveau de son extrémité la plus éloignée et d'une masse réglable à l'extrémité proche de l'axe.

Le rapport de force du levier est donné par :

$$F_1 = \frac{L_1}{L_2} F_2 \quad (26)$$

Ou aussi en fonction de déplacement des extrémités :

$$dx_1 = \frac{L_1}{L_2} dx_2 \quad (27)$$

Avec :

L_1 la partie la plus courte, L_2 la partie la plus longue, dx_1 étant le déplacement proportionnel à la force F_1 appliquée par le muscle attaché à l'extrémité A du levier et dx_2 la distance séparant la surface réfléchissante au dispositif de mesure.

Lorsqu'une substance est injectée, le muscle se relâche ou se contracte et fait varier la force appliquée sur le levier (figure 41).

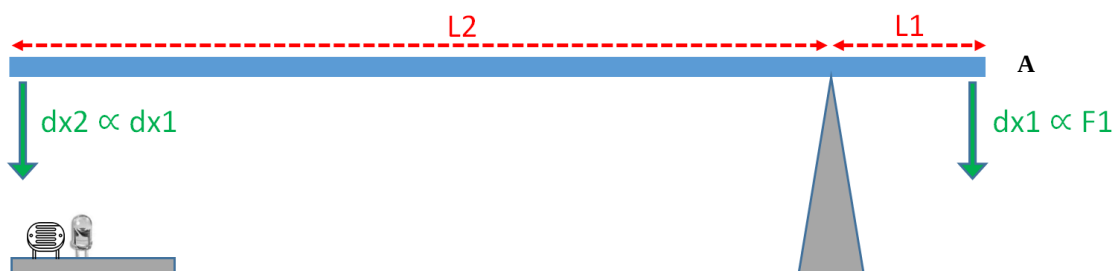


Figure 41 : Schéma du levier mécanique.

Pour rendre le gain mécanique variable, trois valeurs de L_1 sont possibles (50 mm-100 mm-150 mm) alors que pour L_2 une seule valeur (800 mm) soit des facteurs multiplicatifs de 16, 8 et 5.33.

D'après les données relevées des tracés qui ont été réalisés par le système utilisé, le déplacement maximal d'un muscle est de 5 mm. Pour un gain mécanique de $(L_2 / L_1) = 5.33$, le mouvement amplifié maximal obtenu est de 27 mm. Le levier à l'équilibre est placé au milieu pour pouvoir détecter également les mouvements de relâchement. Ainsi la boîte d'encapsulation fait 54 mm d'hauteur (figure 43).

- **Étude électronique du capteur**

La partie électronique du système se compose essentiellement d'une photorésistance et d'une LED placées dans deux compartiments séparés par une paroi (figure 42).

La photorésistance est directement placée sous la surface réfléchissante ce qui permet la mesure de la quantité de lumière réfléchiée. Cette quantité de lumière est proportionnelle à la distance de déplacement dx_2 c'est à dire à la distance dx_1 amplifiée.

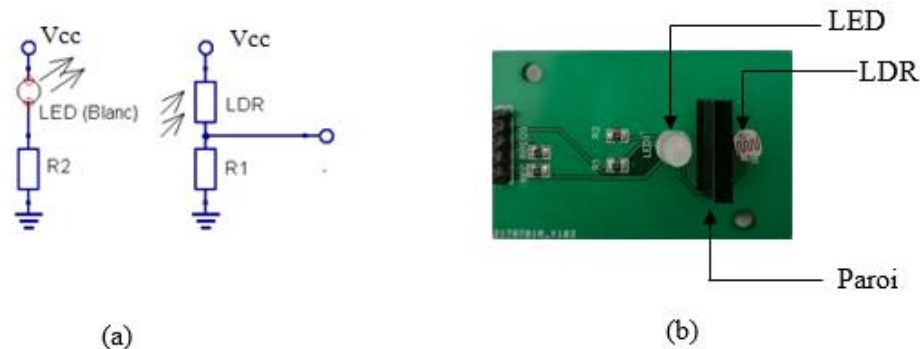


Figure 42 : (a) Schéma et (b) image du circuit électronique du capteur de petit mouvement.

- **Impression 3D du design**

La modélisation 3D du capteur est réalisée avec le logiciel Catia. La figure 37 présente le dessin 3D du capteur, composé d'un compartiment pour le circuit électronique et un autre pour le levier mécanique.

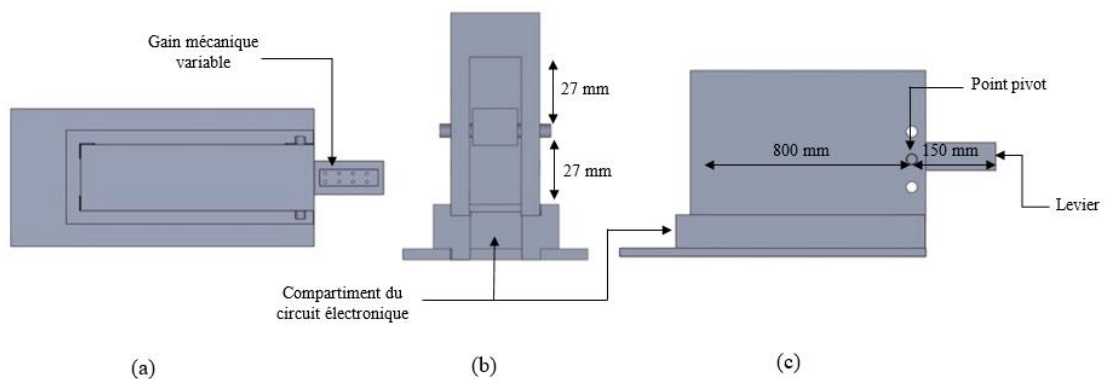


Figure 43 : Dessin 3D du capteur de petit mouvement. (a) vue de dessus. (b) vue arrière. (c) vue de droite.

Le capteur imprimé est présenté sur la figure 44.

L'utilisation de l'ExAO en combinaison avec l'impression 3D, a permis de réduire considérablement le coût total de l'expérimentation. L'enregistrement obtenu n'est pas un tracé définitif mais il s'agit d'un graphique maniable que l'étudiant peut amplifier ou réduire pour faire les mesures nécessaires (figure 40 et 44), les commentaires (type de stimulation, doses ...) peuvent être rajouté en temps réel sans perturbation de l'expérimentation.



Figure 44 : Image du capteur de petit mouvement réalisé.

5.2. Étude des mouvements respiratoires et du contrôle nerveux de la respiration chez le rat

Les objectifs de ce TP sont d'étudier les mouvements respiratoires et le contrôle nerveux de la respiration :

- respiration normale (mise en évidence de la fréquence respiratoire et de la phase inspiratoire et expiratoire).
- stimulation du nerf vague sur la rythmicité et l'amplitude de la respiration.
- stimulation du nerf vague du côté central, c'est-à-dire en direction du cerveau après section du nerf, sur les mouvements respiratoires.
- stimulation du nerf vague du côté périphérique sur les mouvements respiratoires.
- respiration après vagotomie bilatérale.
- l'apnée réflexe.

Construction du TP en ExAO.

Afin de mettre en œuvre cette expérience, nous utilisons un seul capteur : le capteur de pression. Ce capteur a déjà été présenté plus haut.

5.3. La respiration chez l'être humain

La respiration est une des plus grandes fonctionnalités de l'organisme : elle subit un changement permanent et dans un temps très court, selon l'état physiologique ou/et émotionnel de l'être humain [121,122].

L'objectif du TP est la mise en évidence de l'influence de certains paramètres comme l'effort physique ou l'absorption de substances modulatrices, sur la respiration chez l'être humain (amplitude, fréquence...).

Traditionnellement, ce TP est réalisé en deux à quatre étapes. Chaque paramètre physiologique est étudié séparément par manque de solution technique adéquate.

Construction du TP en ExAO.

Afin de mettre en œuvre cette expérience, nous avons fait appel à plusieurs capteurs, à savoir le capteur de température, de pression, d'oxygène et le capteur de pulsation cardiaque. Les trois premiers capteurs sont placés sur une chambre à venturi imprimée en 3D (voir figure 45) dans laquelle, le sujet souffle avant et après avoir fait un effort physique.

Les capteurs de température, pression et oxygène étant déjà étudiés dans les sections précédentes, nous allons présenter uniquement le capteur de pulsation cardiaque SEN-KY053 [120].

Ce capteur réagit à la variation de l'opacité du flux sanguin mesuré à travers l'extrémité du doigt engendrée par la variation de volume sanguin. En effet, suite à une activité cardiaque générée après un effort physique ou absorption d'une substance modulatrice, le volume sanguin à travers l'extrémité du doigt augmente ou diminue.

Le capteur est donc constitué d'une source lumineuse et une photodiode permettant de capter les changements d'intensité lumineuse à travers le doigt. En effet quand le volume sanguin augmente, l'intensité lumineuse reçue diminue. Ce capteur fournit une tension variable en sortie, il est directement connecté à une capsule universelle.



Figure 45 : Images de la chambre de Venturi montrant les orifices dans lesquelles les capteurs seront connectés.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques TPs, que nous avons mis au point avec la technologie ExAO. Nous avons présenté tout au long de ce chapitre les avantages qu'offre cette technologie en comparaison avec les méthodes classiques. Parmi ces avantages nous citons, une meilleure précision de calcul, meilleure visibilité de l'interaction entre variables, un gain de temps et standardisation de l'espace de travail non négligeable. Ceci contribue à une meilleure compréhension des objectifs de TP.

Le recours à l'impression 3D pour réaliser des capteurs pour utilisation en ExAO, constitue une nouvelle façon d'utilisation de cette technologie dans l'enseignement, et permet de profiter de tous les avantages précédemment cités avec un coût réduit.

Le capteur de pression étant un capteur très utilisé dans toutes les disciplines, nous lui avons accordé une attention particulière. Dans les chapitres qui suivent, nous allons présenter l'état de l'art des capteurs de pression, puis nous allons présenter les capteurs de pression que nous avons développé en impression 3D.

Chapitre 4 :

Etat de l'art des capteurs de pression

Chapitre 4 : Etat de l'art des capteurs de pression

1. Introduction

Dans ce chapitre nous dressons une synthèse bibliographique des capteurs de pression réalisés à l'aide de la technologie d'impression 3D. Cette synthèse permettra de nous positionner par rapport aux techniques de production disponibles et de faire un choix adapté aux applications d'ExAO. Ce chapitre est organisé en deux grandes parties :

Dans la première partie, nous présentons dans un premier temps les méthodes de fabrication de capteurs de pression avec impression 3D, puis, dans un second temps, les capteurs de pression rapportés dans la littérature. Cette étude nous mènera à sélectionner les capteurs de pression basés sur le principe capacitif.

Dans la deuxième partie, nous étudions en détail ce type de capteur et les structures qui ont été proposées dans la littérature en vue d'améliorer ses performances en termes de sensibilité et de linéarité.

2. Réalisation des capteurs par technologie 3D

2.1. Méthodes de fabrication en impression 3D

La conception de composants électronique nécessite généralement des zones conductrices et des zones non conductrices. Actuellement, trois méthodes permettent de combiner des matériaux conducteurs, et non-conducteurs afin de produire des capteurs :

- **Méthode hybride** : des composants imprimés en 3D sont combinés avec des composants réguliers, comme des fils, circuit imprimés (PCB) ou des capteurs entiers. Cette méthode permet une combinaison simple de pièces, et est globalement comparable à un assemblage classique. L'inconvénient est que le potentiel de l'impression 3D ne se manifeste que de manière très limitée.
- **Infusion de matériaux conducteurs** : la structure de capteur est réalisée premièrement, avec impression 3D en utilisant des matériaux non-conducteurs. La conduction est assurée ultérieurement par un matériau conducteur en faisant appel, par exemple, à la métallisation par pulvérisation.
- **Impression multi-matériaux** : Le capteur est imprimé avec des matériaux conducteurs, et non-conducteurs. Cette technique est généralement réalisée par la modélisation par dépôt fondu. Cette méthode est prometteuse, mais reste limitée vu les propriétés anisotropiques des matériaux disponibles et leurs résistivités relativement élevées.

2.2. Principe de détection et impression 3D

Pour la fabrication de nos capteurs, divers principes de détection peuvent être envisagés en fonction des propriétés des matériaux et des caractéristiques technologiques des machines utilisées.

2.2.1. Piézo-résistivité et jauges de contraintes

Pour construire des capteurs basés sur le principe piézorésistif, on utilise la technologie d'impression 3D appelée méthode d'écriture directe à l'encre (DIW) qui est similaire au procédé

de modélisation par dépôt fondu (FDM). On modifie les filaments disponibles dans le commerce en ajoutant des nanotubes de carbone [125-127], du noir de carbone [128,129], du graphène et des particules d'argent de petite taille [126]. Ainsi des encres piézorésistives sont directement imprimées dans le réservoir élastomère. Une méthode consiste à combiner la technologie 3D avec d'autres technologies comme la sérigraphie pour imprimer les piezoresistances sur les corps d'épreuve réalisés en 3D.

2.2.2. Piézoélectricité

Des matériaux piézoélectriques imprimés en 3D font activement l'objet de recherches. L'élément rendant ce type de matériaux plus complexe à imprimer est qu'il nécessite généralement une certaine méthode de polarisation afin de mettre en évidence les propriétés microscopiques piézoélectriques à l'échelle macro structures. Un matériau qui semble avoir des propriétés intéressantes, tant du point de vue piézoélectrique que de la fabrication additive, est le fluorure de polyvinylidène (PVDF). Dans [127], par exemple le PVDF a été polarisé pendant le processus d'impression lui-même. Compte tenu de cette complexité, aucun capteur de pression basé sur ce principe n'a été rapporté.

2.2.3. Principe capacitif

Ce principe peut être mis en œuvre via des processus d'impression 3D, permettant d'imprimer directement des métaux comme la technologie jet de liant ou par métallisation de structure non conductrice via la technologie à jet d'encre. Une autre alternative consiste à combiner la technologie d'impression 3D, avec d'autres technologies comme la métallisation par pulvérisation cathodique, pour métalliser les surfaces de substrat réalisé par impression 3D.

3. Capteurs de Pression réalisés par impression 3D

3.1. Fabrication de capteur de pression avec la méthode hybride

3.1.1. Capteur à FBG

La fabrication de capteurs de pression avec la technique FDM a été présentée par C. Hong et al. et A. Tuna et al. [132,133]. Ces chercheurs ont intégré un capteur à fibre à réseau de Bragg (FBG) à l'intérieur de la pièce imprimée (figures 46 et 47). À cette fin, un matériau en PLA a été utilisé et l'efficacité du réseau de Bragg intégré dans le matériau imprimé a été évaluée par le biais de différentes densités de remplissage. Cette méthode a permis de dépasser les inconvénients des méthodes classiques utilisés pour la construction des capteurs de pression à réseau de Bragg. Les méthodes classiques utilisent la colle/résine époxy pour fixer le capteur à FBG à l'intérieur de la structure exposée à la pression, et présentent malheureusement plusieurs inconvénients : un temps de fabrication relativement long et une perte de matière première importante. Les performances de la colle/résine époxy ne sont pas toujours aussi stable que souhaitées et peuvent ne pas convenir pour une surveillance de longue durée.

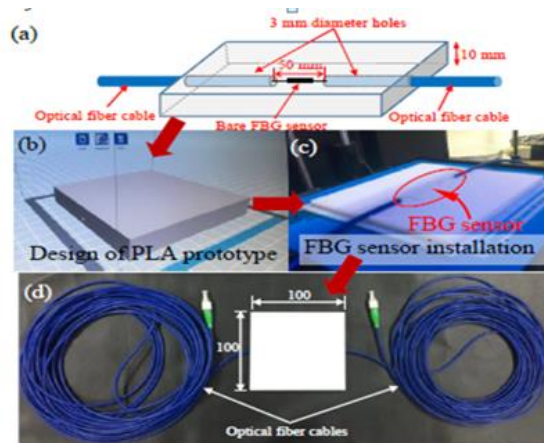


Figure 46 : (a) Une vue schématique du capteur de pression FBG, (b) conception du prototype en PLA, (c) installation du FBG, et (d) le capteur de pression du FBG après fabrication. (Unité : mm).

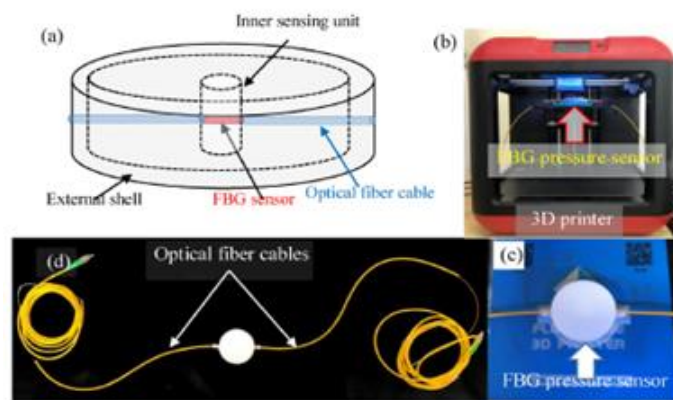


Figure 47 : (a) Une vue schématique du capteur de pression FBG, (b) Capteur de pression FBG pendant l'impression à l'intérieur de l'imprimante 3D, (c) Capteur de pression FBG à l'intérieur de l'imprimante 3D, et (d) capteur de pression FBG après impression.

3.1.2. Capteur capacitif

F. Lucklum et G. Dumstorff [130] ont réalisé un capteur capacitif de pression en utilisant un filament en polymère (Veroclear RGD810). Le design du capteur se compose de deux membranes (une sensible à la pression et l'autre fixe) reliées entre elles par des détrompeurs (figures 48 et 49). Ces membranes ont une surface ondulée ce qui a permis, d'après les auteurs, d'augmenter la surface des armatures de 19.46% en comparaison à des membranes plates sans augmenter ses dimensions, et ainsi augmenter sa sensibilité, compte tenu de la dépendance capacité- surface.

Les membranes réalisées avec une imprimante basée sur le principe FDM, ont été métallisées à l'aide des matériaux conducteurs : pour la membrane sensible à la pression avec du Cr d'une épaisseur de 10 nm et pour la membrane fixe avec de l'Au d'une épaisseur de 115 nm, par pulvérisation cathodique. Le capteur ainsi imprimé possède les dimensions $11 \times 11 \times 4.6 \text{ mm}^3$.

Les performances de ce capteur ont été testées sous différents niveaux de pression entre 0 Pa et 8.88 kPa. Les résultats expérimentaux montrent que la plage de capacité du capteur est de 2.7 pF à 4.3 pF. La sensibilité maximale étant de 0.14 pF/kPa.

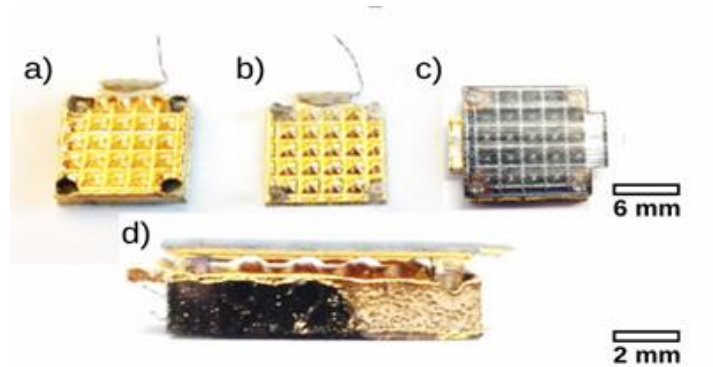


Figure 48 : Capteur capacitif imprimé 3D mis en œuvre a) plaque inférieure fabriquée, b) plaque supérieure fabriquée, c) assemblage des plaques inférieure et supérieure fabriquées, d) vue de profil du capteur assemblé.

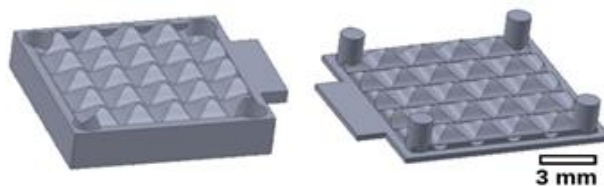


Figure 49 : Image CAO des plaques supérieure et inférieure proposées du capteur de pression.

3.1.3. Capteur piézo-résistif

M. Liu et al. [131] ont fait appel aux technologies d'impression 3D et de sérigraphie pour fabriquer un capteur de pression relative robuste et entièrement imprimé.

En utilisant cette approche technologique, ils ont réalisé un capteur de pression à l'aide de simples jauges de contrainte résistives sérigraphiées sur une chambre de pression cylindrique circulaire en plastique avec des connecteurs fluidiques intégrés.

La conception de la chambre de pression est basée sur une simple cavité cylindrique circulaire combinée à des embouts permettant une connexion directe avec un tube flexible pour une utilisation dans une installation micro fluide (Figure 50 et 51). Le diamètre extérieur du cylindre est de 18 mm, les embouts de raccordement s'adaptent à des tubes d'un diamètre intérieur d'environ 1 mm. L'épaisseur de la paroi de la membrane varie de 100 μm à 500 μm . En outre, un volume solide a été ajouté au bord de la forme cylindrique pour servir de zone de contact pour les connexions électriques aux résistances imprimées sur la paroi de la membrane. Tous ces éléments ont été fabriqués à l'aide d'une imprimante de micro-stéréo-lithographie à haute résolution, en utilisant comme matériau un polymère acrylique résistant aux hautes températures.

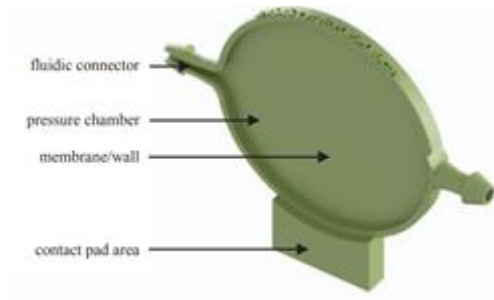


Figure 50 : Vue partielle en demi-section du modèle 3D du substrat du capteur.

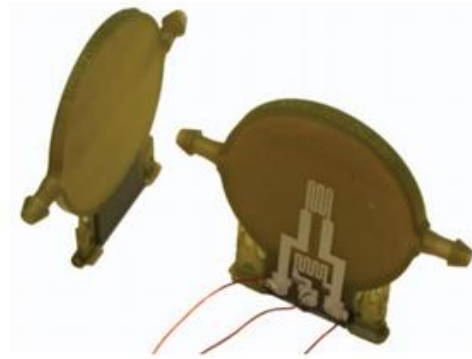


Figure 51 : Photographie de deux chambres de pression imprimées en 3D avec connecteurs fluidiques, jauge de contrainte résistive sérigraphiée et connexions électriques (à droite).

L'impression des jauges de contrainte quant à elle, est réalisée au moyen d'une machine de sérigraphie manuelle. Pour l'impression, les auteurs ont utilisé une colle conductrice élastique à base d'argent. La structure est durcie pendant 20 minutes à 120°C dans un four. L'épaisseur du film après séchage est estimée à moins de 5 μm . Après le séchage, les jauges de contrainte sont ensuite reliées à la zone de contact par des fils de cuivre et un adhésif conducteur.

Le capteur réalisé est finalement caractérisé pour différentes épaisseurs de membrane dans une plage de pression de 0 à 1000 mbar.

Le capteur de pression fabriqué par [132] est réalisé également en faisant appel à la sérigraphie. Le capteur réalisé, se compose principalement d'un substrat de détection et d'un pont de Wheatstone complet sur sa surface (figure 52). Le substrat de détection a été imprimé par une imprimante à base de micro-stéréo-lithographie, en utilisant une résine transparente résistante aux hautes températures, tandis que les résistances et les fils du pont de Wheatstone ont été imprimés par sérigraphie en utilisant respectivement de la pâte de carbone et de la pâte d'argent. Enfin, le micro-capteur de pression imprimé en 3D a été caractérisé. Le substrat du capteur est constitué d'un connecteur de gaz d'un diamètre intérieur égal à 3 mm et d'une chambre de pression. Sa partie supérieure se constitue d'un diaphragme circulaire de 0.5 mm d'épaisseur et de 36 mm de diamètre. Les résultats expérimentaux indiquent que la sensibilité est de 4.55 mV/kPa/5V, dans la plage 0 – 2.4 kPa.

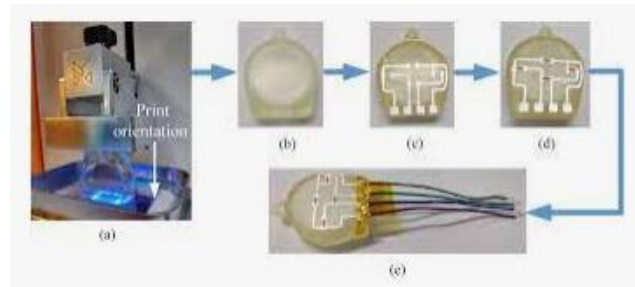


Figure 52 : Photos (a) du substrat du capteur pendant l'impression à base de DLP ; (b) du substrat du capteur après impression et rinçage ; (c) du capteur de pression après sérigraphie des fils d'argent ; (d) du capteur de pression après sérigraphie des piézorésistance au carbone, (e) du capteur de pression fabriqué.

3.2. Fabrication de capteur de pression avec la méthode d'infusion de matériaux conducteurs

Dans [133], deux capteurs de force/pression capacitifs ont été développés en utilisant la méthode d'impression à jet d'encre. Les deux modèles de capteurs sont réalisés sur une structure à membrane circulaire. Le premier modèle est composé d'un diaphragme en acier inoxydable et d'une contre-électrode imprimée par jet d'encre sur un substrat flexible. Le deuxième modèle comprend deux diaphragmes en céramique Al_2O_3 empilés et symétriquement opposés, imprimés en 3D, sur lesquels des électrodes en argent sont imprimées par jet d'encre. Les dimensions des capteurs sont présentées sur le tableau 9.

Les membranes ont été fabriquées séparément, puis ont été assemblées pour construire le capteur. Les deux diaphragmes sont montés l'un au-dessus de l'autre, pris en sandwich entre les deux parties du dispositif en plexiglas usiné. Ensuite, toutes les pièces sont fixées et alignées à l'aide de deux vis de fixation. Le plexiglas a des ouvertures fraisées pour maintenir les connecteurs.

Les deux modèles sont conçus en mode différentiel ; ainsi le capteur de pression est constitué de cellules sensibles à la pression et de cellules de référence insensibles à la pression (figure 53). L'insensibilité est réalisée par des piliers fixes qui empêchent la déflexion de la membrane. Les cellules de capteurs sensibles et insensibles sont connectées en parallèle pour former une capacité commune. Les dimensions des capteurs sont présentées sur le tableau suivant :

	Membrane en acier	Membrane en céramique Al_2O_3
Rayon (mm)	8	15
Distance inter-armature (μm)	300	50
Epaisseur de la membrane (μm)	300	250
Hauteur totale (μm)	600	300

Tableau 9 : Dimensions du capteur de pression proposé par [133].

Le premier et le second modèle ont été testés sous pression dans les plages [0,20] kPa et [0,1.8] kPa respectivement, et ont montré une sensibilité maximale égale à 1.8 pF/104 Pa.

La sensibilité de la membrane en céramique est meilleure, principalement en raison de la résolution plus élevée du procédé d'impression qui permet la réalisation d'un écart plus faible.

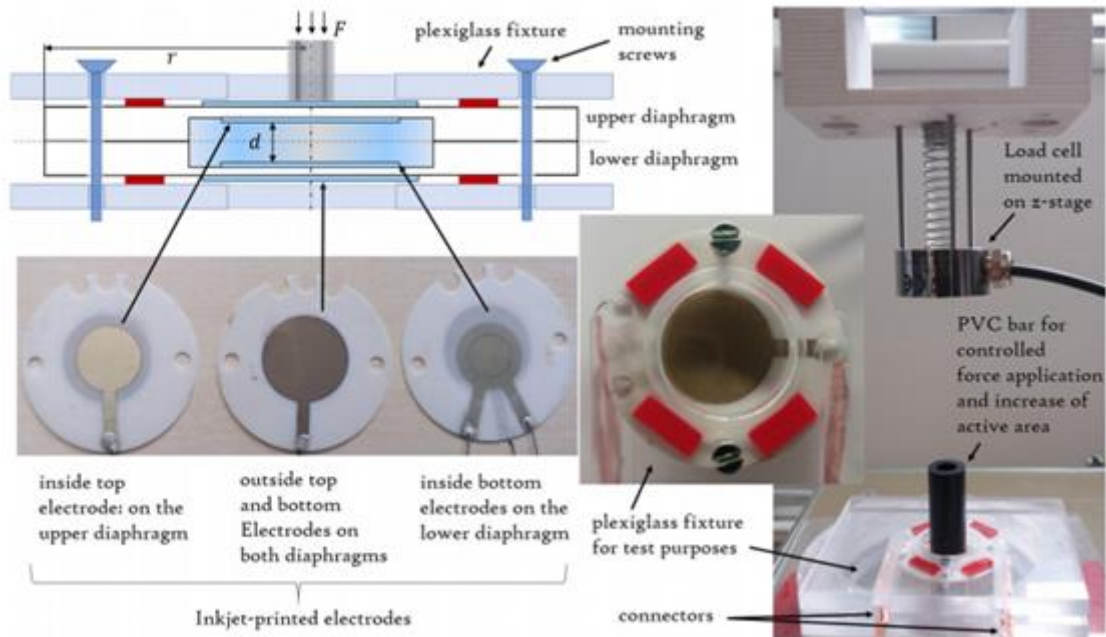


Figure 53 : Exemple de dispositif de mesure montré pour le capteur de pression en céramique.

3.3. Fabrication de capteur de pression avec la méthode d'impression multi-matériaux

Récemment, un capteur de pression souple a été fabriqué à l'aide d'une imprimante 3D multi-matériaux [134]. Le capteur, constitué de cinq couches élastiques, comprend trois matériaux différents : pour l'isolation, les électrodes conductrices et la couche sensible à la pression. Les couches supérieure et inférieure sont des couches d'isolation fabriquées à l'aide d'un polymère souple. La couche la plus interne est une couche intermédiaire sensible à la pression qui est basée sur un réseau de polymère souple IL/film. Entre la couche intermédiaire et les couches isolantes supérieure et inférieure se trouvent des électrodes en composite nanotube de carbone à parois multiples (MWCNT)/polymère qui agissent comme des fils conducteurs extensibles.

Une unité de détection appelée taxel (= pixel tactile) est créée à chaque point où les électrodes se croisent, comme l'indiquent les zones encadrées en rouge sur la figure 54(a).

La figure 55 montre les capteurs fabriqués. Pour la fabrication du capteur de pression multicouche, le photopolymère TangoPlus FLX930 a été utilisé comme matériau de base et a été polymérisé par une lumière ultraviolette. Des nanotubes de carbone sont utilisés pour construire les électrodes conductrices.

Ces impressions multi-matériaux ont été réalisées par le processus ME, en utilisant plusieurs extrudeuses dans chaque impression. Le capteur fabriqué a été testé dans la plage de pression [0,1] MPa.

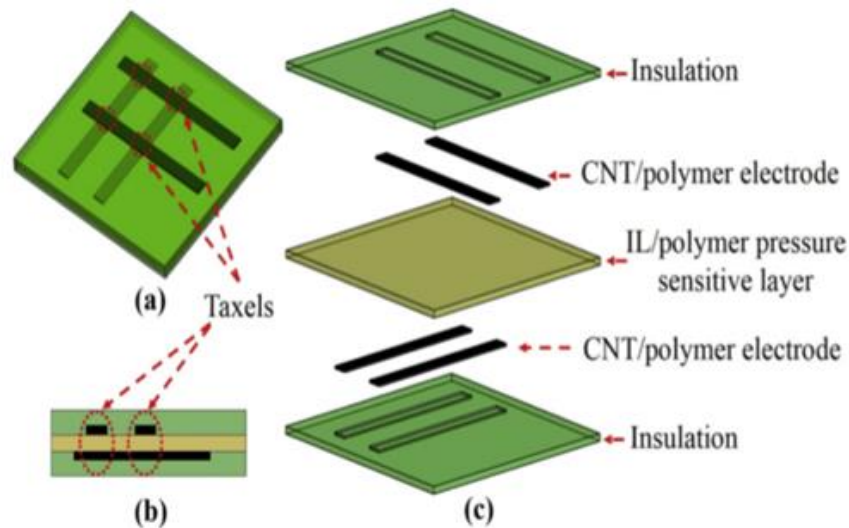


Figure 54 : design de capteur de pression composé de 4 taxels ;(a) model 3D du capteur, (b) vue de côté du schéma diagramme du capteur ;(c) vue éclatée du capteur [134].

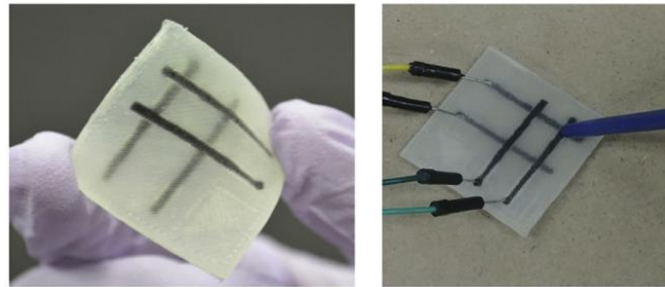


Figure 55 : photos d'un exemple de capteur de pression à quatre taxels [134].

4. Utilisation du capteur de pression capacitif

4.1. Étude de la capacité en fonction de la pression : solutions analytiques dans le cas des petites et grandes déflexions

Deux principes de détection sont utilisés pour les capteurs capacitifs :

- Variation de l'épaisseur du diélectrique sous la contrainte
- Variation de la surface des plaques en regard ou la distance entre elles

Compte tenu des applications ciblées, les machines et matériaux disponibles, nous avons choisi la 2^{ème} méthode. Cette méthode peut être réalisée en adoptant la structure à membrane. En effet, pour les capteurs de pression capacitifs basés sur ce principe, la membrane forme une électrode d'une capacité variable. Sous l'action de la pression, cette électrode se déforme et, en modifiant sa topologie, modifie la valeur de la capacité, ce qui permet d'estimer la variation de pression.

Plusieurs formes de membranes ont été proposées dans la littérature ; les plus courantes étant la forme carrée, rectangulaire et circulaire.

D'après [135], une comparaison de la sensibilité des capteurs ayant des membranes de mêmes surfaces et épaisseurs a montré que la membrane circulaire est la plus sensible.

En absence de pression différentielle entre les deux faces de la membrane, les armatures sont parallèles (Figure 56-a). La capacité au repos C_0 est alors donnée par la relation :

$$C(0) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (28)$$

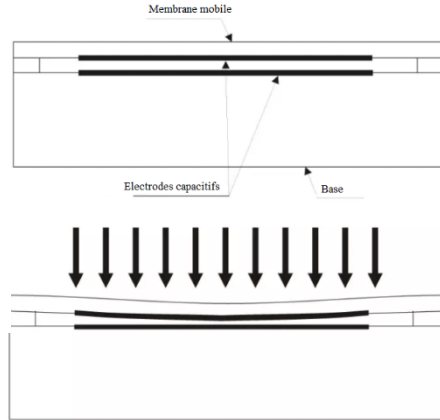


Figure 56 : Schéma synoptique d'un capteur de pression.

Où: ε_0 et ε_r représentent respectivement la permittivité du vide (8.86×10^{-12} F/m) et la permittivité diélectrique. A est la surface de l'armature fixe et d est la distance inter-armatures.

Lorsqu'on applique une pression P_{ext} supérieure à la pression P_{in} contenue dans la cavité, l'armature déformable fléchit (Figure 56-b).

La distance séparant les deux électrodes varie en tous points [136].

La variation de capacité dans le cas de plaques circulaires est exprimée par l'équation suivante [137]:

$$C - C_0 = \iint \frac{\varepsilon r dr d\theta}{d - \omega(r, \theta, P)} - \frac{\varepsilon \pi R^2}{d} \quad (29)$$

Où C est la capacité correspondante à la pression appliquée P , C_0 est la capacité au repos, R est le rayon de la plaque, r est la distance (radiale) entre l'emplacement où la déflexion est évaluée et le centre de la plaque, ε est la constante du diélectrique entre les plaques (dans notre cas, c'est l'air), d est la distance entre les deux plaques au repos, et $\omega(r, \theta, P)$ est la fonction qui modélise la déflexion de la plaque supérieure (figure 57).

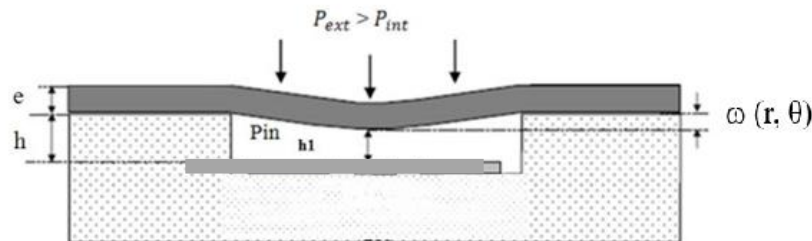


Figure 57 : Schéma de coupe du capteur en fonctionnement.

Pour déterminer la déflexion de la membrane mobile en fonction de la pression appliquée $\omega(r, \theta, P)$, nous appliquerons la théorie des plaques minces [138].

L'utilisation de cette théorie implique les hypothèses suivantes : (1) la membrane est plane, d'épaisseur uniforme, et d'un matériau homogène isotropique ; (2) l'épaisseur de la membrane est inférieure au quart de sa plus petite dimension transverse ; et (3) la membrane n'est jamais contrainte au-delà de sa limite élastique.

Suivant l'épaisseur de la membrane, sa forme et ses dimensions, on peut définir plusieurs gammes de pression. D'après cette théorie, la déformation d'une membrane soumise à une pression $\omega(r, \theta, P)$ obéit à une équation différentielle du 4ème ordre.

La membrane étant considérée parfaitement encastree, le déplacement aux bords est considéré nul. Ces conditions permettent de résoudre cette équation, ce qui permet de déterminer la déflexion en tous points de la membrane.

Deux cas sont à distinguer :

- Cas des petites déflexions : ω est largement inférieur à l'épaisseur de la membrane.
- Cas des grandes déflexions : ω est supérieur à la moitié de l'épaisseur de la membrane.

4.1.1. Cas des petites déflexions

Les membranes plates présentent une relation non linéaire entre la déflexion et la pression appliquée. La contrainte de traction qui se produit en raison de l'étirement de la membrane sous l'effet de la pression appliquée peut être négligée, ainsi pour des déflexions relativement faibles, cette relation est approximativement linéaire.

Ainsi d'après, [139], la déflexion totale $\omega(r)$ de la membrane est donnée par :

$$\omega(r) = \omega(0) \omega_N(r) \quad (30)$$

Où $\omega(0)$ est la déflexion maximale au centre de la membrane directement proportionnelle à la pression appliquée, tandis que $\omega_N(r)$ désigne une fonction indépendante de la pression. Pour une membrane circulaire de rayon R , d'épaisseur uniforme e et totalement encastree aux bords, $\omega(r)$ s'écrit sous la forme :

$$\omega(r) = \omega(0) \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)^2 \quad (31)$$

Cette équation, nous permet d'avoir le profil général de la membrane mobile, avec r étant la distance (radiale) entre l'endroit où la déflexion est évaluée et le centre de la plaque.

L'expression de $\omega(0)$ en fonction de la pression appliquée, dans le cas des petites déflexions est :

$$\omega(0) = \frac{12(1-\nu^2)R^4P}{64Eh^3} \quad (32)$$

Avec E module de Young, ν coefficient de Poisson et h l'épaisseur de la membrane.

4.1.2. Cas des grandes déflexions

Dans le cas de grandes déflexions la contrainte de traction qui se produit en raison de l'étirement de la membrane ne peut plus être négligée. L'augmentation de la rigidité de la membrane qui en résulte est à l'origine d'un comportement non linéaire.

Plusieurs solutions de ω dans ce cas d'étude ont été proposées dans la littérature.

Timoshenko [138] a proposé une solution approximative, qui est très simple à appliquer. Dans le cas d'une membrane circulaire, cette solution est modélisée par la fonction suivante :

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^2 \quad (33)$$

Pour le cas de $\nu = 0.3$, ω_0 le déplacement au centre peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$\frac{\omega_0}{h} + 0.4835 \left(\frac{\omega_0}{h} \right)^3 = \frac{3PR^4}{16Eh^4} (1 - \nu^2) \quad (34)$$

Nadai [143, 144] a proposé une méthode approximative basée sur une expression théorique de la pente de la déflexion de la plaque :

$$\frac{d\omega}{dr} = C \left[\left(\frac{r}{R} \right) - \left(\frac{r}{R} \right)^n \right] \quad (35)$$

Pour le cas de $\nu = 0.25$, Nadai a proposé la relation suivante pour la déflexion au centre :

$$\frac{\omega_0}{h} + 0.583 \left(\frac{\omega_0}{h} \right)^3 = \frac{3PR^4}{16Eh^4} (1 - \nu^2) \quad (36)$$

Dans [142], les auteurs proposent une solution valable pour les petites et grandes déformations. La déflexion d'une membrane circulaire plate parfaitement encastree est donnée par :

$$\frac{PR^4}{Eh^4} = \frac{5.33}{(1 - \nu^2)} \frac{\omega}{h} + \frac{2.83}{(1 - \nu^2)} \frac{\omega^3}{h^3} \quad (37)$$

Dans le cas des petites déflexions, où ω est largement inférieur à h , le terme cubique devient négligeable.

4.2. Structures de capteur de pression capacitif proposées dans la littérature

Pour linéariser la relation (pression, capacité) plusieurs structures ont été proposées dans la littérature.

4.2.1. Structure à bosse centrale

Une réponse linéaire peut être obtenue en rendant le centre de la membrane rigide, de sorte que la déflexion en fonction de la pression appliquée soit constante sur la zone centrale. Comme le montre la figure 58 où les auteurs comparent la déflexion de la ligne radiale d'une membrane plate et une autre ayant une bosse centrale. La membrane plate étudiée est de forme circulaire

de rayon $R = 500 \mu\text{m}$ et épaisseur $h = 1 \mu\text{m}$, la deuxième est de mêmes dimensions ayant une bosse centrale de rayon $R = 200 \mu\text{m}$ et d'épaisseur $h = 7 \mu\text{m}$.

L'inconvénient majeur de cette approche, c'est qu'elle permet généralement d'obtenir une non-linéarité beaucoup plus faible au détriment de la sensibilité.

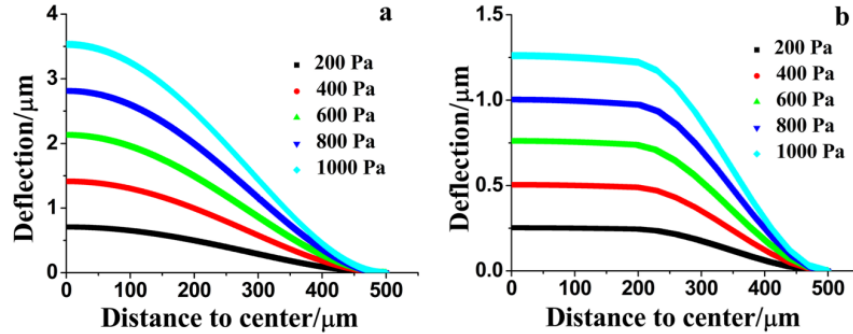


Figure 58 : Relation (déflexion, distance par rapport au centre), (a) dans le cas d'une membrane plate, (b) dans le cas d'une membrane avec bosse centrale.

4.2.2. Structures ondulées

Après avoir étudiés le comportement d'une membrane circulaire à surface ondulée, Jerman et al. [143], ont fabriqué un capteur de pression capacitif adoptant ce type de membrane.

L'introduction des ondulations permet d'obtenir une réponse linéaire (déflexions au centre, pression) contrairement à la membrane plate, ce qui permet d'améliorer la linéarité des capteurs fabriqués avec ce type de membranes.

En effet, avec l'introduction d'ondulations sinusoïdales peu profondes dans la structure de la membrane, la déflexion est approximativement donnée par [146,147] :

$$\frac{PR^4}{E'h^4} = a_p \frac{\omega}{h} + b_p \frac{\omega^3}{h^3} \quad (38)$$

Avec :

$$a_p = \frac{2(q+3)(q+1)}{3(1-\frac{v^2}{q^2})} \quad (39)$$

$$b_p = 32 \frac{1-v^2}{q^2-9} \left[\frac{1}{6} - \frac{3-v}{(q-v)(q+3)} \right] \quad (40)$$

Et :

$$E' = \frac{E}{1-v^2} \quad (41)$$

Et pour les profils sinusoïdaux peu profonds :

$$q^2 = \frac{s}{l} \left(1 + 1.5 \left(\frac{H}{h} \right)^2 \right) \quad (42)$$

Avec q le facteur de qualité de l'ondulation et H sa profondeur, s sa longueur et l sa période spatiale (figure 59). Pour les ondulations peu profondes, s/l est proche de 1. Ainsi, q varie de 1, pour un diaphragme plat, à une valeur qui approche 1.22 fois le rapport entre la profondeur de l'ondulation et l'épaisseur du diaphragme. Pour les diaphragmes métalliques ondulés classiques, la valeur de q est généralement choisie entre 10 et 30. Il est clair que l'introduction d'ondulations dans une membrane modifie les coefficients des termes linéaires et cubiques de l'équation qui régit sa déflexion en fonction de la pression appliquée. Le coefficient a_p augmente rapidement avec l'augmentation de q , ce qui augmente la déflexion de transition en dessous de laquelle les déflexions restent linéaires, tandis que le coefficient b_p diminue rapidement avec l'augmentation de q . Ainsi, la linéarité du diaphragme peut être augmentée en fournissant des ondulations qui ne représentent que trois fois l'épaisseur du diaphragme. Dans ce cas, $q = 3.8$, et le terme linéaire a_p est multiplié par quatre environ, tandis que le coefficient cubique b_p est réduit d'un facteur supérieur à 10.

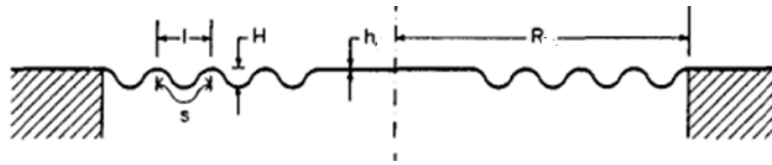


Figure 59 : Schéma vue de coupe d'une membrane à surface ondulée et ses paramètres caractéristiques.

Pour améliorer encore la linéarité de la structure, une bosse peut être ajoutée au centre de la membrane. Dans ce cas, les petites déflexions de la membrane peuvent s'écrire :

$$\frac{PR^4}{E'h^4} = a_p n_p \frac{\omega}{h} \quad (43)$$

Avec :

$$\frac{1}{n_p} = (1 - r_{bd}^4) \left(1 - \frac{8qr_{bd}^4(1 - r_{bd}^{q-1})(1 - r_{bd}^{q-3})}{(q-1)(q-3)(1 - r_{bd}^{2q})} \right) \quad (44)$$

r_{bd} est le rapport entre le rayon de la bosse et le rayon du diaphragme. Cette correction est inférieure à 20 % pour les rapports de bossage inférieurs à 0.4 avec des valeurs de q supérieures à 4. Elle est cependant très significative pour les membranes plates dont le rapport de bossage est supérieur à 0.3.

Un prototype de capteur de pression capacitif a été fabriqué avec une membrane ondulée ayant un bossage central [143]. La membrane circulaire est de 3.5 mm de diamètre et d'une épaisseur d'environ 1.2 μm avec un bossage à 80%. Les ondulations ont une profondeur de 12 μm , et la distance inter-armature initial de 10 μm . Ce capteur fonctionne sur une plage de pression d'environ ± 0.133 kPa.

La déflexion linéaire de cette membrane est d'environ 1.037 $\mu\text{m/kPa}$. La sensibilité mécanique de cette structure peut être améliorée en diminuant l'épaisseur de la membrane, en réduisant le rapport de bossage ou en diminuant la profondeur de l'ondulation. Par exemple, une structure

similaire avec un rapport de bossage de 20 % aurait une sensibilité d'environ $3.724 \mu\text{m/kPa}$, et si la profondeur d'ondulation était réduite de $12 \mu\text{m}$ à $4 \mu\text{m}$ avec un bossage de 20 %, la sensibilité serait d'environ $19.95 \mu\text{m/kPa}$, en gardant la même épaisseur de diaphragme de $1.2 \mu\text{m}$. Une membrane ayant une épaisseur égale à $0.6 \mu\text{m}$, avec une profondeur d'ondulation de $4 \mu\text{m}$ et un rapport de bossage de 20 %, donnerait une sensibilité d'environ $58 \mu\text{m/kPa}$, soit une sensibilité 56 fois plus grande que la structure fabriquée.

Bien que l'introduction des ondulations soit une solution permettant d'améliorer la linéarité des capteurs de pression, cette solution peut être désavantageuse pour les capteurs capacitifs basse pression, car l'amélioration de la linéarité est obtenue au détriment de la sensibilité dans la région des petites déflexions. Van Mullem et al. [145] ont comparé les caractéristiques de déflexion-pression simulées de trois membranes: une plate et deux ondulées avec un q de 4 et 8. Les paramètres pour les trois membranes sont $R = 0.5 \text{ mm}$, $h = 1 \mu\text{m}$ et $E = 3 \text{ GPa}$ (figure 60). La comparaison a montré que dans la région des petites déflexions, l'amélioration de la linéarité par l'introduction des ondulations entraîne une augmentation de la pression nécessaire pour obtenir une déflexion équivalente à celle de la membrane plate.

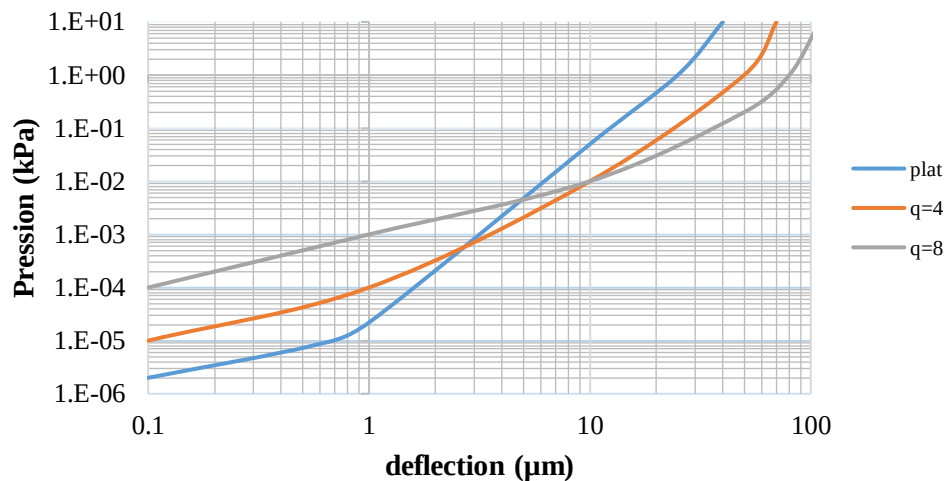


Figure 60 : Relation (Pressure, déflexion) de membranes plates et ondulées.

4.2.3. Structures à base de peigne

Le capteur de pression capacitif conventionnel en peigne présenté sur la figure 61, possède plusieurs condensateurs conçus comme un peigne. Lorsque la pression externe est appliquée à la membrane, la déflexion de la membrane provoque le déplacement des électrodes en peigne mobiles, ce qui entraîne une modification des zones de chevauchement entre les électrodes en peigne mobiles et les électrodes en peigne fixes. Par conséquent, la capacité varie en fonction de la pression [146].

En effet la capacité totale entre deux dents du peigne est composée de la capacité entre chaque dent et le fond correspondant de la structure et de la capacité entre deux dents voisines. La structure du peigne est conçue de telle sorte que la seconde domine, et que l'on obtienne une capacité directement proportionnelle à la déflexion. Cela implique que les dents doivent être plus proches les unes des autres que la distance entre les dents et le fond.

En général, la sensibilité du capteur capacitif peut être augmentée en réduisant l'épaisseur de la membrane et la distance entre les plaques de la membrane.

Il est important que les dents du peigne ne tournent pas pendant la déflexion, car cela modifierait la distance entre les dents et introduirait des non-linéarités lors de la conversion déflexion-capacité.

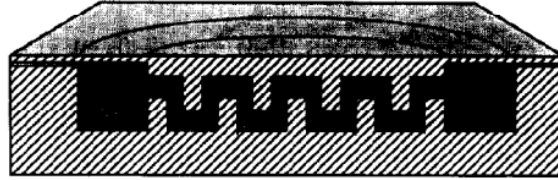


Figure 61 : Schéma d'un capteur de pression en peigne conventionnel.

Dans le modèle proposé par [147], un couplage mécanique est appliqué à la membrane mobile pour isoler l'élément de détection mécanique de l'élément de détection électrique. Ce capteur de pression capacitif de type peigne se compose de trois éléments principaux (figure 62) : une membrane, une plaque de peigne (une plaque fixe et une plaque mobile) et un élément de couplage mécanique (un cylindre est fixé entre le centre de la membrane et la plaque de peigne mobile).

La valeur de la capacité peut être calculée comme suit :

$$C(P) = \frac{2n\epsilon(L - \omega_0)l}{g} \quad (45)$$

Avec L étant la hauteur des dents de la peigne, ω_0 le déplacement au centre de la plaque mobile, g la distance entre les dents, l la longueur et n le nombre de dents de la peigne.

La plaque mobile du capteur est fixée de manière rigide au centre d'une fine membrane par le biais d'un couplage mécanique (cylindre). La taille de ce cylindre est petite, avec un rayon de $1 \mu\text{m}$. L'épaisseur de la membrane et l'épaisseur des franges dans la plaque du peigne sont de $3 \mu\text{m}$. Lorsqu'une pression est exercée sur la membrane, celle-ci se défléchit et la plaque de peigne mobile produit également la même déflexion par le biais du couplage mécanique.

Les auteurs ont simulé les performances du capteur pour une membrane en aluminium et une structure en peigne en or. Les résultats ont montré une sensibilité égale à 36 aF/bar , pour une plage de $[0, 1.5] \text{ bar}$.

Ce modèle permet de supprimer les non-linéarités qui peuvent être causées dans le cas où les dents tournent pendant la déflexion dans le modèle à peigne classique.

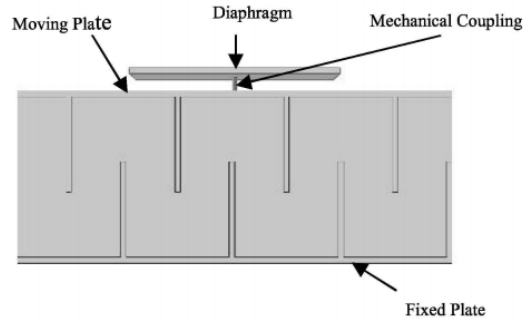


Figure 62 : Structure à peigne avec couplage mécanique l'élément de détection mécanique de l'élément de détection électrique.

Le même principe est adopté par [148] pour fabriquer un capteur composé de deux couches de structures sensibles, à savoir la membrane sensible à la pression et la membrane à électrode en peigne. Le diaphragme de l'électrode en peigne est connecté au diaphragme sensible à la pression par l'intermédiaire de l'îlot de silicium. Lorsque la pression à mesurer est appliquée directement sur la membrane sensible, celle-ci se déforme et provoque un déplacement dans la direction Z (déformation ΔZ) de l'électrode en peigne mobile, comme indiqué sur la figure 63.

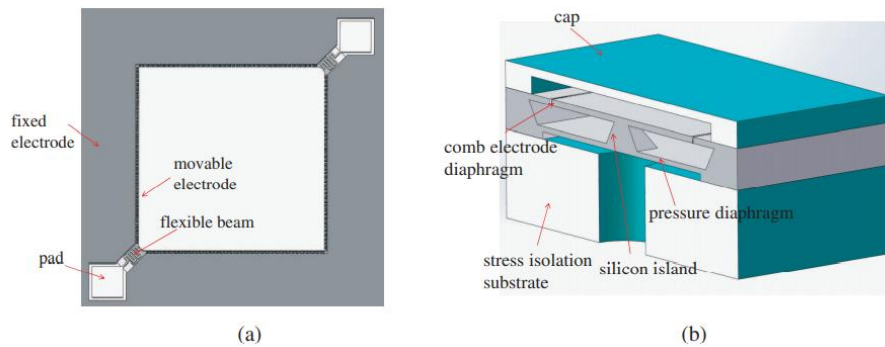


Figure 63 : structure du capteur de pression capacitif proposé par [148], (a) vue de dessus de la structure du capteur, (b) vue de coupe de la structure.

En [149] les auteurs ont proposé une structure en peigne qui peut être considérée comme équivalente à la structure en bosse, mais contrairement aux capteurs de pression capacitifs traditionnels à membrane ayant une bosse centrale, la plage linéaire est encore améliorée en utilisant la modification de la zone de chevauchement des électrodes en peigne (figure 64).

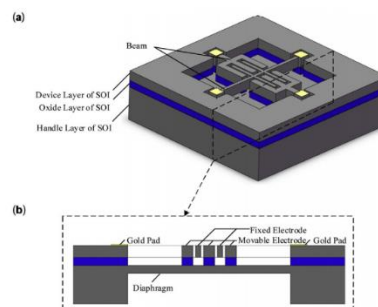


Figure 64 : structure du capteur de pression capacitif proposé par [149], (a) vue de la structure du capteur, (b) vue de coupe de la structure.

La structure proposée a été réalisée, et le capteur ainsi fabriqué a été testé avec une sensibilité de 17 aF/Pa et une erreur de non-linéarité de 1.37% pour une pression comprise entre 0 et 30 kPa.

4.2.4. Structure à base de membrane découplée mécaniquement de la partie capacitive

La structure proposée par Y.Zhang et al [150] découple la membrane sensible à la pression de la détection capacitive. Un condensateur hermétiquement scellé et électriquement isolé se trouve mécaniquement couplé à la membrane de détection de pression. Ce capteur de pression est constitué de trois éléments principaux : une membrane, un condensateur composé d'une paire de plaques (une plaque fixe et une plaque mobile) et un élément de couplage mécanique. La membrane, la plaque mobile et la plaque fixe sont toutes de forme circulaire.

Comme présenté sur la figure 65, la plaque mobile du condensateur est fixée de manière rigide au centre de la membrane par l'intermédiaire du pilier central, mais est isolée électriquement de la membrane de détection de pression. La taille de ce pilier central est suffisamment petite pour avoir un effet négligeable sur la déflexion de la membrane. La plaque fixe est placée en parallèle avec la plaque mobile pour former un condensateur à plaques parallèles.

Pour un capteur de pression de forme circulaire, la capacité est donnée par :

$$\frac{\Delta C}{P} = \frac{3(1-\nu^2)R^4}{16Eh^3} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d^2} \quad (46)$$

Comme le montre l'équation, pour une même déflexion de la membrane sous pression, la sensibilité du capteur peut être améliorée en augmentant la surface A de la membrane et en réduisant d la distance entre les armatures ; cependant la gamme dynamique peut être augmentée en réduisant les dimensions de la membrane de détection. Ainsi, la sensibilité à la pression et la plage dynamique peuvent être mises à l'échelle indépendamment.

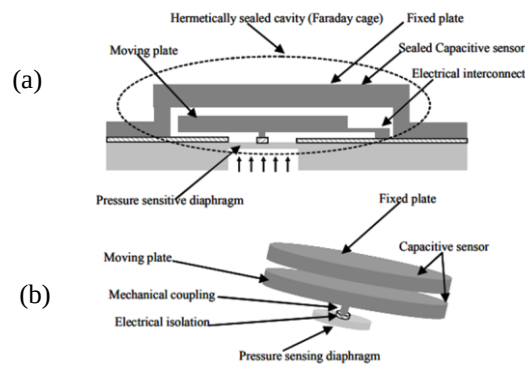


Figure 65 : structure du capteur de pression capacitif proposé par [150], (a) vue de coupe de la structure, (b) vue de la structure du capteur.

Les figures 66 et 67 présentent les performances de deux capteurs de pression fabriqués. Ces deux capteurs ont une plaque mobile dont le rayon est de 150 µm et des membranes de détection de différents diamètres. Le rayon de la membrane de détection de la figure 50 est de 90 µm, et celui de la figure 51 est de 100 µm. Comme on peut le voir sur la figure 50, le capteur de

pression avec la membrane de rayon $90\text{ }\mu\text{m}$ permet d'atteindre une sensibilité à la pression meilleure que 10 aF/Pa dans une gamme de pression inférieure ($<1000\text{ Pa}$) et une sensibilité à la pression beaucoup plus élevée (de 150 aF/Pa) dans une gamme supérieure ($>1000\text{ Pa}$). Lorsque le rayon de la membrane de détection de pression augmente de $90\text{ }\mu\text{m}$ à $100\text{ }\mu\text{m}$, la sensibilité à la pression est largement améliorée. Comme on peut le voir sur la figure 51, dans la gamme des pressions ($>1000\text{ Pa}$), la sensibilité mesurée est de 260 aF/Pa .

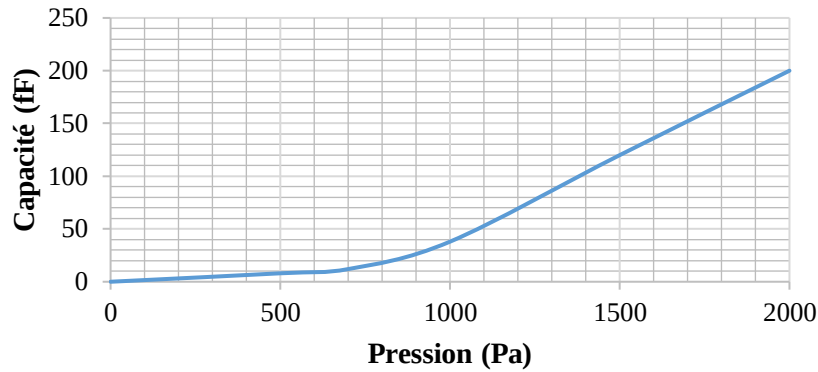


Figure 66 : Relation (capacité, pression) pour le capteur de pression capacitif proposé par [150], cas de membrane ayant un rayon égal à $90\text{ }\mu\text{m}$ et une membrane mobile ayant un diamètre de $150\text{ }\mu\text{m}$

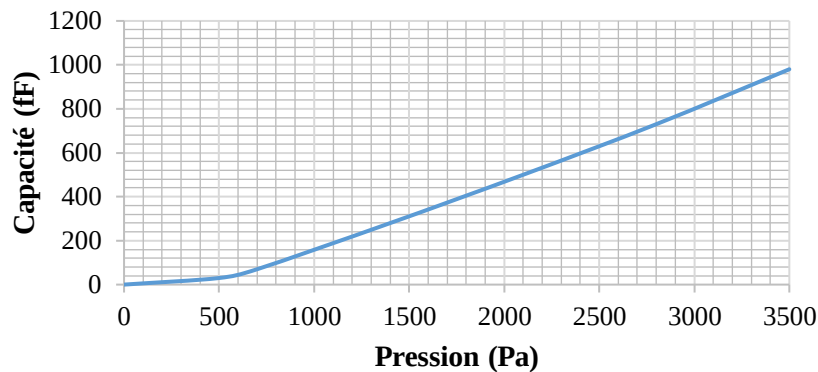


Figure 67 : Relation (capacité, pression) pour le capteur de pression capacitif proposé par [150], cas de membrane ayant un rayon égal à $100\text{ }\mu\text{m}$ et une membrane mobile ayant un diamètre de $150\text{ }\mu\text{m}$

4.2.5. Structure à C_0 variable

Les auteurs [151] ont proposé une nouvelle structure, où le capteur se compose de deux cellules : une de référence (C_0) et l'autre variable (C). Contrairement à la structure classique où la capacité de référence est fixe, la capacité de référence varie inversement à C en réponse à la pression. Le schéma de principe de cette structure est représenté sur la figure 68. Lorsque la pression augmente, la capacité C varie dans le sens positif, tandis que C_0 varie dans le sens négatif.

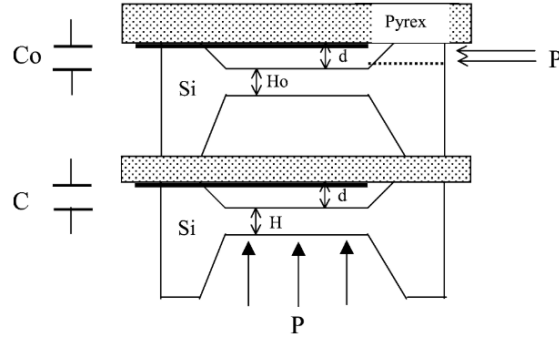


Figure 68 : structure du capteur de pression capacitif proposé par [151].

Les résultats de simulation ont montré qu'avec cette structure la linéarité est significativement améliorée (l'erreur de non-linéarité diminue de 6.4% à 3.8%) et la sensibilité est également augmentée (2000 ppm/mmHg au lieu de 950 ppm/mmHg).

En effet, la sensibilité absolue du capteur (à une pression donnée P_0) est donnée par :

$$S_T = \left[\frac{\Delta(C - C_0)}{\Delta P} \right]_{P_0} \quad (47)$$

$$S_T = \left[\frac{\Delta C}{\Delta P} \right]_{P_0} - \left[\frac{\Delta C_0}{\Delta P} \right]_{P_0} \quad (48)$$

Comme la variation ΔC_0 est négative, la sensibilité totale du capteur peut s'écrire :

$$S_T = \left[\frac{\Delta C}{\Delta P} \right]_{P_0} + \left[\frac{|\Delta C_0|}{\Delta P} \right]_{P_0} \quad (49)$$

Avec S et S_0 la sensibilité de la première et seconde cellule capacitive respectivement.

Lorsque P_0 augmente, S augmente mais S_0 diminue et donc S_T , qui est la somme de S et S_0 , n'augmente pas de la même manière que le capteur classique et reste presque constante, ce qui permet de diminuer la non-linéarité.

La variation de capacité pour ce modèle est :

$$C - C_0 = \iint \frac{\epsilon r dr d\theta}{d - \omega(0) \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)^2} - \iint \frac{\epsilon r dr d\theta}{d + \omega(0) \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)^2} \quad (50)$$

Avec d_i la distance inter-armature de la deuxième cellule.

5. Conclusion

L'impression 3D est devenue une technologie largement utilisée pour la fabrication des capteurs de pression, surtout pour les applications où l'ergonomie est d'ordre moins important que le coût de fabrication.

Nous avons présenté tout au long de ce chapitre, les différents capteurs de pression qui ont été réalisés avec cette technologie et nous avons conclu que vu les imprimantes 3D dont on dispose

et les matériaux que nous avons, la fabrication hybride et le principe capacitif sont les plus adaptés à notre cas.

Nous avons par conséquent, étudié les capteurs de pression capacitifs. La réponse de ce type de capteurs est non linéaire par rapport à la pression appliquée. Pour cela plusieurs travaux de recherche ont porté sur la proposition de nouvelles structures, en vue d'améliorer leurs linéarités. La majorité de ces travaux ont proposé des structures où la modification par rapport à la structure classique concerne la partie mobile du capteur.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les capteurs de pression que nous avons réalisés en impression 3D et nous proposerons une nouvelle structure.

Chapitre 5 :

Réalisation
de capteurs de pression capacitifs avec impression 3D :
Cas de grandes déflexions

Chapitre 5 : Réalisation de capteurs de pression capacitifs avec impression 3D : Cas de grandes déflexions

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons analysé les différentes techniques et matériaux utilisés pour la fabrication des capteurs de pression réalisés en impression 3D. Cette analyse nous a permis de sélectionner le principe de détection capacitif que nous adoptons compte tenu des imprimantes 3D et matériaux dont on dispose.

Nous avons étudié le principe des capteurs de pression capacitifs, et nous avons dressé une synthèse bibliographique des structures proposées dans la littérature. L'objectif de ces travaux de recherche étant d'améliorer les performances de la structure classique à armatures parallèles en termes de linéarité et sensibilité. Cette synthèse a mis en évidence les avantages et inconvénients de chaque structure.

Dans ce chapitre, nous allons présenter tout d'abord le processus d'impression 3D que nous avons utilisé et les différentes structures que nous proposons.

Après avoir réalisé ces capteurs, nous étudierons leurs performances, puis dans un second temps, proposerons en réalisant une nouvelle structure basée sur la modification de la membrane fixe, plutôt que sur la membrane mobile, contrairement à ce qu'a été présenté dans la littérature.

Ces capteurs sont dimensionnés pour une plage de pression [0-9] kPa, l'objectif principal étant la mise en évidence de la faisabilité du processus. La plage peut varier en fonction des dimensions du capteur et vice versa.

2. Process de fabrication

2.1. Imprimante 3D

Pour fabriquer le capteur de pression, nous avons utilisé l'imprimante 3D Volumic3D basée sur la technologie d'impression par dépôt fondu (figure 69).

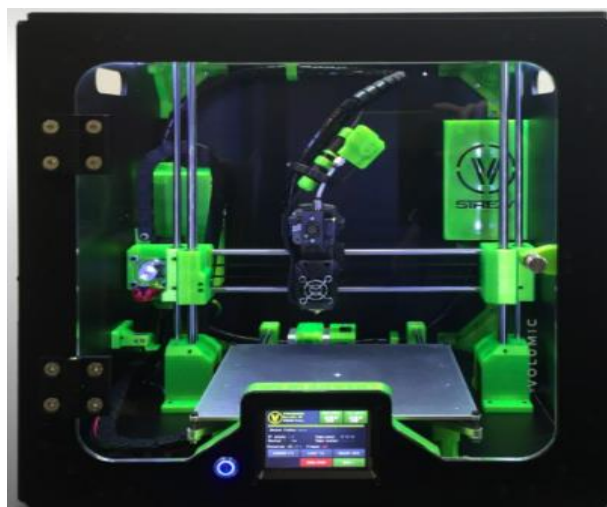


Figure 69 : Image de l'imprimante 3D utilisée.

Cette imprimante utilise une buse chauffée pour faire fondre des filaments de polymère. La machine utilisée est dotée d'une seule extrudeuse ayant un diamètre de 0.3 mm, une résolution de 25 µm et permet d'imprimer des objets avec une taille maximale de 290x200x300 mm³.

Pour générer le gcode, nous utilisons le logiciel Simplify3D.

2.2. Matériau de fabrication

2.2.1. Choix du matériau

Les matériaux les plus répandus sont le PLA (polylactic acid) et l'ABS (acrylonitrilebutadiène-styrene). Le PLA est constitué de (bio) polyesters et il est biodégradable. Les filaments de PLA sont largement utilisés et présentent une température de fusion d'environ 230 °C [152] [153]. L'ABS est principalement utilisé dans le domaine industriel et présente de bonnes propriétés mécaniques, une facilité de traitement, une possibilité de réutilisation[154]. La température d'extrusion de l'ABS se situe entre 200 et 300 °C selon la composition [152]. Afin d'évaluer les caractéristiques des deux matériaux, Rodríguez-Panes et al. [152] ont présenté une analyse comparative entre les pièces en ABS et en PLA produites par la technique FDM. Le filament d'ABS s'est révélé plus ductile que le PLA, mais ce dernier est plus rigide et a une plus grande résistance à la traction. Ainsi, en ce qui concerne les différents paramètres, tels que le remplissage, la hauteur de la couche et l'orientation, le PLA présente une plus grande variabilité que l'ABS et les pièces de PLA se comportent de manière plus rigide. Les propriétés de ces deux matériaux sont donc distinctes.

Comme nous voulons réduire l'effet des grandes déformations, que peut engendrer l'utilisation de matériaux thermoplastiques, nous avons sélectionnés le PLA comme matériau de production.

Propriétés mécaniques du matériau

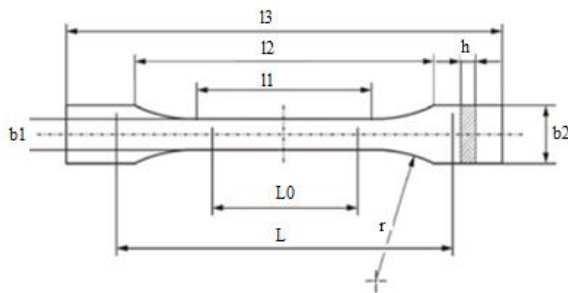
D'après[153]–[159], les propriétés mécaniques des matériaux changent après impression. Pour cela des échantillons ont été imprimés conformément à la norme DIN EN ISO 527-2. Les principaux paramètres d'impression, qui agissent le plus sur les propriétés mécaniques sont principalement, l'angle, la température d'impression, l'épaisseur de la couche et le taux de remplissage.

Les paramètres d'impression sont repris dans le tableau 10 et les dimensions des échantillons sur la figure 70.

Pour déterminer les propriétés mécaniques du matériau utilisé, des tests expérimentaux ont été effectués en imprimant à une vitesse de 5 mm/min sur une machine d'essai universelle (H10KT Tinius) et les résultats sont repris dans le tableau 11.

Diamètre de la buse (mm)	0.3
Température de fusion (°C)	200
Température de lit (°C)	80
Angle d'impression par rapport à l'axe horizontal	45°
Vitesse d'impression (mm/min)	4800
Remplissage (%)	100
Hauteur de la couche (µm)	25

Tableau 10 : Paramètres impression 3D[160], [161].



l1	30.0 ± 0.5mm
l2	58 ± 2 mm
l3	75 mm
L0	25.0 ± 0.5 mm
L	L2 + 2mm
h	2 mm
r	30 mm
b1	5.0 ± 0.5 mm
b2	10.0 ± 0.5 mm

Figure 70 : Schéma et dimensions de l'échantillon imprimé.

Module de Young (MPa)	4500
Coefficient de Poisson	0.36
Densité (g/cm ³ at 21.5 °C)	1.25

Tableau 11 : Propriétés mécaniques du matériau[160], [161].

2.2.2. Métallisation

Pour assurer la conductivité nécessaire à la structure de pression capacitive du capteur, la surface de la plaque inférieure a été recouverte d'une feuille d'Aluminium (afin de réduire le coût de fabrication du capteur), tandis que pour la membrane, nous avons fait appel au processus de métallisation par pulvérisation pour obtenir une couche métallique, dont l'épaisseur est négligeable devant l'épaisseur de la membrane. La machine utilisée a une résolution de 2 nm. Après avoir testé la conductivité de la couche déposée, nous avons estimé l'épaisseur de la couche d'or déposée à 22 nm.

3. Dimensionnement et assemblage du capteur : structure classique

3.1. Détermination des caractéristiques du capteur

Les dimensions du capteur doivent être fixées de manière à augmenter sa sensibilité.

3.1.1. L'épaisseur de la plaque mobile

La membrane mobile a été conçue en exploitant les limites de résolution du processus de fabrication. La valeur minimale d'épaisseur autorisée par l'imprimante 3D utilisée est de $25\text{ }\mu\text{m}$. Après avoir vérifié la perméabilité des membranes de différentes épaisseurs, nous avons fixé $h = 200\text{ }\mu\text{m}$.

3.1.2. Rayon

Des simulations du comportement de la membrane avec différentes valeurs de R (le rayon de la membrane) ont démontré que pour $R < 8\text{ mm}$, le déplacement maximal de la membrane est très inférieur à la résolution de la machine ($25\text{ }\mu\text{m}$), ce qui nous a ramené à fixer $R = 8\text{ mm}$.

3.1.3. La séparation des plaques au repos

Après avoir déterminé les valeurs de R et h , à l'aide du logiciel ANSYS utilisant la méthode des éléments finis (FEM), nous avons simulé le capteur conçu pour déterminer la déviation maximale de la plaque supérieure sous pression maximale.

Pour une pression maximale de 9 kPa appliquée au centre de la surface de la plaque mobile, nous obtenons une déflexion maximale de $130\text{ }\mu\text{m}$ comme indiqué sur la figure 71. Nous avons donc fixé $d = 150\text{ }\mu\text{m}$, distance réalisable avec l'imprimante 3D.

Puisque le déplacement au centre de la membrane ($130\text{ }\mu\text{m}$), sous l'effet de la pression maximale est supérieur à $1/5$ de l'épaisseur de la membrane mobile ($200\text{ }\mu\text{m}$), ceci nous place dans le cas des grandes déformations.

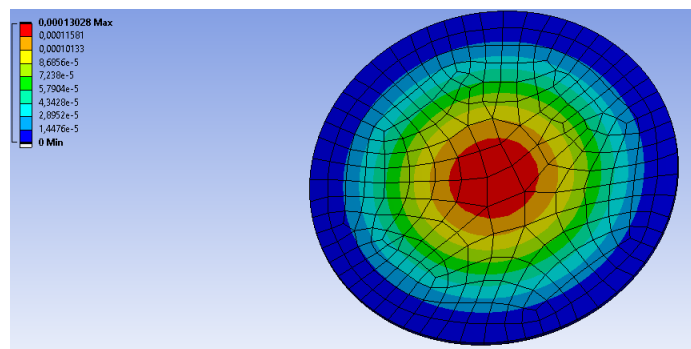


Figure 71 : Simulation par éléments finis de la déflexion de la membrane imprimée, montre une déflexion maximale au centre égale à $130\text{ }\mu\text{m}$ sous 9 kPa [160], [161].

La non-linéarité (déflexion, pression) dans le cas des grandes déflexions, est mise en évidence sur la figure 72, en utilisant ANSYS où l'on compare la déflexion en régime des petites et grandes déflexions en fonction de la pression appliquée à la membrane étudiée.

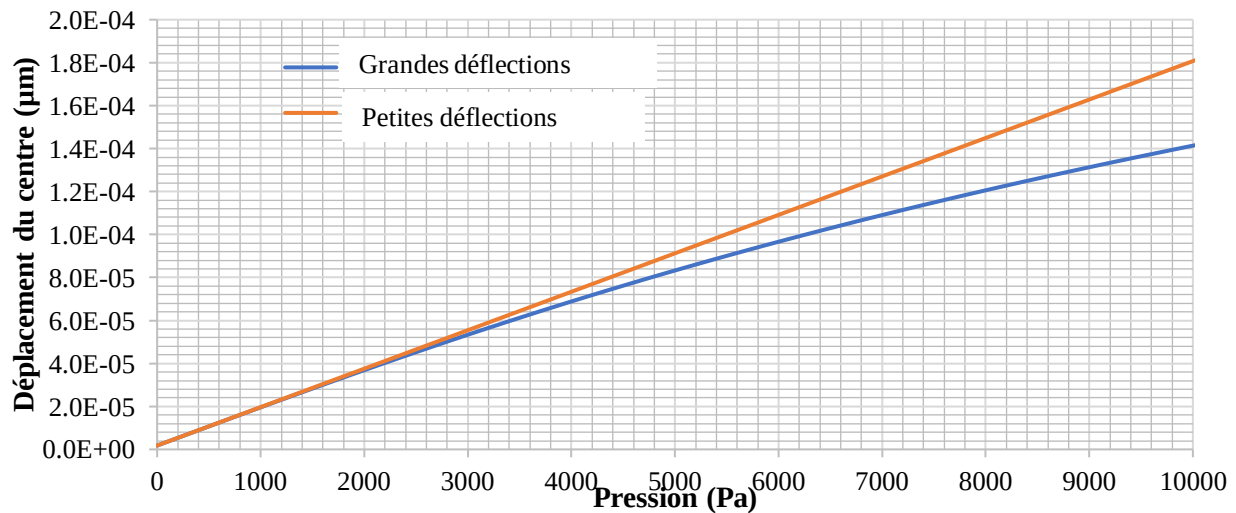


Figure 72 : Comparaison entre la déflexion en régime des petites et grandes déformations en fonction de la pression.

3.2. Assemblage du capteur

Le capteur est composé de quatre parties principales (figure 73) : la première est la membrane mobile, la deuxième la membrane fixe, les troisième et quatrième servent à assurer l'encastrement parfait de la membrane mobile. La troisième est appelée « house » car elle accueille la membrane ; elle a un diamètre interne de 16.5 mm et un diamètre externe de 22 mm, ainsi le corps du capteur ne se déforme pas lui aussi sous l'effet de la pression appliquée. La quatrième partie s'emboîte avec la troisième pour maintenir la membrane mobile et contient le connecteur fluide qui servira à appliquer la pression à mesurer.

La membrane mobile est dessinée en 3D suivant les dimensions déterminées dans la section précédente puis imprimée avec les paramètres résumés dans le tableau 10. Pour créer une connexion électrique avec le capteur, nous utiliserons l'époxy d'argent pour fixer les fils de cuivre sur les plaques du capteur.

La membrane fixe est composée de deux cylindres de diamètres différents, dont le plus petit est métallisé par une couche de papier aluminium pour assurer la conductivité électrique nécessaire à cette partie du capteur. La hauteur du petit cylindre est calculée de telle sorte à ce que le gap entre cette partie est la membrane mobile correspond à la distance inter-armature souhaitée.

Le design proposé, nous permet de mesurer la réponse de capteurs ayant divers distance inter-armatures en agissant uniquement sur les dimensions de la deuxième partie.

L'assemblage des différentes parties est effectué manuellement avec une colle.

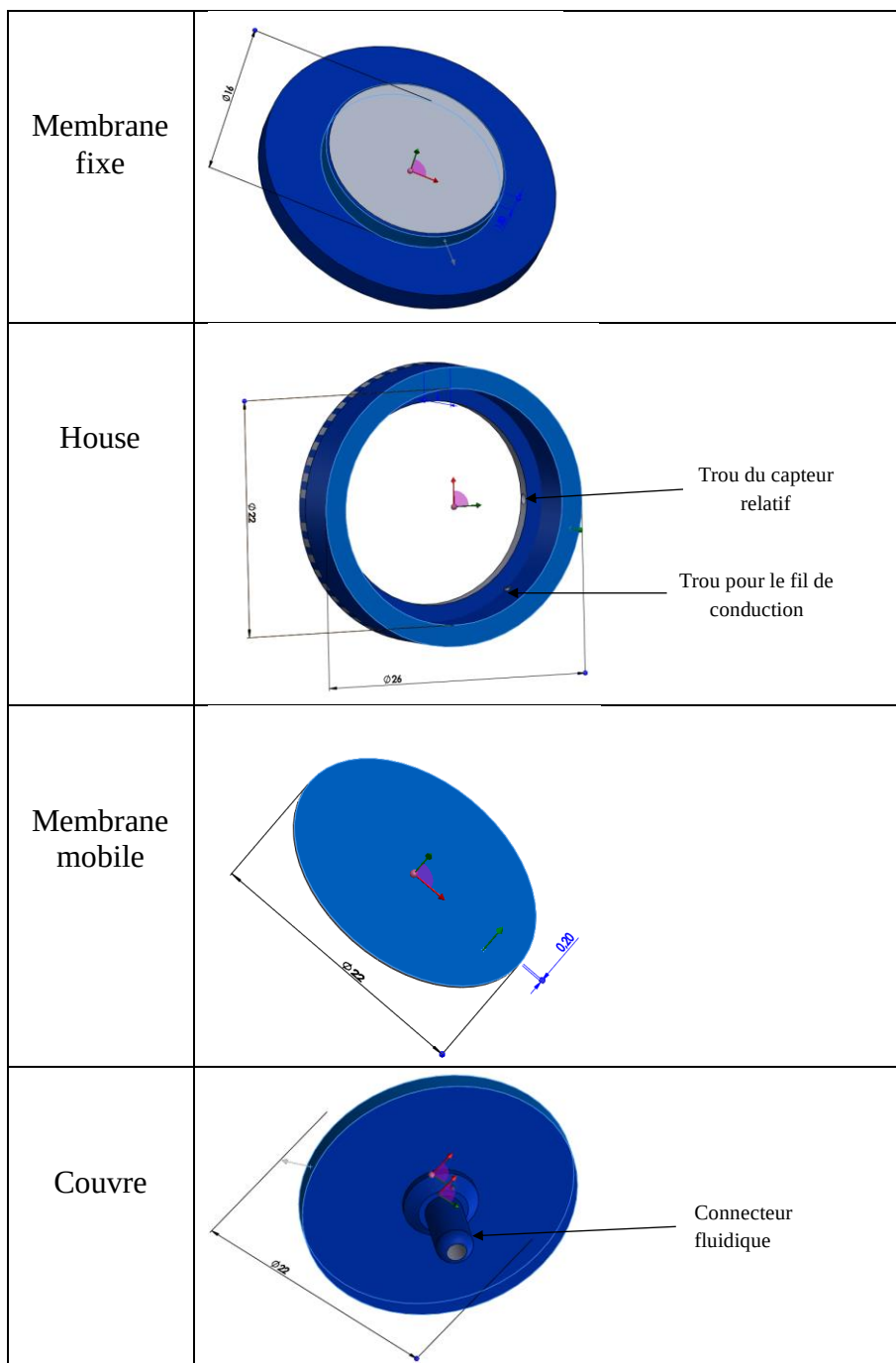


Figure 73 : dessin 3D du capteur de pression.

Le capteur capacitif fabriqué est représenté sur la figure 74.

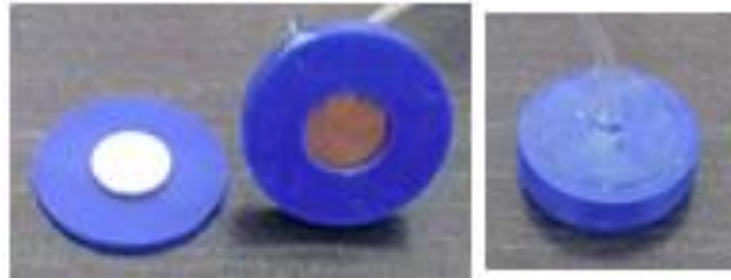


Figure 74 : Images du capteur imprimé en 3D, {a} différentes parties du capteur avant d'être assemblé, {b} capteur assemblé[160], [161].

3.3. Caractérisation du capteur

Pour caractériser le capteur de pression capacitif fabriqué, nous utilisons le dispositif expérimental représenté schématiquement sur la figure 75. Un capacimètre (le LCZmeter NF2345) a été utilisé pour mesurer la variation de capacité ainsi qu'une carte d'acquisition (MicroLabExAO) pour lire la valeur de la pression appliquée (figure 75). Une photographie de l'expérience est présentée sur la figure 76.

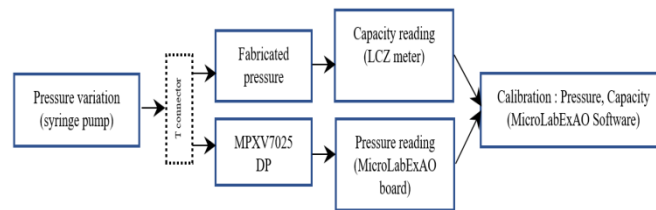


Figure 75 : Schéma du dispositif expérimental de la caractérisation du capteur de pression réalisé.



Figure 76 : Dispositifs expérimentales de la caractérisation du capteur de pression réalisé.

Le LCZ-mètre est calibré en utilisant la correction du circuit ouvert/court-circuit pour éliminer l'impédance de polarisation de l'interface de l'électrode. La capacité est mesurée avec une fréquence de 100 kHz et une tension de 1.0 V.

Comme le montrent les figures 75 et 76, une pompe à seringue a été connectée au moyen d'un connecteur en T au capteur de pression fabriqué, et à un capteur de pression différentielle

MPXV7025DP. Une pression externe comprise dans l'intervalle de [0-9] kPa a ensuite été appliquée aux capteurs de pression.

La figure 77, montre les résultats obtenus à température ambiante. La réponse du capteur obtenue par simulation a été comparée à celle obtenue expérimentalement.

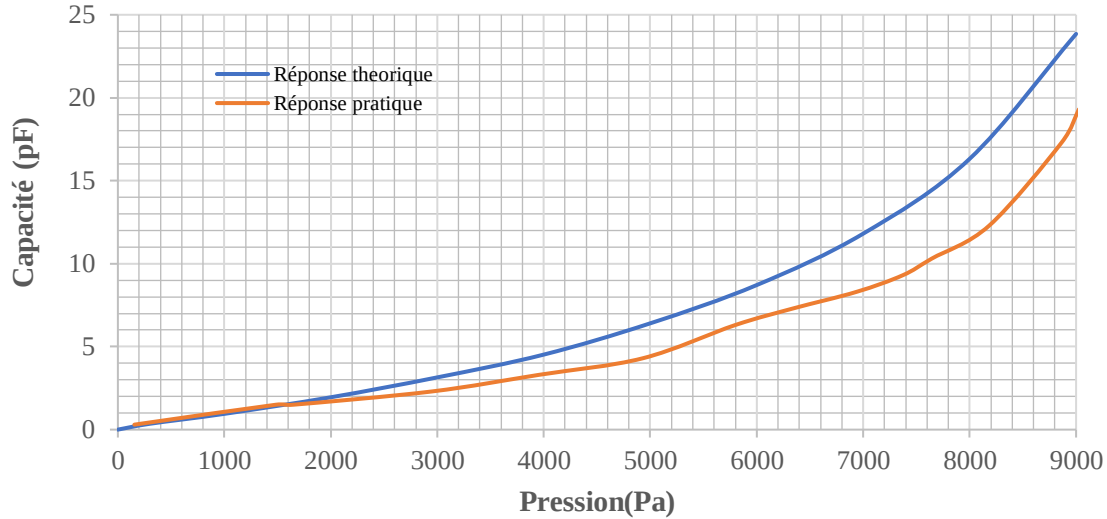


Figure 77 : Réponse du capteur imprimé en 3D à température ambiante[160], [161].

La courbe de la figure 77 montre que pour $P < P_{\max}/2$, la réponse du capteur est linéaire. La différence entre les résultats expérimentaux et théoriques est due à l'incertitude sur la distance inter-armature et l'épaisseur de la plaque. Par conséquent, les capteurs fabriqués présentent une sensibilité et une non-linéarité inférieures comparés aux performances théoriques, comme l'indique le tableau 12.

S étant la sensibilité et NL la non-linéarité, on les définit comme suit :

$$S = \frac{dC}{dP} \quad (51)$$

$$NL = 100 \times \frac{\tilde{C}(P) - C_L(P)}{R.P.E} \quad (52)$$

Avec : $\tilde{C}(P)$ le polynôme de régression sur les points de mesure, et $C_L(P)$ la droite des moindres carrées de ces mêmes points. R.P.E désigne la réponse pleine échelle.

	P/Pmax (%)	[0 -20]	[20 -40]	[40 -60]	[60 -80]	[80 -100]
Modèle théorique	Sensibilité (pF/hPa)	0.99×10^{-1}	1.20×10^{-1}	1.88×10^{-1}	3.10×10^{-1}	7.53×10^{-1}
	Non-linearité (%)	10.75	4.01	10.66	8.17	22.55
Modèle fabriqué	Sensibilité (pF/hPa)	0.99×10^{-1}	0.90×10^{-1}	1.02×10^{-1}	2.30×10^{-1}	5.36×10^{-1}
	Non-linearité (%)	12.7	5.22	9.67	9.93	17.84

Tableau 12 : Comparaison des performances (sensibilité et non-linéarité) du modèle théorique et du capteur fabriqué.

3.4. Utilisation du capteur réalisé dans une chaîne ExAO

3.4.1. Conditionnement du signal

Pour mesurer la pression à l'aide du capteur capacitif fabriqué, nous devons d'abord construire un circuit pour lire la variation de la capacité. Dans la littérature, la variation de capacité est convertie en tension ou en fréquence. Dans le premier cas, le condensateur fait partie d'un pont d'impédance et la tension de sortie est proportionnelle à C [156-160]. Dans le second cas, le condensateur fait généralement partie d'un oscillateur dont la fréquence est proportionnelle à $1/C_n$ ($n = 1$ ou $1/2$) [161-164].

Dans notre cas, nous avons adopté la première méthode, et le circuit réalisé est présenté sur la Figure 78. L'amplificateur utilisé pour construire le circuit est un TL074 avec entrées JFET. L'amplificateur IC1A et IC1B est utilisé pour construire le diviseur de pont capacitif.

La fonction de transfert de sortie de IC1A s'écrit :

$$\left| \frac{V_{S1}}{V_E} \right| = \frac{2\pi fRC}{\sqrt{1 + (2\pi fR)^2 (C + C_{REF})}} \quad (53)$$

Si: $(2\pi fR)^2 (C + C_{REF}) \gg 1$, nous obtenons :

$$\left| \frac{V_{S1}}{V_E} \right| = \frac{C}{C + C_{REF}} \quad (54)$$

Pour satisfaire cette condition, nous avons fixé, $f = 100$ kHz et $R_C = 1$ M Ω .

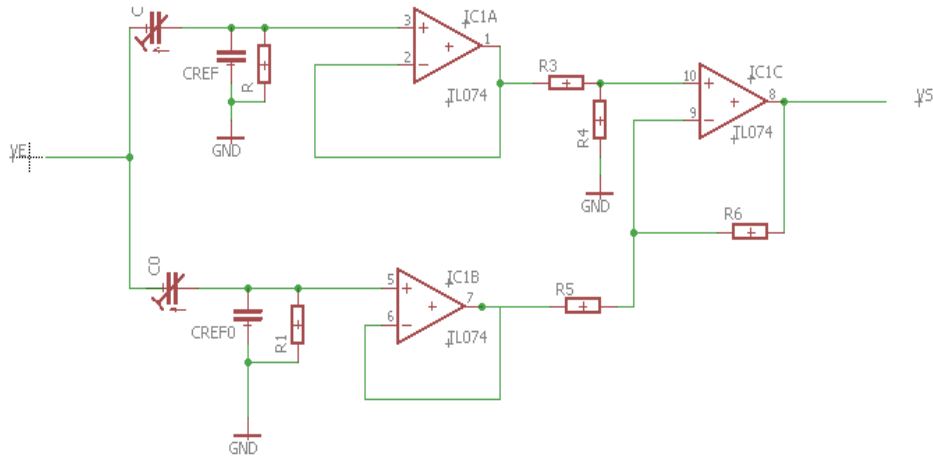


Figure 78 : Circuit de conditionnement pour le capteur fabriqué. Le capteur est modélisé avec une capacité variable (Csensor).

De même pour IC1B:

$$\left| \frac{V_{S2}}{V_E} \right| = \frac{C_0}{C_0 + C_{REF}} \quad (55)$$

C, C₀ : Capteur de pression;

C_{REF}, C_{REF0} : capacités d'entrée;

R, R1 : résistances de charge;

V_E : tension d'entrée ;

V_S : tension de sortie.

3.4.2. Intégration du capteur dans une chaîne ExAO

L'utilisation en ExAO du capteur de pression pour mesurer le volume est une technique que nous utilisons par exemple dans les expériences de pH-métrie et de conductivité. Cette méthode permet de mesurer le volume ajouté en temps réel, ce qui réduit le temps de l'expérience comme nous l'avons présenté dans le chapitre 2.

Pour réaliser cette expérience, nous utiliserons le capteur de pression fabriqué, la carte MicroLabExAO, le logiciel d'acquisition et de pilotage et un cylindre gradué de 0 à 50 mm.

Nous avons tous d'abord effectué un étalonnage (tension, volume), après avoir activé la fonction d'étalonnage, nous avons vidé le cylindre de test et nous avons utilisé le «vumètre» du logiciel d'acquisition pour afficher le volume d'eau ajouté au cylindre de test, voir figure 79.



Figure 79 : Calcul de volume d'eau avec le capteur fabriqué [160], [161].

4. Fabrication d'un capteur de pression à C_0 variable

Afin d'améliorer les performances du capteur fabriqué, nous avons choisi de réaliser la structure proposée par Ettouhami et al. [151]. Ce choix se justifie par le fait que cette structure permet d'améliorer les performances de la structure classique tout en gardant la membrane plate ce qui permet sur le plan fonctionnel d'améliorer la linéarité du capteur sans détériorer sa sensibilité et sur le plan de la réalisation, la métallisation d'une membrane plate est plus aisée. Cette structure sera réalisée pratiquement pour la première fois, ce qui permettra de la tester dans le cas des grandes déflexions.

4.1. Détermination des caractéristiques du capteur : structure à C_0 variable

Nous rappelons que cette structure est composée de deux cellules, une de référence (C_0) et l'autre variable (C). La capacité de référence varie en réponse à la pression, mais dans le sens inverse de C . La 1^{ère} cellule aura les mêmes caractéristiques que le capteur à structure classique dimensionné dans la section précédente.

Le rôle de la deuxième chambre étant de réduire la non-linéarité du capteur et d'augmenter sa sensibilité, nous avons gardé les mêmes valeurs de h et R et nous avons simulé le comportement de la chambre pour différentes valeurs de distance inter-armatures. Cette simulation nous permet de déterminer la valeur de d_i , la distance inter-armature qui nous permettra d'améliorer au mieux ces deux critères.

La figure 80 représente la réponse du capteur, pour différentes valeurs de « d_i » allant de 25 μm à 150 μm . Cette figure montre que pour $d_i = 25 \mu\text{m}$ et $d_i = 50 \mu\text{m}$, la non linéarité dans la zone [0,2000] Pa se dégrade, suite à la non linéarité de la 2^{ème} chambre dans cet intervalle.

La comparaison des performances en termes de linéarité et de sensibilité, a montré que la valeur optimale de « d_i » est de 75 μm .

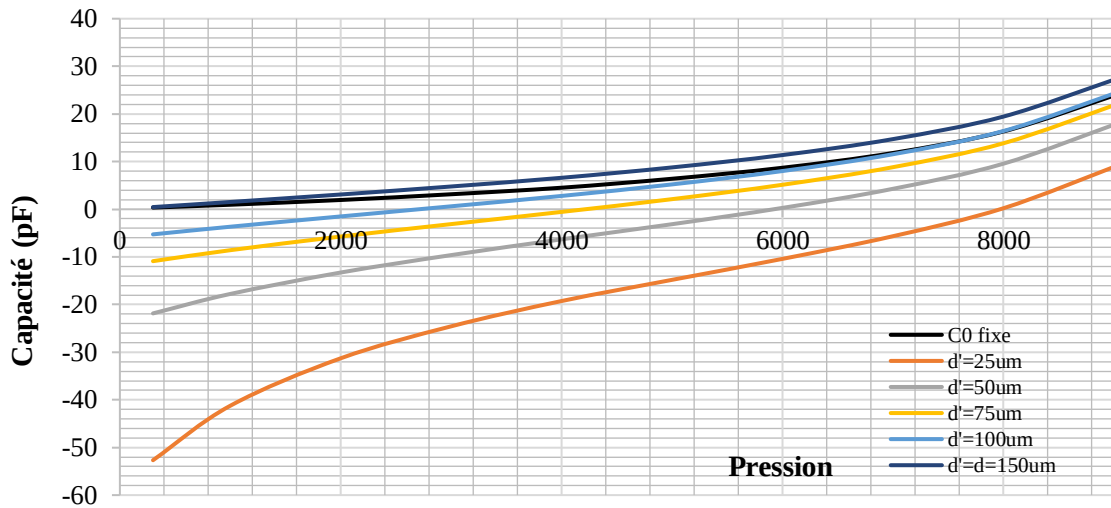


Figure 80 : Simulation de la réponse du capteur de pression à C_0 variable, pour différentes valeurs de « di » [160], [161].

La figure 81, montre les résultats obtenus à température ambiante. La réponse du capteur obtenue par simulation a été comparée à celle obtenue expérimentalement.

La différence entre les résultats expérimentaux et théoriques est aussi due à l'incertitude sur la distance inter-armature et l'épaisseur de la plaque. Par conséquent, le capteur fabriqué présente une sensibilité et une non-linéarité inférieures comparés aux performances théoriques, comme l'indique le tableau 13.

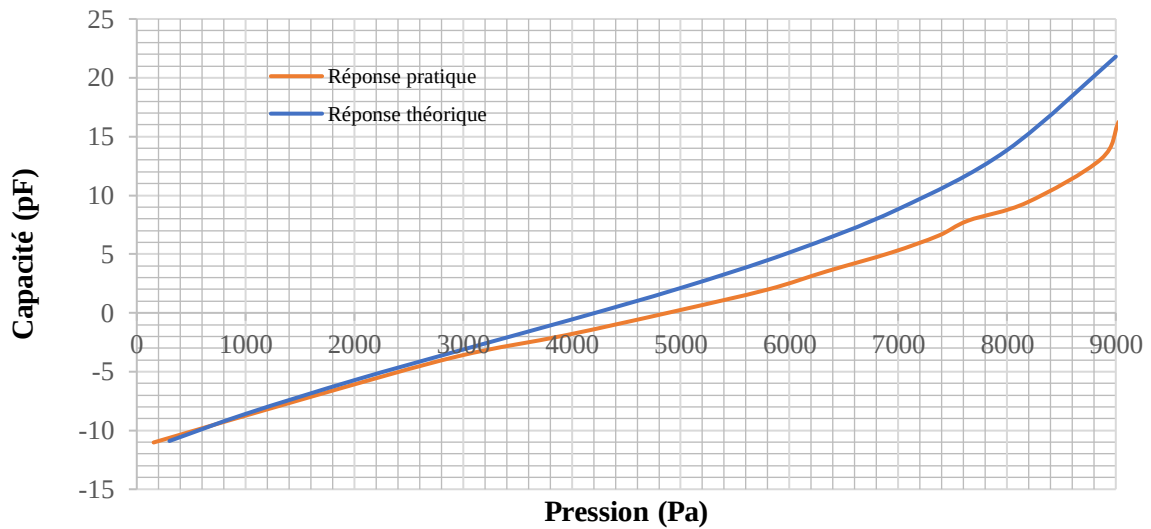


Figure 81 : Réponse à température ambiante du capteur ayant C_0 variable imprimé en 3D [160], [161].

	P/Pmax (%)	[0 -20]	[20 -40]	[40 -60]	[60 -80]	[80 -100]
Modèle théorique	Sensibilité (pF/hPa)	3.4×10^{-1}	2.61×10^{-1}	2.68×10^{-1}	3.69×10^{-1}	7.96×10^{-1}
	Non-linearité (%)	3.78	2.09	5.32	5.73	13.00
Modèle fabriqué	Sensibilité (pF/hPa)	3.20×10^{-1}	2.55×10^{-1}	2.03×10^{-1}	2.77×10^{-1}	5.43×10^{-1}
	Non-linearité (%)	2.67	1.97	3.8	5.32	4.25

Tableau 13 : Comparaison des performances théoriques et pratiques du capteur ayant C_0 .

La comparaison entre les performances théoriques des deux modèles (classique et celui à C_0 variable) présentée sur le tableau 14, montre que la sensibilité ainsi que la non-linéarité du capteur ont bien été améliorée, avec l'utilisation du modèle proposé. Cependant, la linéarité du capteur dans l'intervalle [80,100]% reste importante, à cause de la contribution importante de la partie centrale de la membrane mobile, par rapport à la contribution des bords.

	P/Pmax (%)	[0 -20]	[20 -40]	[40 -60]	[60 -80]	[80 -100]
Sensibilité (pF/hPa)	Modèle classique	9.98×10^{-2}	1.20×10^{-1}	1.88×10^{-1}	3.10×10^{-1}	7.53×10^{-1}
	Modèle à C_0 variable	3.4×10^{-1}	2.61×10^{-1}	2.68×10^{-1}	3.69×10^{-1}	7.96×10^{-1}
Non-linearité (% R.P.E)	Modèle classique	10.75	4.01	10.66	8.17	22.55
	Modèle à C_0 variable	3.78	2.09	5.32	5.73	13.00

Tableau 14 : Évolution de la sensibilité et la non-linéarité en fonction de la plage de mesure de pression considérée (modèles théoriques).

La figure 82, montre les résultats obtenus à température ambiante, avec les deux capteurs de pression fabriqués. On voit bien sur cette figure, que le modèle proposé améliore considérablement la linéarité du capteur. Cependant, la linéarité dans l'intervalle [8,9] kPa reste importante.

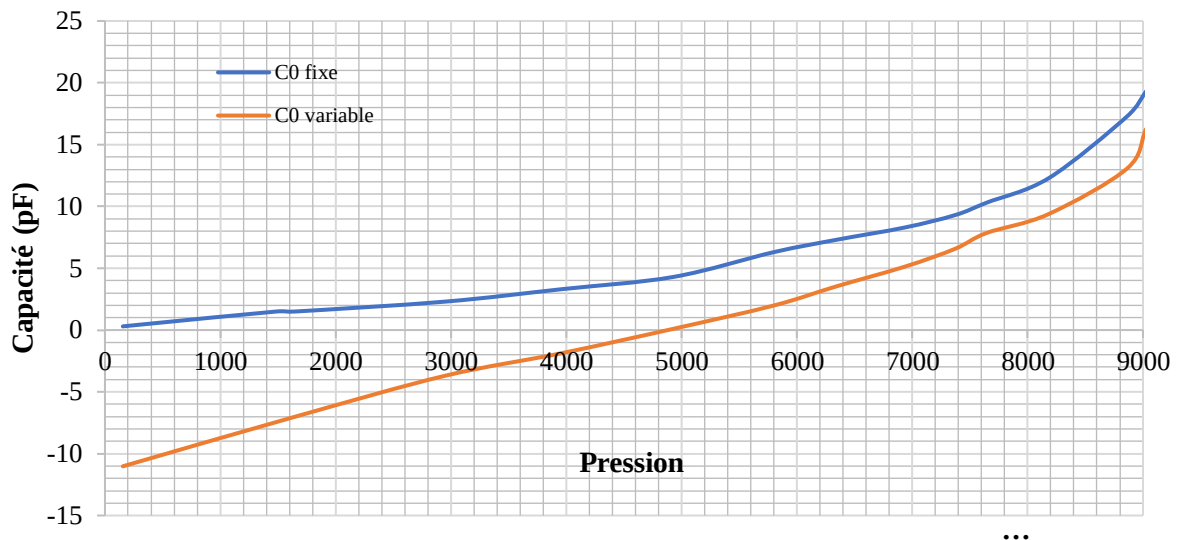


Figure 82 : Les réponses obtenues des capteurs capacitifs imprimés en 3D à température ambiante. La courbe bleue correspond à la réponse du capteur avec C_0 fixe et la courbe orange correspond aux résultats pratiques du capteur avec C_0 variable.

5. Proposition d'un nouveau modèle

Pour mettre en évidence l'influence de la distance inter-armature d sur les performances des capteurs capacitifs à membrane, nous présentons sur la figure 83 les réponses de trois capteurs ayant une distance inter-armature d variable entre $150\ \mu\text{m}$ et $200\ \mu\text{m}$. La comparaison entre les réponses de ces trois capteurs, montre que la distance inter-armature affecte le comportement non linéaire du capteur. En effet, lorsque la pression est proche de la pression maximale, le déplacement au centre de la membrane mobile se rapproche de la distance d , ce qui augmente la non-linéarité. Lorsqu'on augmente d , pour réduire la non-linéarité du capteur, ceci affecte la sensibilité du capteur. Nous reportons dans le tableau 15 les données relatives à la sensibilité et la non-linéarité des courbes de la figure 83.

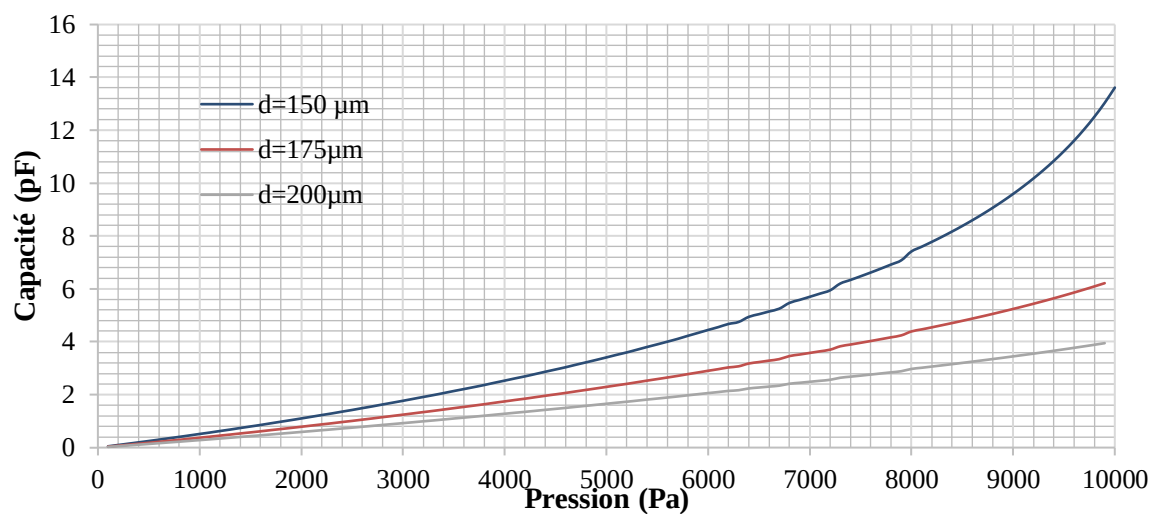


Figure 83 : Réponse (capacité, pression) de capteurs de pression pour différentes valeurs de distance inter-armature d .

	$\frac{P-P_{Max}}{d} \%$	[0 - 20]	[20 - 40]	[40 - 60]	[60 - 80]	[80 - 100]
Sensibilité(pF/hPa)	150 μm	0.99×10^{-1}	1.20×10^{-1}	1.88×10^{-1}	3.10×10^{-1}	7.53×10^{-1}
	175μm	0.36×10^{-1}	0.45×10^{-1}	0.54×10^{-1}	0.68×10^{-1}	0.88×10^{-1}
	200μm	0.28×10^{-1}	0.34×10^{-1}	0.39×10^{-1}	0.43×10^{-1}	0.54×10^{-1}
Non-linearité (%)	150 μm	10.75	4.01	10.66	8.17	22.55
	175μm	3.03	0.44	1.55	1.04	1.56
	200μm	1.61	2.27	1.07	0.54	1.36

Tableau 15 : Comparaison des performances de la structure classique pour différentes valeurs de la distance inter-armature (d).

Pour améliorer les performances de notre capteur de pression, nous proposons une nouvelle structure basée sur deux principes : le premier étant de garder la membrane mobile plate afin d'augmenter la sensibilité du capteur, et le deuxième de changer le design de la membrane fixe de telle sorte que la distance « d » entre-armatures soit non uniforme.

5.1. Réduction de la non-linéarité

Lorsque la pression dépasse une certaine valeur, la non-linéarité est principalement due à la contribution importante de la région centrale $[0, R/n]$ de la membrane par rapport à ces bords (voir figure 84). Si on réécrit la capacité totale du capteur (2) sous la forme de la somme des capacités de deux régions principales (centre et bords), on obtient :

$$C - C_0 = (C_1 + C_2) - C_0 \quad (56)$$

$$C - C_0 = 2\pi \int_0^{\frac{R}{n}} \frac{\epsilon r dr}{d - \omega(r, \theta, P)} - 2\pi \int_{\frac{R}{n}}^R \left(\frac{\epsilon r dr}{d + \omega(r, \theta, P)} \right) - \frac{\epsilon S}{d} \quad (57)$$

Où n est un nombre réel supérieur à 1 définissant la taille de la première région par rapport à la deuxième. Sur la figure 84 les deux capacités C_1 et C_2 sont représentées.

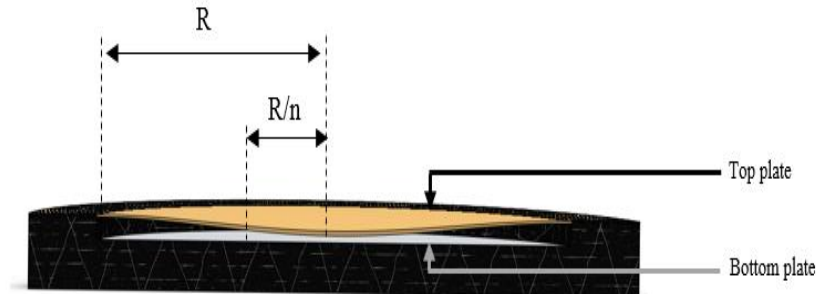


Figure 84 : Schéma de coupe d'un capteur de pression, montrant la grande contribution de la région $[0, R/n]$ par rapport aux bords de la membrane

La non-linéarité du capteur est la somme des non-linéarités de C_1 et C_2 qui est principalement causée par celle de la région $[0, R/n]$. Pour réduire au maximum la non-linéarité du capteur, nous choisissons d'annuler la capacité C_1 . Pour cela, nous utilisons un matériau non conducteur dans cette zone au niveau de la membrane fixe.

La figure 85 présente la réponse de capteurs capacitifs ayant une zone $[0, R/n]$ non conductrice pour différente valeur de n .

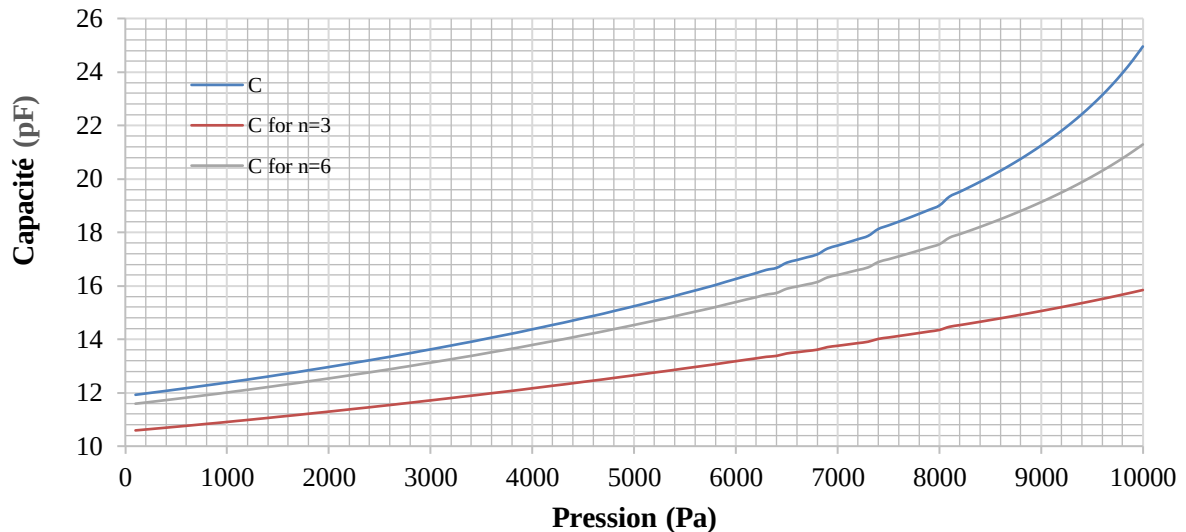


Figure 85 : Réponse de Capteurs de pression capacitifs ayant une zone $[0, R/n]$ non conductrice

5.2. Augmentation de la sensibilité

Le fait d'annuler la capacité de la zone $[0, R/n]$, améliore la non-linéarité, mais réduit considérablement la sensibilité du capteur. Pour remédier à cela, nous agissons sur la distance inter-armatures de sorte à favoriser la contribution de la zone $[n/R, R]$.

La figure 86, montre que la nouvelle forme de la membrane fixe, imite la forme de la membrane mobile après déformation.

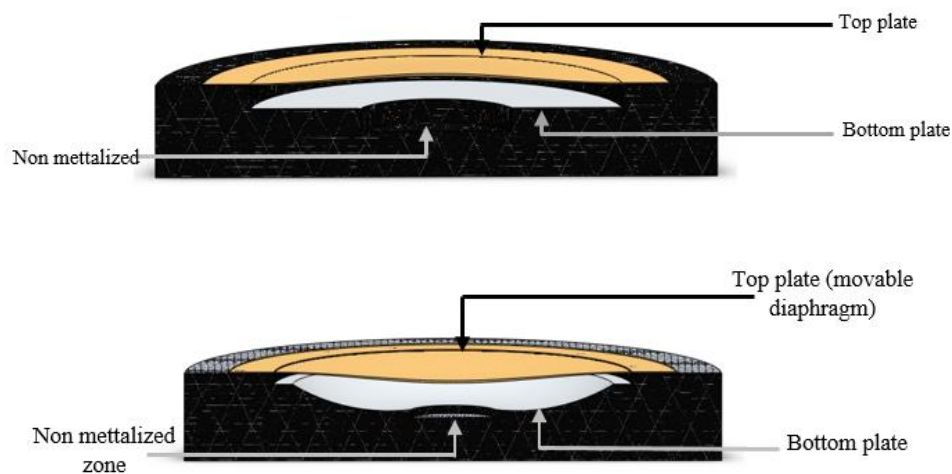


Figure 86 : Présentation en coupe du capteur : en haut, Présentation de la structure classique avec la zone $[0, R/n]$ non métallisé. En bas, la nouvelle forme de capteur : en gris métallisation en aluminium et en doré métallisation en Or.

5.3. Calcul de la capacité de la nouvelle structure

Pour calculer la capacité C du nouveau design, nous devons trouver l'expression de la distance inter-armatures en fonction de r , la distance radiale entre l'emplacement où la déflexion est évaluée et le centre de la membrane.

D'après la figure 87, nous avons :

$$\tan(\alpha) = \frac{r}{R_c - d} \quad (58)$$

Avec R_c le rayon du cercle à laquelle appartient l'arc formant la membrane fixe et d la distance inter-électrodes à $r = 0$.

Nous avons d'après la figure 87-b :

$$\cos(\alpha) = \frac{R_c}{R_c + y} \quad (59)$$

et :

$$R_c \square \frac{R^2}{2(d - d_r)} \quad (60)$$

Où y est l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont la hauteur est égale à d et ayant un angle égal à α formé en prolongeant R_c et une ligne parallèle au rayon passant par $r = 0$.

D'après la figure 87-c, nous avons :

$$\cos(\alpha) = \frac{d - d_r}{y} \quad (61)$$

Avec d_r la distance inter-électrode à r .

On déduit des trois équations précédentes que :

$$d_r = d - R_c \times \left(1 - \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{r}{R_c - d} \right) \right) \right) \quad (62)$$

On écrit alors :

$$C - C_0 = 2\pi \int_{\frac{R}{n}}^R \frac{\epsilon r}{d_r - \omega(r, \theta, P)} dr - \frac{\epsilon S}{d} \quad (63)$$

$$C - C_0 = 2\pi \int_{\frac{R}{n}}^R \frac{\epsilon r}{d - R_c \times \left(1 - \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{r}{R_c - d} \right) \right) \right) - \omega(r, \theta, P)} dr - \frac{\epsilon S}{d} \quad (64)$$

5.4. Simulation

5.4.1. Programme de simulation

Pour déterminer les paramètres du design (n,d), permettant d'atteindre le meilleur compromis (linéarité, sensibilité), nous avons réalisé une application de simulation. Cette application permet de tracer les courbes (Capacité, Pression) pour différentes valeurs de n et d.

L'algorithme de notre application est donné sur la figure 88. Dans un premier temps, l'utilisateur fournit les données d'entrée relatives aux dimensions de la membrane et la distance inter-armature, puis un fichier contenant la déflexion du centre de la membrane en fonction de la pression appliquée, et enfin la résolution du process utilisé notée p_r .

Le programme fixe une valeur de n, et trace la courbe (pression capacité) en se basant sur l'équation déterminée dans la section précédente. Ceci est fait pour chaque valeur de d allant de W_{0max} à deux fois W_{0max} , avec un pas d'incrément égal à la résolution du process utilisé.

L'utilisateur choisit par la suite le couple (n, d) optimal, en se basant sur les performances (linéarité, sensibilité) fournis par l'application (figure 89).

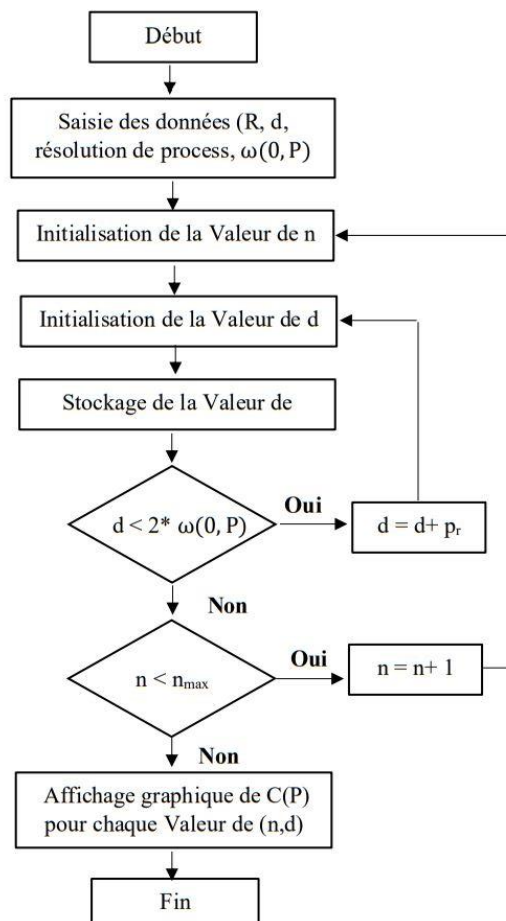


Figure 88 : Algorithme de l'application permettant de déterminer les paramètres (n e d) optimaux de la nouvelle structure.

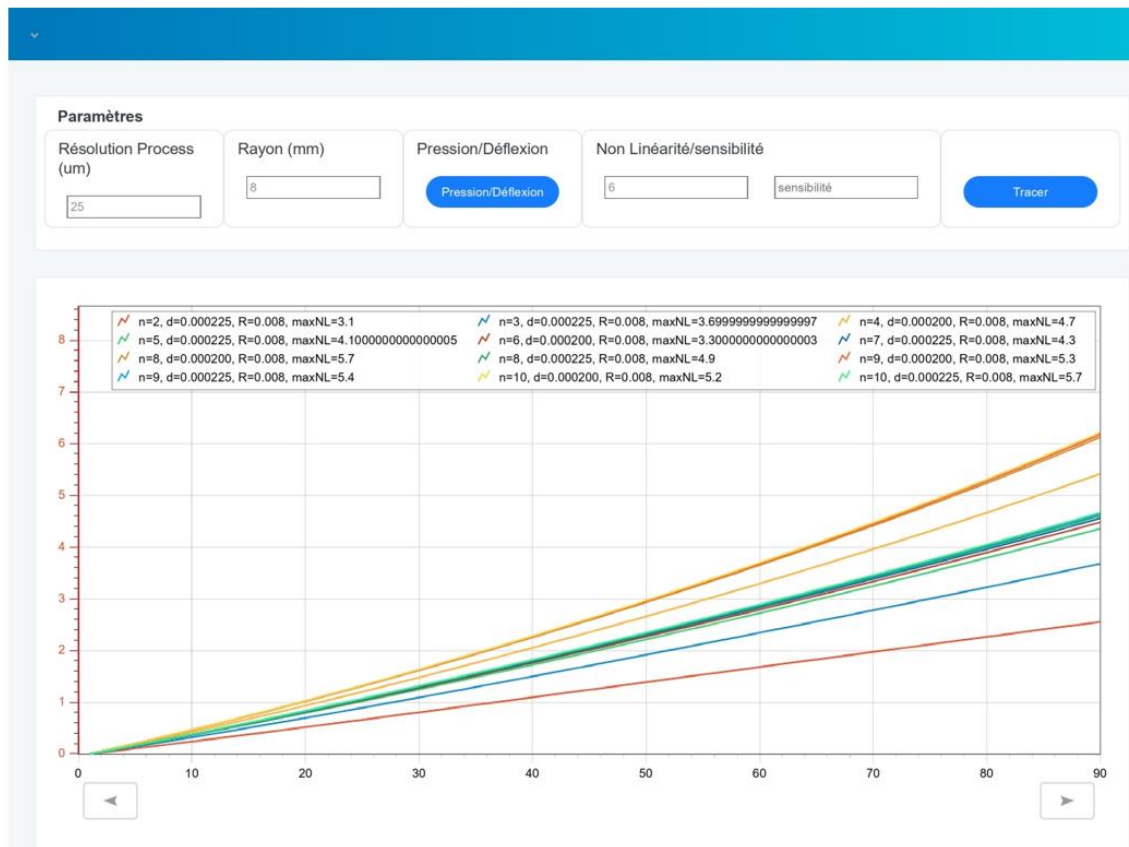


Figure 89 : Image de l'interface graphique de l'application dédiée à la détermination des paramètres (n et d) optimaux.

5.4.2. Résultats de la simulation

La réponse du capteur modifié sous pression dans la gamme [0-9] kPa a été simulée avec l'application réalisée pour différentes valeurs de n et d. Nous constatons que la meilleure performance est obtenue pour $n = 6$ et $d = 200 \mu\text{m}$.

Une comparaison des performances entre la nouvelle conception et la conception classique a été effectuée. Les résultats montrent que la nouvelle structure offre un meilleur compromis entre non-linéarité et sensibilité, et qu'elle nous permet d'améliorer la sensibilité du capteur dans la zone de faible déflexion par rapport à la structure classique. Nos résultats confortent notre approche contrairement à la structure basée sur des bords ondulés où l'amélioration de la linéarité entraîne une augmentation concomitante de la pression nécessaire pour obtenir une déflexion équivalente dans un diaphragme plat [170]. De plus, le tableau 16 et la figure 90 montre clairement l'amélioration de la linéarité de la réponse du capteur lorsque d est non uniforme par rapport aux cas où la distance est fixe. En effet, la non-linéarité s'améliore de 56% sur toute la gamme étudiée lorsque la distance de séparation des plaques est égale à $150 \mu\text{m}$ et a même atteint 99% dans la gamme [80-100]% dans le cas d'une distance égale à $175 \mu\text{m}$. Quant à la sensibilité, une amélioration de 180% a été obtenue avec une distance de $175 \mu\text{m}$ et de 300% avec une distance égale à $200 \mu\text{m}$ sur toute la gamme de pression.

Même avec des résultats aussi encourageants, notre objectif d'obtenir une non-linéarité inférieure à 1% nous a poussé à étudier une structure qui prend en compte une capacité zéro

variable et une distance de séparation des plaques non uniforme comme décrit dans la section suivante.

	P/P_{Max}					
	Critère	[0 - 20]	[20 - 40]	[40 - 60]	[60 - 80]	[80 - 100]
Sensibilité (PF/hPa)	150 µm	0.99 x10 ⁻¹	1.20 x10 ⁻¹	1.88 x10 ⁻¹	3.10 x10 ⁻¹	7.53 x10 ⁻¹
	175µm	0.36 x10 ⁻¹	0.45 x10 ⁻¹	0.54 x10 ⁻¹	0.68 x10 ⁻¹	0.88 x10 ⁻¹
	200µm	0.28x10 ⁻¹	0.34 x10 ⁻¹	0.39 x10 ⁻¹	0.43 x10 ⁻¹	0.54 x10 ⁻¹
	C₀ variable	3.4 x10 ⁻¹	2.61 x10 ⁻¹	2.68 x10 ⁻¹	3.69 x10 ⁻¹	7.96 x10 ⁻¹
	d non uniforme	1.09 x10 ⁻¹	1.32 x10 ⁻¹	1.56 x10 ⁻¹	1.87 x10 ⁻¹	2.20 x10 ⁻¹
Non- linéarité (%)	150 µm	10.75	4.01	10.66	8.17	22.55
	175µm	3.03	0.44	1.55	1.04	1.56
	200µm	1.61	2.27	1.07	0.54	1.36
	C₀ variable	3.78	2.09	5.32	5.73	13.00
	d non uniforme	3.26	2.99	5.94	4.83	0.01

Tableau 16 : Comparaison de performances du nouveau modèle, avec ceux de la forme classique.

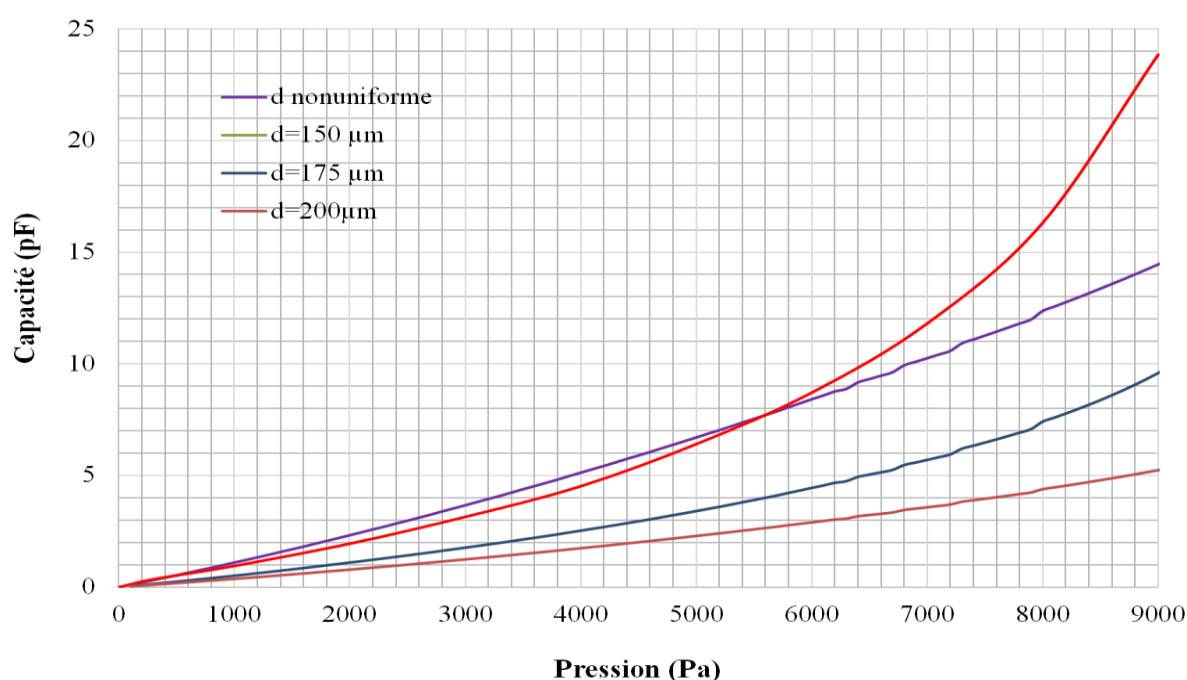


Figure 90 : Réponse de la nouvelle forme comparée aux formes classiques pour différentes valeurs de d.

5.5. Amélioration de la structure proposée

La figure 91 présente l'amélioration apportée à la nouvelle structure poposée. Le capteur se compose de deux cellules, la première présente C et a une distance de séparation inter-armatures

non uniforme, la 2^{ième} est la capacité C_0 variable elle aussi en fonction de la pression appliquée mais dans le sens contraire de C .

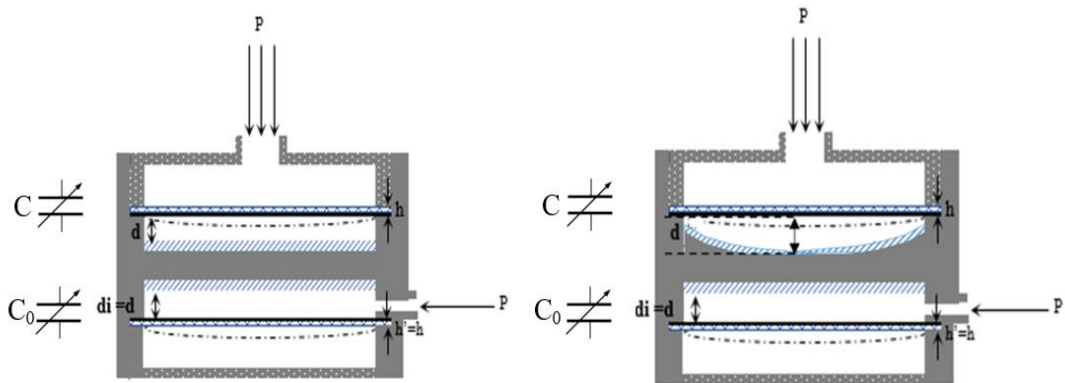


Figure 91 : Structure capacitive ayant C_0 variable en fonction de la pression appliquée. À gauche la structure proposée par [151], à droite la nouvelle structure proposée.

La figure 92 présente une comparaison des performances des structures étudiées selon deux critères :

- La capacité au repos C_0 fixe ou variable,
- La distance inter-électrodes d est uniforme ou non-uniforme.

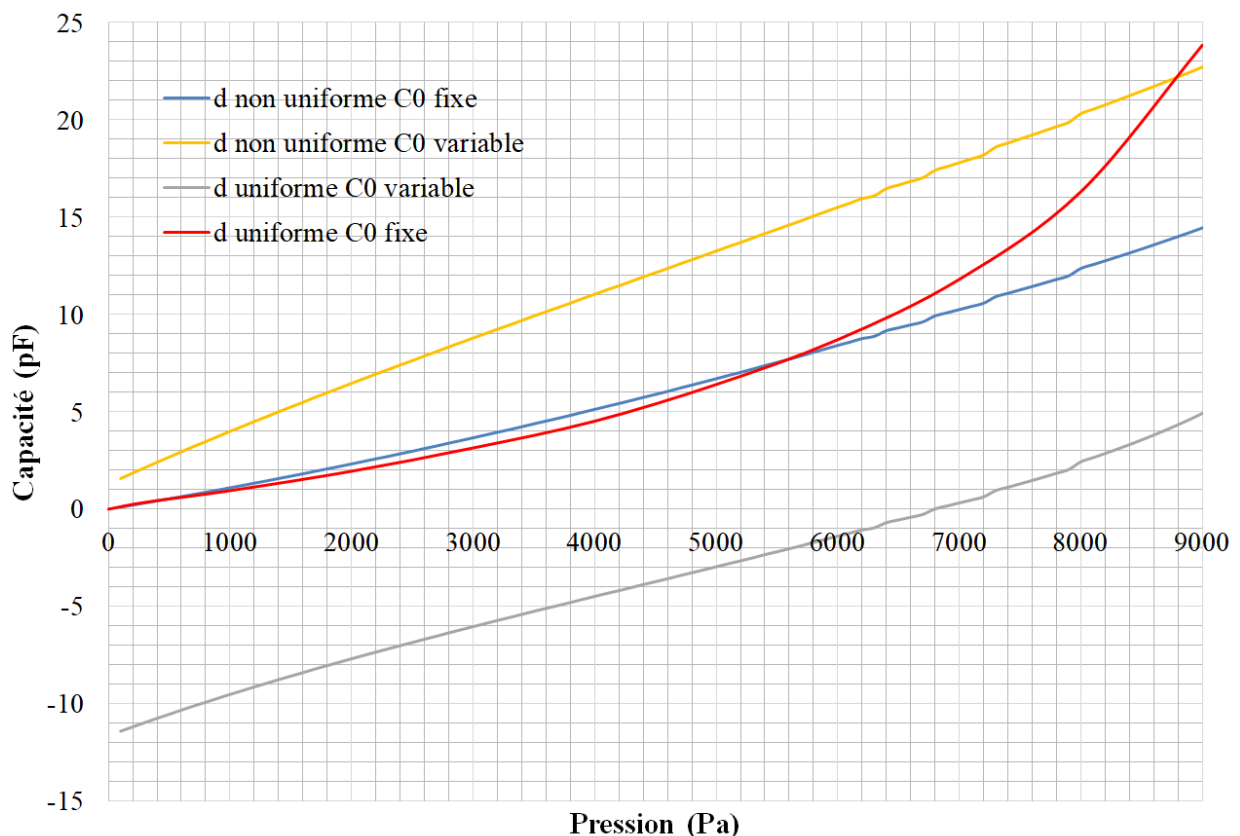


Figure 92 : Réponse des modèles : classique, à d non-uniforme, à C_0 variable et le modèle à d non-uniforme et C_0 variable.

La comparaison présentée sur le tableau 17, montre que du point de vue sensibilité, les structures à C_0 variable ont une sensibilité supérieure aux structures à C_0 fixe et, qu'en termes

de non-linéarité, les structures à d non-uniforme restent meilleures par rapport aux structures à d uniforme.

La comparaison montre également que la structure où C_0 est variable et d non-uniforme, permet d'atteindre une non-linéarité inférieure à 1% sur tout l'intervalle de pression étudié tout en gardant une sensibilité élevée.

Critère P/P_{Ma}		[0 - 20]	[20 - 40]	[40 - 60]	[60 - 80]	[80 - 100]
Sensibilité (PF/hPa)	150 μm	0.99×10^{-1}	1.20×10^{-1}	1.88×10^{-1}	3.10×10^{-1}	7.53×10^{-1}
	200 μm	0.28×10^{-1}	0.34×10^{-1}	0.39×10^{-1}	0.43×10^{-1}	0.54×10^{-1}
	C_0 variable	3.4×10^{-1}	2.61×10^{-1}	2.68×10^{-1}	3.69×10^{-1}	7.96×10^{-1}
	d non uniforme	1.09×10^{-1}	1.32×10^{-1}	1.56×10^{-1}	1.87×10^{-1}	2.20×10^{-1}
	d non uniforme et C_0 variable	2.24×10^{-1}	2.24×10^{-1}	2.23×10^{-1}	2.23×10^{-1}	2.24×10^{-1}
Non- linéarité (%)	150 μm	10.75	4.01	10.66	8.17	22.55
	200 μm	1.61	2.27	1.07	0.54	1.36
	C_0 variable	3.78	2.09	5.32	5.73	13.00
	d non uniforme	3.26	2.99	5.94	4.83	0.01
	d non uniforme et C_0 variable	0.81	0.10	0.14	0.60	0.51

Tableau 17 : Comparaison de performances des modèles : classique, à d non-uniforme, à C_0 variable et le modèle à d non-uniforme et C_0 variable.

5.6. Prototypes réalisés

Pour vérifier la faisabilité de la structure proposée, le capteur de pression capacitif a été fabriqué à l'aide de la technologie d'impression 3D et de processus d'usinage. En effet, la partie mobile du capteur est celle réalisée pour fabriquer la structure classique, seule la partie de la membrane fixe est modifiée. Cette partie est dessinée avec le logiciel Solidworks et est réalisé par processus d'usinage avec une résolution de 1 μm .

Trois membranes fixes, ayant différentes tailles de la zone non métallisée $n = \{4, 6 \text{ et } 8\}$ ont été réalisées en acier inoxydable. Pour créer une connexion électrique au capteur, des fils de cuivre ont été fixés aux plaques du capteur à l'aide d'époxy argenté. Le capteur capacitif fabriqué est illustré sur la Figure 93.

La figure 94 montre la réponse des capteurs réalisés, et la figure 95 montre les résultats obtenus à température ambiante par rapport à la réponse théorique pour n égal 6. La différence entre les résultats expérimentaux et théoriques est principalement due à l'incertitude de la distance de zéro pression et de l'épaisseur de la plaque.



Figure 93 : Image du capteur réalisé. La partie bleue constitue la partie mobile du capteur, la partie réalisée en métal constitue la partie fixe avec d non uniforme.

Le capteur fabriqué ($n = 6$) a une sensibilité maximale de 1.25×10^{-1} pF/hPa et une non-linéarité maximale égale à 5.2%.

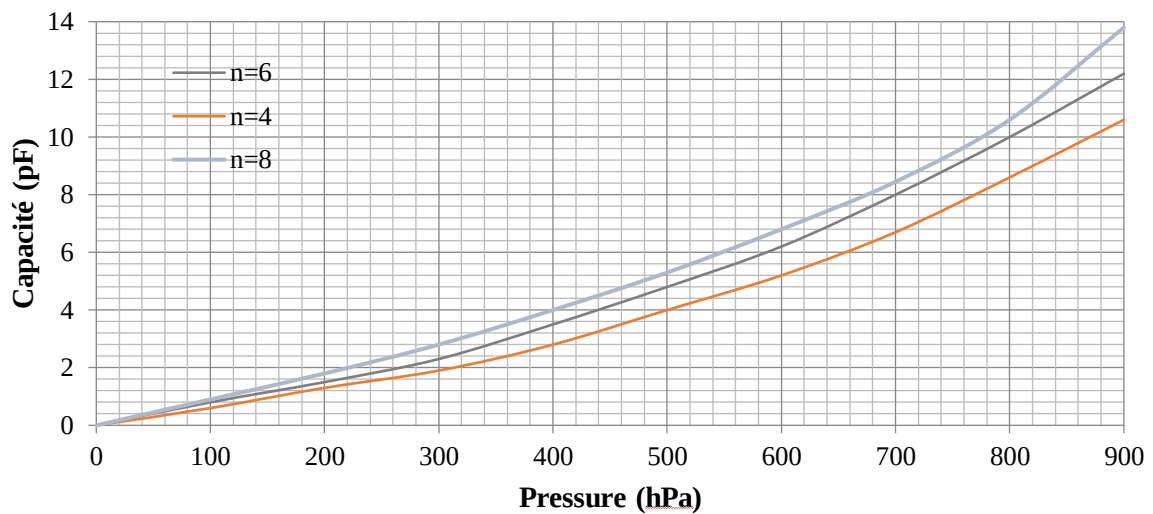


Figure 94 : Comparaison entre la réponse des capteurs fabriqués, $n = 4$ (courbe orange), $n = 6$ (courbe grise) et $n = 8$ (courbe bleue).

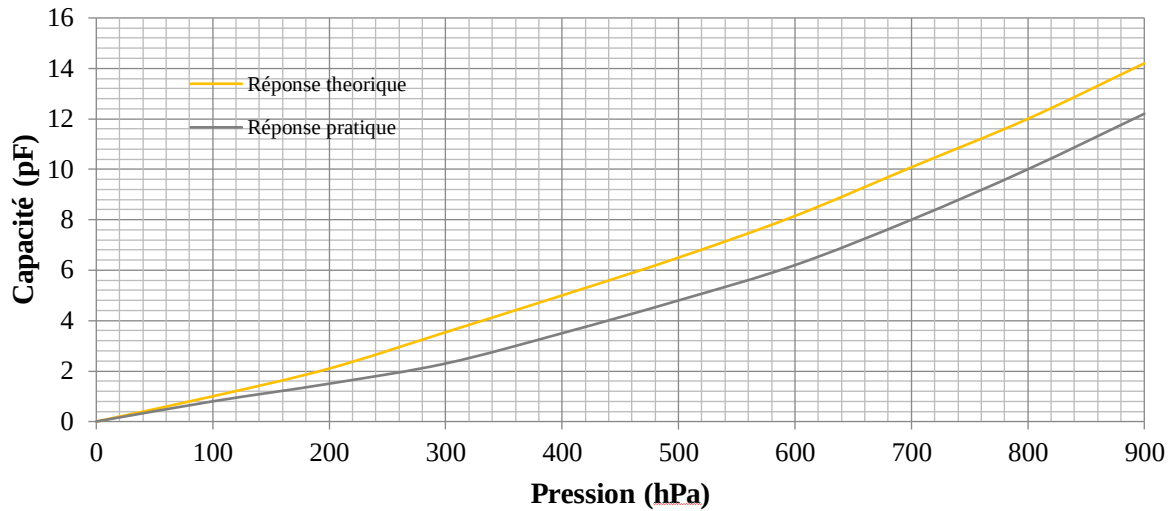


Figure 95 : Comparaison entre la réponse théorique (courbe jaune) et pratique (courbe grise) du capteur réalisé n=6.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les structures de capteurs de pression que nous avons réalisé en impression 3D et leurs performances.

Nous avons, à l'issue des résultats obtenus en réalisant des structures déjà proposées dans la littérature, proposé une nouvelle structure pour atteindre une non-linéarité inférieure à 1%.

La nouvelle structure proposée est composée de deux cellules. Et est basée sur deux principes, le premier est que, les deux capacités de la structure varient en fonction de la pression appliquée, le deuxième est que la distance inter-armatures de la cellule principale est non uniforme. Cette structure permet d'augmenter la contribution des bords de la membrane, augmentant ainsi la sensibilité du capteur. Les résultats obtenus ont révélé une non-linéarité inférieure à 1%, même dans le cas de grandes déflexions, tout en maintenant une sensibilité élevée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de thèse, fait partie du projet de développement soutenu par le ministère de tutelle (PPR2 : PPR2/2016/81). Nous nous sommes intéressés à la mise en place de solutions ExAO pour la réalisation de travaux pratiques. Les résultats obtenus sont partagés à l'échelle nationale, et plusieurs universités (UMV, UMP, UIZ...) commencent à implémenter ces solutions dans leurs laboratoires soit pour des travaux pratiques soit pour des travaux de recherche.

Une chaîne d'acquisition ExAO est constituée de plusieurs parties : l'équipement essentiel à l'expérimentation (burettes, animaux de laboratoires, générateurs de tension, plantes, ...), les capteurs et leur circuit de conditionnement, la carte d'acquisition et le logiciel qui pilote l'ensemble de la chaîne. Tout au long de ce projet, nous sommes intervenus au niveau de chaque maillon pour apporter notre valeur ajoutée et pouvoir profiter pleinement des avantages de cette technologie.

Comme point de départ, la carte d'acquisition que nous avons adoptée est la carte MicroLabExAO développée par le Pr. P. Nonnon au sein du Laboratoire de Robotique Pédagogique de l'Université de Montréal.

Nous avons dans un premier temps, travaillé sur le maillon du « circuit de conditionnement ».

En effet, après l'analyse des besoins exprimés par les professeurs, nous identifions les capteurs nécessaires aux expérimentations en fonction des variables à étudier. Dans un second temps nous adaptons le montage au circuit de conditionnement pour utiliser le capteur de façon optimale.

L'incertitude des circuits réalisés atteint 0.1%. La réduction de coût, est un des objectifs de ce projet : si nous prenons le cas des capteurs pH-mètres et Oxygène dissout le coût est divisé par trois fois. Si on prend en compte le nombre de postes à équiper, ces circuits nous permettent d'acquérir un nombre largement plus grand en comparaison avec les solutions actuellement disponibles sur le marché, tout en ayant une qualité comparable.

Dans certains cas, aucun capteur n'est disponible sur le marché pour répondre aux besoins exprimés. Pour cela nous avons fait appel à la technologie d'impression 3D pour en fabriquer.

Ainsi, nous sommes intervenus sur le maillon « capteur ». L'exemple le plus concret, est le capteur de petits mouvements. En effet, la majorité des TP's en physiologie animale sont traditionnellement réalisés avec un mécanisme mécanique dotée d'un stylet qui inscrit le mouvement de muscle sur un papier enfumé enroulé autour d'un cylindre en rotation. En plus de son coût élevé, ce système présente plusieurs inconvénients à savoir : i) problèmes de réglage initial du système afin de réduire les frottements du stylet sur le cylindre, ii) le système ne possède pas de moyen pour amplifier le signal résultant des mouvements de l'organe. La réalisation du capteur petit mouvement avec impression 3D, a permis aux étudiants de mieux comprendre les objectifs de TP's et de gagner du temps, puisqu'ils sont plus concentrés sur les objectifs du TP et non pas sur le réglage du système dédié à l'acquisition. Après avoir testé ce capteur durant 2 années consécutives, les TP's de physiologie animale de la Faculté des Sciences Rabat sont réalisés uniquement avec le capteur fabriqué. Les dessins 3D et schéma électronique

du nouveau système, étant disponible en libre utilisation, le personnel technique est capable de le réparer et de le reproduire avec un coût minimal.

Toujours sur le maillon « capteur » et après avoir réussi à mettre en œuvre le capteur de petit mouvement, nous nous sommes concentrés sur le capteur de pression : c'est un capteur largement utilisé dans toutes les disciplines et est relativement coûteux. Ainsi nous avons réalisé un capteur de pression capacitif en utilisant la technologie d'impression 3D disponible. Ce capteur est constitué de deux membranes : une première fixe et une seconde mobile. Lorsqu'une différence de pression est appliquée sur la membrane mobile, cette dernière fléchit ce qui induit une variation de capacité. La relation (capacité, pression) n'est pas linéaire. Cette non linéarité est accentuée dans le cas où le déplacement maximal de la membrane est proche de son épaisseur (cas de grandes déflexions). Ce cas d'étude est rarement étudié dans la littérature, vu que la technologie utilisée permet de réaliser des distances inter-armature très faible, ce qui est très délicat à réaliser en technologie d'impression 3D. Pour cela, nous avons tout d'abord étudié les designs disponibles en littérature, en vue d'améliorer les performances (linéarité et sensibilité) de ce type de capteur. Puis nous avons choisi de réaliser l'architecture proposée par Ettouhami et al [152] afin de la tester dans le cas des grandes déflexions. La réalisation pratique et les résultats de simulation ont montré que le design réalisé ne permet pas d'atteindre une non-linéarité inférieure à 1%. Nous avons alors proposé un nouveau design basé sur la modification de la structure de la membrane fixe contrairement aux travaux de recherche déjà faites sur ce sujet, où la modification concerne essentiellement la membrane mobile. Dans le design proposé, la distance inter-armature est non uniforme et le centre de la membrane mobile est non métallisé (ou percé pour le cas de capteur de pression relative). La taille de la zone non métallisée et la valeur de la distance inter-armature optimaux sont déterminés par une application de simulation réalisée pour cet objectif. Les résultats obtenus montrent qu'une non-linéarité inférieure à 1% est obtenue avec ce nouveau design dans le cas où sa capacité au repos est inversement sensible à la pression appliquée.

Dans un dernier temps, nous sommes intervenus au niveau du maillon « carte d'acquisition ».

Nous avons tout d'abord modifié la connectique d'entrée de la carte MicroLabExAO, avec une connectique composée de quatre connecteurs USB.3. Ensuite, nous avons réalisé une carte collègue constituée de deux entrées uniquement et qui sera dédiée aux travaux pratiques au niveau du lycée et collège.

Le besoin d'une carte ayant des performances plus avancées s'est avéré primordiale, pour des travaux pratiques et/ou des travaux de recherche plus avancés. Pour cela, nous avons concentré notre recherche sur le développement d'une nouvelle interface basée sur un microcontrôleur de dernière génération.

Nous avons comparé les performances des microcontrôleurs utilisés dans les différentes interfaces, et nous avons particulièrement présenté les résultats des premiers tests effectués avec l'interface « recherche ». En effet cette interface permet de traiter des signaux dont la fréquence atteint les 2 MHz, soit une fréquence 1000 fois plus grande que la fréquence maximale du signal qu'on peut acquérir avec les interfaces d'origine Collège et Université.

Perspectives :

Les travaux de recherches réalisés dans le cadre de cette thèse ouvrent de nombreuses perspectives. Tout d'abord, dans le domaine de la biologie animale ou végétale en réalisant des capteurs de plus en plus performants et moins coûteux.

La réalisation de plusieurs gammes de pression ayant la nouvelle forme proposée, en utilisant différents matériaux et dimensions, est également envisagée.

Une autre voie de recherche serait de développer un système capable de gérer une chaîne plus importante de capteurs. La réalisation d'un hub connectant plusieurs cartes pilotées par le même logiciel, permettrait d'augmenter le nombre de variables à traiter simultanément dans des expériences de recherche.

L'utilisation de ce système en zone hostile n'a pas été envisagée. Une possibilité de recherche serait de développer un protocole de communication sans fil entre les cartes d'acquisition et la centrale de traitement.

Bibliographie

- [1] V. ALBE, “Enseignement médiatisé des travaux pratiques de physique en DEUG : compte rendu d’innovation,” *Didaskalia*, no. 15, 1999, doi: 10.4267/2042/23879.
- [2] R. Millar, “The role of practical work in the teaching and learning of science,” 2004.
- [3] J. Leach and A. Paulsen, “Practical work in science education: Recent research studies,” *Studies in Science Education*, vol. 33, no. 1, pp. 168–168, Jan. 1999, doi: 10.1080/03057269908560146.
- [4] D. Hodson, “A Critical Look at Practical Work in School Science.,” *undefined*, 1990.
- [5] A. Hofstein and V. N. Lunetta, “The Laboratory in Science Education: Foundations for the Twenty-First Century,” *Science Education*, vol. 88, no. 1. pp. 28–54, Jan. 2004. doi: 10.1002/sce.10106.
- [6] T. I. Introduction, T. C. Sciences, and T. C. Sciences, “Les facteurs influençant l’acquisition des concepts en électricité,” pp. 1–7, 2015.
- [7] T. Hassouni, F. Echalfi, and F. Ziali, “IMPORTANCE DES EXPÉRIENCES DANS L ’ ENSEIGNEMENT ET L’APPRENTISSAGE DU SYSTÈME NERVEUX AU COLLÈGE : Wissal Iraqi Houssaini,” *European Scientific Journal*, vol. 10, no. 28, pp. 155–168, 2014.
- [8] “Les activités expérimentales de l’électricité dans les lycées marocains : entre les attentes et les réalisations.”
- [9] M. Taoufik, A. Abouzaid, and A. Moufti, “Les Activités Expérimentales Dans L’enseignement Des Sciences Physiques: Cas Des Collèges Marocains,” *European Scientific Journal, ESJ*, vol. 12, no. 22, p. 190, 2016, doi: 10.19044/esj.2016.v12n22p190.
- [10] de la F. et de la R. S. Conseil Supérieur de l’Education, *L’ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR AU MAROC: Efficacité, efficience et défis du système universitaire à accès ouvert*, vol. 4, no. 1. 2016.
- [11] P. Nonnon, “Laboratoire d’initiation aux sciences assisté par ordinateur.,” *these de doctorat de l’Université de Montréal, Faculté des sciences de l’éducation, Montréal, QC* 146 p., 1985.
- [12] P. Nonnon, “Enseigner les sciences avec des expérimentations assistées par ordinateur (ExAO). sous la direction de Potvin, Riopel et Masson,” *Regards multiples sur l’enseignement des sciences, Éditions Multimondes*, 8 p., 2007.
- [13] J. M. Clark and A. Paivio, “Dual coding theory and education,” *Educational Psychology Review*, vol. 3, no. 3, pp. 149–210, Sep. 1991, doi: 10.1007/BF01320076.
- [14] R. M. Gagné, “Les principes fondamentaux de l’apprentissage : application à l’enseignement,” p. 148, 1976.
- [15] R. Viau, “Le point sur... L’enseignement assisté par ordinateur : bilan qualitatif”.

- [16] M. Grandbastien, “A l’école des robots ? L’informatique, l’école et vos enfants, Michel Alberganti, 2000,” *Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication pour l’Éducation et la Formation*, vol. 7, no. 2, pp. 505–507, 2000.
- [17] D. Beaufiles and N. Salame, “Beaufiles D. & Salamé N. (1989). Quelles activités expérimentales avec les ordinateurs dans l’enseignement des sciences ?, ASTER, no8, (expérimenter, modéliser), Paris, INRP, pp. 55-79.”.
- [18] L. Hucke and H. E. Fischer, “The Link of Theory and Practice in Traditional and in Computer-based University Laboratory Experiments,” *Teaching and Learning in the Science Laboratory*, pp. 205–218, May 2002, doi: 10.1007/0-306-48196-0_22.
- [19] J.-L. Firpo, P. Neel, and L. Boyer, “Firpo J.-L., Neel P. & Boyer L. (1989). Manipulations assistées par ordinateur, in Actes des journées de Chamonix sur l’éducation scientifique, les aides didactiques, n°11, Chamonix, pp. 165-169.”.
- [20] Y. El Ouargui, B. Gourja, M. tridane, and et S. Belaaouad, “Use of Computer-Assisted Experimentation (CAEx) in Teaching Science in Moroccan High Schools,” *International Journal of Web Applications*, vol. 11, no. 4, p. 119, 2019, doi: 10.6025/ijwa/2019/11/4/119-124.
- [21] A. ATIBI, “Integration of the CAEx in the education (teaching) of the physical sciences in the Moroccan high school,” *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 88–94, 2017, doi: 10.18844/gjhss.v3i1.1754.
- [22] B. Abdelali *et al.*, “Utilisation de l’ExAO au sein des établissements scolaires du secondaire de la ville d ’ EL Jadida .,” pp. 25–26, 2020.
- [23] “Simulation numérique dans l’enseignement de la physique : enjeux, conditions”.
- [24] H. Niedderer *et al.*, “Talking Physics in Labwork Contexts - A Category Based Analysis of Videotapes,” *Teaching and Learning in the Science Laboratory*, pp. 31–40, May 2002, doi: 10.1007/0-306-48196-0_5.
- [25] V. Guéraud, J.-P. Pernin, J. Cagnat, and G. Cortès, “Environnements d’apprentissage basés sur la simulation. Outils auteur et expérimentations.,” *Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication pour l’Éducation et la Formation*, vol. 6, no. 1, pp. 95–141, 1999, doi: 10.3406/STICE.1999.1420.
- [26] “Simulations informatiques en enseignement des sciences : apports et limites.”
- [27] U. Wilensky and W. M. Stroup, “Networked Gridlock: Students Enacting Complex Dynamic Phenomena with the HubNet Architecture”.
- [28] B. Y. White and J. R. Frederiksen, “Technologica l Tools and Instructional Approaches for Making Scientifc Inquiry Accessible to All,” *Innovations in Science and Mathematics Education: Advanced Designs for Technologies of Learning*, pp. 328–366, Jan. 2012, doi: 10.4324/9781410602671-17.
- [29] R. Mintz and R. Mintz, “Computerized Simulation as an Inquiry Tool,” *School Science and Mathematics*, vol. 93, no. 2, pp. 76–80, 1993.

- [30] R. T. Strauss and M. B. Kinzie, "Student Achievement & Attitudes in a Pilot Study Comparing an Interactive Videodisc Simulation to Conventional Dissection," *The American Biology Teacher*, vol. 56, no. 7, pp. 398–402, Oct. 1994, doi: 10.2307/4449869.
- [31] R. Thomas, R. Thomas, and E. Hooper, "Simulations: An Opportunity We Are Missing," *Journal of Research on Computing in Education*, vol. 23, no. 4, pp. 497–513, 1991.
- [32] B. Richoux, C. Salvetat, and D. Beaufils, "Simulation numérique dans l'enseignement de la physique : enjeux, conditions," *undefined*, 2002.
- [33] "Hebenstreit, J (1992). Une rencontre du troisième type : simulation et pédagogie. In G.-L. Baron et J. Baudé (Eds), Actes du Colloque L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants (p. 80-87). Paris : EPI-INRP.
- [34] G. H. Marks and G. H. Marks, "Computer Simulations in Science Teaching: An Introduction," *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, vol. 1, no. 4, pp. 18–20, 1982.
- [35] M. RIOPEL, G. RAÎCHE, P. POTVIN, F. FOURNIER, and P. NONNON, "Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par l'ordinateur," *Aster*, vol. 43, no. 43, p. 7, 2006, doi: 10.4267/2042/16802.
- [36] "Chekour, M., Laafou, M., Janati-Idrissi, R et Mahdi, K. (2014). La valeur ajoutée de la formation continue en ligne des enseignants de sciences physiques dans le simulateur Pspice. *frantice.net*, numéro 9, novembre 2014.
- [37] "Mahdi, K., Chekour, M., Laafou, M., Idriss, A., Janati, R. et Madrane, M. (2014). The generalization of using the ICT in the work of the physics teachers in Moroccan schools : Obstacle of training courses and solutions. *International Journal of Innovation*."
- [38] "Ahaji, K., Zahim, S., Droui, M. et Badda, B. (2013). Schéma d'évaluation pour le choix du multimédia pédagogique approprié.
- [39] J. H. Bøhn, "Integrating rapid prototyping into the engineering curriculum - A case study," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 32–37, 1997, doi: 10.1108/13552549710169264.
- [40] G. Celani, "Digital Fabrication Laboratories: Pedagogy and Impacts on Architectural Education," *Nexus Network Journal 2012 14:3*, vol. 14, no. 3, pp. 469–482, Sep. 2012, doi: 10.1007/S00004-012-0120-X.
- [41] R. E. Stamper and D. L. Dekker, "Utilizing rapid prototyping to enhance undergraduate engineering education," *Proceedings - Frontiers in Education Conference*, vol. 2, 2000, doi: 10.1109/FIE.2000.896570.
- [42] A. Paio, S. Eloy, V. M. Rato, R. Resende, and M. J. Oliveira, "Prototyping Vitruvius, New Challenges: Digital Education, Research and Practice," *Nexus Network Journal*, vol. 3, no. 14, pp. 409–429, Oct. 2012, doi: 10.1007/S00004-012-0124-6.

- [43] S. Ford and T. Minshall, "Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education," *Additive Manufacturing*, vol. 25, pp. 131–150, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2018.10.028.
- [44] F. W. Liou, M. C. Leu, and R. G. Landers, "Interactions of an Additive Manufacturing Program with Society, in: 23rd Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp., Laboratory for Freeform Fabrication and University of Texas at Austin, Austin, USA, 2012: pp. 45–61".
- [45] M. K. Todd, "Rapid tooling and manufacturing," *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp. 333–402, Dec. 2013, doi: 10.1201/B15961-7.
- [46] R. C. Tillinghast *et al.*, "Integrating three dimensional visualization and additive manufacturing into K-12 classrooms," *ISEC 2014 - 4th IEEE Integrated STEM Education Conference*, 2014, doi: 10.1109/ISECON.2014.6891051.
- [47] A. Valero-Gomez, J. González-Gómez, V. González-Pacheco, and M. A. Salichs, "Printable creativity in plastic valley UC3M," *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, 2012, doi: 10.1109/EDUCON.2012.6201151.
- [48] C. Vandeveld, F. Wyffels, M. C. Ciocci, B. Vanderborght, and J. Saldien, "Design and evaluation of a DIY construction system for educational robot kits," *International Journal of Technology and Design Education*, vol. 26, no. 4, pp. 521–540, Nov. 2016, doi: 10.1007/S10798-015-9324-1.
- [49] M. Vona and S. Nh, "Teaching robotics software with the open hardware mobile manipulator," *IEEE Transactions on Education*, vol. 56, no. 1, pp. 42–47, 2013, doi: 10.1109/TE.2012.2218657.
- [50] R. W. Krauss and C. T. VanderRoest, "MAKER: A 3D printed balancing robot for teaching dynamic systems and control," *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, vol. 2017-June, 2017.
- [51] M. O. Martinez *et al.*, "3-D printed haptic devices for educational applications," *IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, vol. 2016-April, pp. 126–133, Apr. 2016, doi: 10.1109/HAPTICS.2016.7463166.
- [52] J. Gonzalez-Gomez, A. Valero-Gomez, A. Prieto-Moreno, and M. Abderrahim, "A New Open Source 3D-Printable Mobile Robotic Platform for Education," *Advances in Autonomous Mini Robots - Proceedings of the 6th AMiRE Symposium, AMiRE 2011*, pp. 49–62, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-27482-4_8.
- [53] D. Dumond *et al.*, "Pay it forward: Getting 3D printers into schools," *ISEC 2014 - 4th IEEE Integrated STEM Education Conference*, 2014, doi: 10.1109/ISECON.2014.6891015.
- [54] MakinoMasato *et al.*, "3D printing of police whistles for STEM education," *Microsystem Technologies*, vol. 24, no. 1, pp. 745–748, Jan. 2018, doi: 10.1007/S00542-017-3393-X.

- [55] D. Chery, S. Mburu, J. Ward, and A. Fontecchio, "Integration of the Arts and Technology in GK-12 Science Courses," *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, vol. 2015, Dec. 2015, doi: 10.1109/FIE.2015.7344165.
- [56] L. E. H. Violante, D. A. Nunez, S. M. Ryan, and W. T. Grubbs, "3D printing in the chemistry curriculum: Inspiring millennial students to be creative innovators," *ACS Symposium Series*, vol. 1180, pp. 125–146, 2014, doi: 10.1021/BK-2014-1180.CH009.
- [57] N. L. Dean, C. Ewan, and J. S. McIndoe, "Applying Hand-Held 3D Printing Technology to the Teaching of VSEPR Theory," *JChEd*, vol. 93, no. 9, pp. 1660–1662, Sep. 2016, doi: 10.1021/ACS.JCHEMED.6B00186.
- [58] A. Stansell and T. Tyler-Wod, "Digital fabrication for STEM projects: A middle school example," *Proceedings - IEEE 16th International Conference on Advanced Learning Technologies, ICALT 2016*, pp. 483–485, Nov. 2016, doi: 10.1109/ICALT.2016.44.
- [59] M. Huleihil, "3D printing technology as innovative tool for math and geometry teaching applications," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 164, no. 1, Jan. 2017, doi: 10.1088/1757-899X/164/1/012023.
- [60] N. Z. Janković, M. Z. Slijepčević, D. S. Čantrak, and I. I. Gadanski, "Application of 3D printing in M.Sc. studies - Axial turbocompressors," *1st International Conference on Multidisciplinary Engineering Design Optimization, MEDO 2016*, Nov. 2016, doi: 10.1109/MEDO.2016.7746545.
- [61] E. Kroll and D. Artzi, "Enhancing aerospace engineering students' learning with 3D printing wind-tunnel models," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 17, no. 5, pp. 393–402, 2011, doi: 10.1108/13552541111156522.
- [62] J. Helbling and L. Traub, "Impact of rapid prototyping facilities on engineering student outcomes," *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2008, doi: 10.18260/1-2--4266.
- [63] N. A. Brake and F. A. Adam, "Integrating a 3-D printer and a truss optimization project in statics," *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, vol. 2016-June, Jun. 2016, doi: 10.18260/P.25776.
- [64] U. Dakeev, Q. H. Mazumder, F. Yildiz, and K. Baltaci, "Design and development of a new small-scale wind turbine blade," *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, vol. 122nd ASEE, no. 122nd ASEE Annual Conference and Exposition: Making Value for Society, 2015, doi: 10.18260/p.23785.
- [65] Y. M. Al Hamidi, S. Abdulla, and I. Hassan, "Creating a functional model of a jet engine to serve as a testbed for mechanical engineering students' capstone designwork," *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, vol. 2017-June, Jun. 2017, doi: 10.18260/1-2--28079.
- [66] P. McGahern, F. Bosch, and D. Poli, "Enhancing learning using 3D printing: An alternative to traditional student project methods," *American Biology Teacher*, vol. 77, no. 5, pp. 376–377, May 2015, doi: 10.1525/ABT.2015.77.5.9.

- [67] B. JR and G. AJ, “Three-dimensional printing of human skeletal muscle cells: An interdisciplinary approach for studying biological systems,” *Biochem Mol Biol Educ*, vol. 43, no. 6, pp. 403–407, Nov. 2015, doi: 10.1002/BMB.20891.
- [68] Y. AbouHashem, M. Dayal, S. Savanah, and G. Štrkalj, “The application of 3D printing in anatomy education,” *Medical Education Online*, vol. 20, no. 1, 2015, doi: 10.3402/MEO.V20.29847.
- [69] M. PG, Q. MR, M. CR, and A. JW, “The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology,” *Anat Sci Educ*, vol. 7, no. 6, pp. 479–486, Nov. 2014, doi: 10.1002/ASE.1475.
- [70] T. DB, H. JD, D. BJ, and P. J, “3D scanning and printing skeletal tissues for anatomy education,” *J Anat*, vol. 229, no. 3, pp. 473–481, Sep. 2016, doi: 10.1111/JOA.12484.
- [71] A. Stangl, J. Kim, and T. Yeh, “3D printed tactile picture books for children with visual impairments: A design probe,” *ACM International Conference Proceeding Series*, pp. 321–324, 2014, doi: 10.1145/2593968.2610482.
- [72] J. Wonjin *et al.*, “Introduction of 3D Printing Technology in the Classroom for Visually Impaired Students:,” <https://doi.org/10.1177/0145482X1611000205>, vol. 110, no. 2, pp. 115–121, Mar. 2016, doi: 10.1177/0145482X1611000205.
- [73] E. Buehler, A. Hurst, and M. Hofmann, “Coming to grips: 3D printing for accessibility,” *ASSETS14 - Proceedings of the 16th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 291–292, Oct. 2014, doi: 10.1145/2661334.2661345.
- [74] K. L. Cook, S. B. Bush, and R. Cox, “Creating a Prosthetic Hand: 3D Printers Innovate and Inspire a Maker Movement,” *undefined*, 2015.
- [75] S. Jacobs, J. Schull, P. White, R. Lehrer, A. Vishwakarma, and A. Bertucci, “E-NABLING education: Curricula and models for teaching students to print hands,” *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, vol. 2016-November, Nov. 2016, doi: 10.1109/FIE.2016.7757460.
- [76] E. Buehler, W. Easley, S. McDonald, N. Comrie, and A. Hurst, “Inclusion and education: 3D printing for integrated classrooms,” *ASSETS 2015 - Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 281–290, Oct. 2015, doi: 10.1145/2700648.2809844.
- [77] Ph. D. Michael A. Kolitsky, “3D Printed Tactile Learning Objects: Proof of Concept Full Article.” Oct. 23, 2014.
- [78] T. W. Cavanaugh and N. P. Eastham, “Creating Tactile Graphs for Students With Visual Impairments,” pp. 223–240, Oct. 2018, doi: 10.4018/978-1-5225-7018-9.CH011.
- [79] S. K. Kane and J. P. Bigham, “Tracking @stemxcomet: Teaching Programming to Blind Students via 3D Printing, Crisis Management, and Twitter, in: SIGCSE ’14 Proc. 45th ACM Tech. Symp. Comput. Sci. Educ., ACM, Atlanta, USA, 2014: pp. 247–252. doi:10.1145/2538862.2538975.”.

- [80] N. Al-Rajhi, A. Al-Abdulkarim, H. S. Al-Khalifa, and H. M. Al-Otaibi, "Making linear equations accessible for visually impaired students using 3D printing," *Proceedings - IEEE 15th International Conference on Advanced Learning Technologies: Advanced Technologies for Supporting Open Access to Formal and Informal Learning, ICALT 2015*, pp. 432–433, Sep. 2015, doi: 10.1109/ICALT.2015.46.
- [81] J. H. I *et al.*, "3D Literacy Aids Introduced in Classroom for Blind and Visually Impaired Students," *Journal of Blindness Innovation and Research*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.5241/6-100.
- [82] S. S. Horowitz and P. H. Schultz, "Printing Space: Using 3D Printing of Digital Terrain Models in Geosciences Education and Research," <https://doi.org/10.5408/13-031.1>, vol. 62, no. 1, pp. 138–145, Feb. 2018, doi: 10.5408/13-031.1.
- [83] E. Ghotbi, "Applying 3D printing to enhance learning in undergraduate kinematic and dynamic of machinery course," *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, vol. 2017-June, Jun. 2017, doi: 10.18260/1-2--27600.
- [84] I. M. L. Craddock, "Makers on the move: a mobile makerspace at a comprehensive public high school," *Library Hi Tech*, vol. 33, no. 4, pp. 497–504, Nov. 2015, doi: 10.1108/LHT-05-2015-0056.
- [85] V. Kostakis, V. Niaros, and C. Giotitsas, "Open source 3D printing as a means of learning: An educational experiment in two high schools in Greece," *Telematics and Informatics*, vol. 32, no. 1, pp. 118–128, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.TELE.2014.05.001.
- [86] M. Steed, M. Steed, and M. Wevers, "3D Printing & The Design Process: A Pilot Project Between University Student...", *EdMedia + Innovate Learning*, vol. 2016, no. 1, pp. 354–359, 2016.
- [87] J. Y. Chao, H. Y. Po, Y. Sen Chang, and L. Y. Yao, "The study of 3D printing project course for indigenous senior high school students in Taiwan," *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering: Innovation, Science and Engineering, IEEE-ICAMSE 2016*, pp. 68–70, Feb. 2017, doi: 10.1109/ICAMSE.2016.7840234.
- [88] P. H. P. Chiu, K. W. C. Lai, T. K. F. Fan, and S. H. Cheng, "A pedagogical model for introducing 3D printing technology in a freshman level course based on a classic instructional design theory," *Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE*, vol. 2014, Dec. 2015, doi: 10.1109/FIE.2015.7344287.
- [89] A. JW, P. L, D. K, B. K, Q. M, and M. PG, "3D printed reproductions of orbital dissections: a novel mode of visualising anatomy for trainees in ophthalmology or optometry," *Br J Ophthalmol*, vol. 99, no. 9, pp. 1162–1167, Sep. 2015, doi: 10.1136/BJOPHTHALMOL-2014-306189.
- [90] V. M and P. V, "3D printing: a valuable resource in human anatomy education," *Anat Sci Int*, vol. 90, no. 1, pp. 64–65, Jan. 2015, doi: 10.1007/S12565-014-0257-7.

- [91] K. M. Griffith, R. de Cataldo, and K. H. Fogarty, "Do-It-Yourself: 3D Models of Hydrogenic Orbitals through 3D Printing," *Journal of Chemical Education*, vol. 93, no. 9, pp. 1586–1590, Sep. 2016, doi: 10.1021/ACS.JCHEMED.6B00293.
- [92] R. Dahle and R. Rasel, "3-D Printing as an Effective Educational Tool for MEMS Design and Fabrication," *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, no. 3, pp. 210–215, Aug. 2016, doi: 10.1109/TE.2016.2515071.
- [93] G. Letnikova and N. Xu, "Academic library innovation through 3D printing services," *Library Management*, vol. 38, no. 4–5, pp. 208–218, 2017, doi: 10.1108/LM-12-2016-0094.
- [94] F. F. Pieterse and A. L. Nel, "The advantages of 3D printing in undergraduate Mechanical Engineering research".
- [95] S. C. Meyer, "3D Printing of Protein Models in an Undergraduate Laboratory: Leucine Zippers," *Journal of Chemical Education*, vol. 92, no. 12, pp. 2120–2125, Oct. 2015, doi: 10.1021/ACS.JCHEMED.5B00207.
- [96] "SAM-E70-S70-V70-V71-Family-Data-Sheet-DS60001527E.pdf."
- [97] I. Lauzier, "L'instrumentation virtuelle : un environnement d'apprentissage en génie électrique," 2006.
- [98] B. Diagram and P. Types, "Mcp41xxx/42xxx," pp. 1–32, 2003.
- [99] Philips Semiconductor, "Low power quad op amps.," pp. 1–7, 1995.
- [100] E. Chip, "NTC Type MS Amphenol Amphenol Advanced Sensors," pp. 2–4.
- [101] M. Matus, "Temperature Measurement in Dimensional Metrology – Why the Steinhart-Hart Equation works so well," *Proc. MacroScale*, pp. 1–6, 2011.
- [102] H. Fatoorehchi, M. Alidadi, R. Rach, and A. Shojaeian, "Theoretical and Experimental Investigation of Thermal Dynamics of Steinhart-Hart Negative Temperature Coefficient Thermistors," *Journal of Heat Transfer*, vol. 141, no. 7, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1115/1.4043676.
- [103] S. B. Stanković and P. A. Kyriacou, "The effects of thermistor linearization techniques on the T-history characterization of phase change materials," *Applied Thermal Engineering*, vol. 44, pp. 78–84, 2012, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.032.
- [104] Z. P. Nenova and T. G. Nenov, "Linearization circuit of the thermistor connection," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 2, pp. 441–449, 2009, doi: 10.1109/TIM.2008.2003320.
- [105] C. F. Tsai, L. T. Li, C. H. Li, and M. S. Young, "Implementation of thermistor linearization using LabVIEW," *IIH-MSP 2009 - 2009 5th International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, vol. 1, pp. 530–533, 2009, doi: 10.1109/IIH-MSP.2009.98.

- [106] A. K. Shrivastava, A. Verma, and S. P. Singh, "Distance Measurement of an Object or Obstacle by Ultrasound Sensors using P89C51RD2," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, pp. 64–68, 2009, doi: 10.7763/ijcte.2010.v2.118.
- [107] S. Adarsh, S. M. Kaleemuddin, D. Bose, and K. I. Ramachandran, "Performance comparison of Infrared and Ultrasonic sensors for obstacles of different materials in vehicle/ robot navigation applications," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Oct. 2016, vol. 149, no. 1, p. 012141. doi: 10.1088/1757-899X/149/1/012141.
- [108] "Caméra IR de positionnement SEN0158 DFRobot - Caméras | GO TRONIC."
- [109] Q. A. Al-Haija and M. D. Samad, "Efficient LuxMeter Design Using TM4C123 Microcontroller with Motion Detection Application," *2020 11th International Conference on Information and Communication Systems, ICICS 2020*, pp. 331–336, 2020, doi: 10.1109/ICICS49469.2020.239523.
- [110] J. M. Gutierrez-Martinez, A. Castillo-Martinez, J. A. Medina-Merodio, J. Aguado-Delgado, and J. J. Martinez-Herraiz, "Smartphones as a light measurement tool: Case of study," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 6, 2017, doi: 10.3390/app7060616.
- [111] K. Sokanský, P. Závada, T. Novák, V. Kolář, and R. Hrbáč, "Development of measuring instruments for long-term measurement of low level illuminances and luminances," *2010 9th Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC 2010*, pp. 89–92, 2010, doi: 10.1109/EEEIC.2010.5490013.
- [112] S. P. L. Sörensen, "Über die Messung und Bedeutung der Wasserstoffionen-konzentration bei biologischen Prozessen," *Ergebnisse der Physiologie*, vol. 12, no. 1, pp. 393–532, Dec. 1912, doi: 10.1007/BF02325444.
- [113] "TL074 pdf, TL074 description, TL074 datasheets, TL074 view :: ALLDATASHEET ::"
- [114] Freescale, "Freescale Semiconductor Document Number: MPxx5004," 2015.
- [115] J. R. Leiza and T. McKenna, "Calorimetry, Conductivity, Densimetry, and Rheological Measurements," in *Monitoring Polymerization Reactions: From Fundamentals to Applications*, vol. 9780470917381, Hoboken, NJ: Wiley Blackwell, 2014, pp. 135–150. doi: 10.1002/9781118733813.ch7.
- [116] N. Gopal Mandal, "Measurement of gas concentrations: oxygen, carbon dioxide, nitrogen, nitrous oxide and volatile anaesthetic agents," *Anaesthesia and Intensive Care Medicine*, vol. 9, no. 12, pp. 559–563, 2008, doi: 10.1016/j.mpaic.2008.09.007.
- [117] F. Jacqueline, "Comparaison de trois capteurs à oxygène dissous, et détermination des incertitudes de mesure associées. Fiche documentaire," 2007.
- [118] D. A. E. Imber, M. Pirrone, C. Zhang, D. F. Fisher, R. M. Kacmarek, and L. Berra, "Respiratory management of perioperative obese patients," *Respiratory Care*, vol. 61, no. 12, pp. 1681–1692, Dec. 2016, doi: 10.4187/respcare.04732.

- [119] V. V. Tipparaju *et al.*, “Respiration pattern recognition by wearable mask device,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 169, p. 112590, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.bios.2020.112590.
- [120] “SEN-KY039HS Heartbeat sensor.”
- [121] J. Zhou and S. Vijayavenkataraman, “3D-printable conductive materials for tissue engineering and biomedical applications,” *Bioprinting*, vol. 24, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.BPRINT.2021.E00166.
- [122] L. Dan, Q. Cheng, R. Narain, B. Krause, P. Pötschke, and A. Elias, “Three-Dimensional Printed and Biocompatible Conductive Composites Comprised of Polyhydroxybutyrate and Multiwalled Carbon Nanotubes,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 60, no. 2, pp. 885–897, Jan. 2021, doi: 10.1021/ACS.IECR.0C04753.
- [123] F. Stan, N. V. Stanciu, A. M. Constantinescu, and C. Fetecau, “3D printing of flexible and stretchable parts using multiwall carbon nanotube/polyester-based thermoplastic polyurethane,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 143, no. 5, May 2021, doi: 10.1115/1.4048442.
- [124] H. Watschke, K. Hilbig, and T. Vietor, “Design and characterization of electrically conductive structures additively manufactured by material extrusion,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 4, Feb. 2019, doi: 10.3390/APP9040779.
- [125] C. J. Callanan, L. Hsu, and A. McGee, “Formulation and Evaluation of Carbon Black 3D Printing Materials,” *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, OCEAN 2018*, Jan. 2019, doi: 10.1109/OCEANS.2018.8604767.
- [126] L. Liu *et al.*, “3D printing of high-performance micro-supercapacitors with patterned exfoliated graphene/carbon nanotube/silver nanowire electrodes,” *Science China Technological Sciences*, vol. 64, no. 5, pp. 1065–1073, May 2021, doi: 10.1007/S11431-020-1763-5.
- [127] D. Garcia-Gonzalez, S. Garzon-Hernandez, A. Rusinek, R. Bernier, and A. Arias, “Low temperature mechanical behaviour of PVDF: cryogenic pre-treatment, quasi-static, cyclic and dynamic experimental testing and modelling,” *Mechanics of Materials*, vol. 147, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.MECHMAT.2020.103436.
- [128] C. Hong, Y. Zhang, and L. Borana, “Design, fabrication and testing of a 3D printed FBG pressure sensor,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38577–38583, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905349.
- [129] C. Hong, Y. Yuan, Y. Yang, Y. Zhang, and Z. A. Abro, “A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process,” *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 285, pp. 269–274, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.SNA.2018.11.024.
- [130] A. Tuna, O. K. Erden, Y. D. Gokdel, and B. Sarioglu, “3D printed capacitive pressure sensor with corrugated surface,” *PRIME 2017 - 13th Conference on PhD Research in Microelectronics and Electronics, Proceedings*, pp. 149–152, Jul. 2017, doi: 10.1109/PRIME.2017.7974129.

- [131] F. Lucklum and G. Dumstorff, "3D printed pressure sensor with screen-printed resistive read-out," *Proceedings of IEEE Sensors*, Jan. 2017, doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808633.
- [132] M. Liu, Q. Zhang, Y. Zhao, C. Liu, Y. Shao, and X. Tong, "A high sensitivity micro-pressure sensor based on 3D printing and screen-printing technologies," *Measurement Science and Technology*, vol. 31, no. 3, 2019, doi: 10.1088/1361-6501/AB5749.
- [133] L. M. Faller, W. Granig, M. Krivec, A. Abram, and H. Zangl, "Rapid prototyping of force/pressure sensors using 3D- and inkjet-printing," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 28, no. 10, Jul. 2018, doi: 10.1088/1361-6439/AAADF4.
- [134] M. Vatani, M. Vatani, and J. W. Choi, "Multi-layer stretchable pressure sensors using ionic liquids and carbon nanotubes," *Applied Physics Letters*, vol. 108, no. 6, Feb. 2016, doi: 10.1063/1.4941812.
- [135] D. D. Electronique, "Étude Et Simulation D ' un Capteur De Pression Capacitif Au Silicium," 2010.
- [136] G. Blasquez, Y. Naciri, P. Blondel, N. Ben Moussa, P. Pons, and P. Pons, "Static response of miniature capacitive pressure sensors with square or rectangular silicon diaphragm," 1987, doi: 10.1051/rphysap:01987002207050500i.
- [137] P. Menini, "Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium," 2007.
- [138] "Timoshenko_-Theory_of_plates_and_shells.pdf."
- [139] W. P. Eaton, F. Bitsie, J. H. Smith, and D. W. Plummer, "A New Analytical Solution for Diaphragm Deflection and its Application to a Surface-Micromachined Pressure Sensor," *Technical Proceedings of the 1999 International Conference on Modelling and Simulations of Microsystems*, no. 4, pp. 640–643, 1999.
- [140] A. Nádaï, "Die elastischen Platten," *Die elastischen Platten*, 1925, doi: 10.1007/978-3-662-11487-2.
- [141] C. W. Bert and J. L. Martindale, "An accurate, simplified method for analyzing thin plates undergoing large deflections," *AIAA Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 235–241, 1988, doi: 10.2514/3.9878.
- [142] "Microsystem Design," *Microsystem Design*, 2002, doi: 10.1007/B117574.
- [143] J. H. Jerman, "The fabrication and use of micromachined corrugated silicon diaphragms," *Sensors and Actuators: A. Physical*, vol. 23, no. 1–3, pp. 988–992, 1990, doi: 10.1016/0924-4247(90)87074-S.
- [144] W. Olthuis and P. Bergveld, "The Design, Fabrication, and Testing of Corrugated Silicon Nitride Diaphragms," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 36–42, 1994, doi: 10.1109/84.285722.
- [145] C. J. van Mullem, K. J. Gabriel, and H. Fujita, "Large deflection performance of surface micromachined corrugated diaphragms," *Transducers '91*, pp. 1014–1017, 1991, doi: 10.1109/SENSOR.1991.149066.

- [146] L. Rosengren, J. Söderkvist, and L. Smith, “Micromachined sensor structures with linear capacitive response,” *Sensors and Actuators: A. Physical*, vol. 31, no. 1–3, pp. 200–205, 1992, doi: 10.1016/0924-4247(92)80104-B.
- [147] L. Chitra and V. Ramakrishnan, “A novel design of capacitive MEMS pressure sensor for lubricating system,” *Proceedings - NCET NRES EM 2014: 2nd IEEE National Conference on Emerging Trends in New and Renewable Energy Sources and Energy Management*, pp. 204–208, 2015, doi: 10.1109/NCETNRESEM.2014.7088768.
- [148] X. Li *et al.*, “The design of a high precision capacitive pressure sensor based on comb electrode,” *2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium - Fall, PIERS - Fall 2019 - Proceedings*, pp. 2965–2971, 2019, doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021338.
- [149] Z. Liu, Y. Pan, P. Wu, L. Du, Z. Zhao, and Z. Fang, “Sensors and Actuators A : Physical A novel capacitive pressure sensor based on non-coplanar comb electrodes,” *Sensors & Actuators: A. Physical*, vol. 297, p. 111525, 2019, doi: 10.1016/j.sna.2019.07.049.
- [150] E. Systems and A. Arbor, “A HIGH-SENSITIVE ULTRA-THIN MEMS CAPACITIVE PRESSURE SENSOR Currently with HVVi Semiconductors , Inc ., Phoenix , Arizona , USA,” pp. 112–115, 2011.
- [151] A. Ettouhami, N. Zahid, and M. Elbelkacemi, “A novel capacitive pressure sensor structure with high sensitivity and quasi-linear response,” *Comptes Rendus - Mecanique*, vol. 332, no. 2, pp. 141–146, 2004, doi: 10.1016/j.crme.2003.10.001.
- [152] A. Rodríguez-Panes, J. Claver, and A. M. Camacho, “The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of PLA and ABS pieces manufactured by FDM: A comparative analysis,” *Materials*, vol. 11, no. 8, 2018, doi: 10.3390/ma11081333.
- [153] J. Cardenas and C. M. Stewart, “Tensile properties of polylactic acid (PLA) additive manufactured parts,” *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, vol. 2A-2015, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1115/IMECE2015-52274.
- [154] M. Lay, N. L. N. Thajudin, Z. A. A. Hamid, A. Rusli, M. K. Abdullah, and R. K. Shuib, “Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 176, p. 107341, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107341.
- [155] K. Lee, M. Adil, H. M. Zaid, B. H. Guan, H. Soleimani, and M. Weis, *Engineering Design Applications*, vol. 92. Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-79005-3.
- [156] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, “Mechanical characterization of 3D-printed polymers,” *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44–67, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.

- [157] T. Reppel and K. Weinberg, "Experimental determination of elastic and rupture properties of printed Ninjaflex," *Technische Mechanik*, vol. 38, no. 1, pp. 104–112, 2018, doi: 10.24352/UB.OVGU-2018-010.
- [158] Y. Sano, R. Matsuzaki, M. Ueda, A. Todoroki, and Y. Hirano, "3D printing of discontinuous and continuous fibre composites using stereolithography," *Additive Manufacturing*, vol. 24, pp. 521–527, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.10.033.
- [159] D. A. Porter, T. V. T. Hoang, and T. A. Berfield, "Effects of in-situ poling and process parameters on fused filament fabrication printed PVDF sheet mechanical and electrical properties," *Additive Manufacturing*, vol. 13, pp. 81–92, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2016.11.005.
- [160] S. Achouch, L. Masmoudi, P. Nonnon, and M. Gharbi, "3D printed capacitive relative pressure sensor for use in a CAE environment," *2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC 2021*, pp. 1366–1369, Jan. 2021, doi: 10.1109/CCWC51732.2021.9376010.
- [161] S. Achouch, F. Regragui, and M. Gharbi, "Improvement of the performance of a capacitive relative pressure sensor: case of large deflections," *Journal of Sensors and Sensor Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 401–409, Nov. 2020, doi: 10.5194/jsss-9-401-2020.
- [162] M. Al Bahri, "Influence de la température sur le comportement statique et dynamique des capteurs de pression capacitifs au silicium," 2005.
- [163] R. Guillien, "Quelques nouveaux types de ponts de mesure en basse fréquence," *Journal de Physique Appliquée*, vol. 15, no. S1, pp. 23–30, 1954, doi: 10.1051/jphysap:0195400150102300.
- [164] N. To and H. A. L. Id, "Conception et réalisation de micro-capteurs de pression pour l'instrumentation d'interface à retour d'effort To cite this version :," 2012.
- [165] W. H. Ko, "Solid-state capacitive pressure transducers," *Sensors and Actuators*, vol. 10, no. 3–4, pp. 303–320, 1986, doi: 10.1016/0250-6874(86)80052-X.
- [166] A. Jornod and F. Rudolf, "High-precision capacitive absolute pressure sensor," *Sensors and Actuators*, vol. 17, no. 3–4, pp. 415–421, May 1989, doi: 10.1016/0250-6874(89)80028-9.
- [167] A. Hanneborg, T. E. Hansen, P. A. Ohlckers, E. Carlson, B. Dahl, and O. Holwech, "An integrated capacitive pressure sensor with frequency-modulated output," *Sensors and Actuators*, vol. 9, no. 4, pp. 345–351, 1986, doi: 10.1016/0250-6874(86)80066-X.
- [168] H. Dudaicevs, M. Kandler, Y. Manoli, W. Mokwa, and E. Spiegel, "Surface micromachined pressure sensors with integrated CMOS read-out electronics," *Sensors and Actuators: A. Physical*, vol. 43, no. 1–3, pp. 157–163, May 1994, doi: 10.1016/0924-4247(94)80002-2.
- [169] C. S. Sander, J. W. Knutti, and J. D. Meindl, "A Monolithic Capacitive Pressure Sensor with Pulse-Period Output," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 27, no. 5, pp. 927–930, 1980, doi: 10.1109/T-ED.1980.19958.

- [170] C. J. van Mullem, K. J. Gabriel, and H. Fujita, “Large deflection performance of surface micromachined corrugated diaphragms,” *Transducers '91*, no. December, pp. 1014–1017, 1991, doi: 10.1109/sensor.1991.149066.

Résumé

Au Maroc, après une restructuration des cursus universitaires et une massification des établissements à accès ouvert, l'enseignement pratique des sciences a été gravement négligé dans certains cas. Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de développement, soutenu par le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, dont l'objectif principal est de développer du matériel d'enseignement performant à moindre coût. Notre choix s'est naturellement dirigé vers l'Expérimentation Assistée par Ordinateur. Ce travail de recherche s'est réalisé en quatre étapes. Après l'acquisition de la licence de la carte originale « MicrolabExAO », nous avons réalisé une carte d'acquisition dédiée au niveau secondaire. Dans un second temps, nous avons réalisé une multitude de capteurs en (physique, chimie, biologie, géologie...). L'ensemble a été validé par des protocoles expérimentaux. Dans un troisième temps, nous avons développé un capteur de pression par impression 3D et nous avons proposé une nouvelle structure permettant d'améliorer ses performances en termes de sensibilité et de linéarité en comparaison avec les structures proposées dans la littérature. La quatrième et dernière étape a été consacrée au développement de la carte d'acquisition « Recherche ». Cette carte dédiée au monde de la recherche est nettement plus performante en termes de vitesse d'acquisition et de stabilité.

Mots-clefs : Expérimentation assistée par ordinateur (ExAO), Enseignement des sciences, Travaux pratiques, Carte d'acquisition, Capteurs, Capteur de pression, Impression 3D.

Abstract

In Morocco, practical science teaching has been seriously neglected in some cases after restructuring university curricula and massifying open-access institutions. This thesis is part of a development project supported by the Ministry of Higher Education and Research, whose main objective is to develop efficient teaching material at a lower cost. Our choice was naturally oriented toward Computer-Assisted Experimentation. This research work was carried out in four stages: after the license of the original acquisition board, "MicrolabExAO," was acquired, we realized an acquisition board dedicated to the secondary level. A second time, we realized a multitude of sensors in (physics, chemistry, biology, and geology...). Experimental protocols validated the whole. In a third step, we developed a pressure sensor by 3D printing. We proposed a new structure to improve its performance in terms of sensitivity and linearity compared to the structures proposed in the literature. The fourth and last step was devoted to developing the "Research" acquisition card. This card dedicated to the research world is much more efficient in terms of acquisition speed and stability.

Key Words: Computer assisted experimentation (CAE), Science education, Practical work, Acquisition board, Sensors, Pressure sensor, 3D printing.

Année Universitaire: 2021-2022