

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Électronique

**Spécialité** : Instrumentation

**Par** : BELHOUCINE mohammed rida & HAMEZ Asma

### **Sujet**

Etude et réalisation d'une maquette de capteurs

Soutenu publiquement, le 09 /10 /2025, devant le jury composé de :

M. BENAÏSSA Mohamed

M. BOURSALI Amine

M. KERAI Nabil

Prof

MCB

MAA09

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examinateur

Encadreur

## **REMERCIEMENTS**

Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant pour Sa guidance et Son aide, grâce auxquelles nous avons pu mener à bien et achever ce modeste projet.

Ce projet a été réalisé à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, au sein du Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie.

Nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes dont l'appui et la contribution ont permis la réalisation de ce projet.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrant, M. KERAÏ Nabil, Maître assistant classe A à l'Université de Tlemcen, pour avoir accepté de nous accompagner tout au long de ce travail. Grâce à sa disponibilité constante et à la pertinence de ses conseils, il nous a permis de mener à bien ce projet dans les meilleures conditions, et ce, dès les premières étapes de sa préparation.

Nous tenons également à exprimer nos remerciements à M. BENAÏSSA Mohamed, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Nous adressons également nos sincères remerciements à M. BOURSALI Amine, Maître de conférence classe B à l'Université de Tlemcen. Nous sommes particulièrement honorés par l'attention qu'il nous accorde en acceptant d'examiner le présent travail.

## Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je dédie cet humble travail

À ma mère Hadjira, la femme de fer. Maman, je t'aime et je suis fière d'être ta fille. Merci pour ton soutien constant, tes encouragements et ton amour infini.

À mon père bien-aimé, Abdenour, qui a été ma plus grande source de force. Merci pour ton soutien constant et pour la force que tu représentes dans ma vie. Je t'aime.

À mes chères sœurs Ammara et Ilhem. Merci pour votre amour infini, vos encouragements et votre confiance en moi. Chacune de vous m'a inspirée à sa manière, et votre soutien a été une source constante de motivation.

À mes merveilleux frères, Slimane et Mohamed. Chacun de vos sourires a illuminé mon chemin, et chaque mot d'encouragement a nourri mes rêves.

À mes enseignants et encadrants, académiques et professionnels, pour leur expertise précieuse, leurs conseils avisés et l'opportunité qu'ils m'ont offerte de grandir dans un environnement stimulant.

Je suis profondément reconnaissante de vous avoir à mes côtés, et à tous ceux qui ont cru en moi.

**Asma**

# Dédicace

À ma famille et mes proches,  
pour leurs encouragements et leur présence réconfortante.

À mon professeur encadrant, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de ce travail.

**Rida**

## Résumé

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'une maquette pédagogique de mesure destinée à l'enseignement de l'instrumentation. La maquette est basée sur un capteur de pression MPX2200GP, un amplificateur d'instrumentation AD620, une carte Arduino UNO et un afficheur LCD I2C. Elle permet d'illustrer les différentes étapes de la chaîne de mesure : détection, conditionnement, conversion analogique-numérique, traitement et affichage. Les résultats expérimentaux obtenus sont globalement en accord avec les données théoriques, avec des écarts attribués aux tolérances des composants et aux limites du capteur. L'intérêt pédagogique de ce travail réside dans la simplicité, la modularité et la polyvalence de la maquette, qui peut être adaptée à d'autres capteurs de la même famille. Des perspectives d'amélioration sont proposées, notamment l'intégration de nouveaux capteurs et la mise en place d'une interface logicielle pour l'acquisition des données.

## Abstract

this thesis presents the design and implementation of a pedagogical measurement prototype intended for instrumentation teaching. The prototype is based on an MPX2200GP pressure sensor, an AD620 instrumentation amplifier, an Arduino UNO board, and an LCD I2C display. It illustrates the different stages of a measurement chain: detection, signal conditioning, analog-to-digital conversion, processing, and display. The experimental results are generally consistent with the theoretical data, with deviations attributed to component tolerances and sensor limitations. The pedagogical value of this work lies in the simplicity, modularity, and versatility of the prototype, which can be adapted to other sensors of the same family. Perspectives for improvement include the integration of additional sensors and the development of a software interface for data acquisition.

## المخلص

يعرض هذا البحث تصميم وإنجاز نموذج تعليمي للقياس موجّه لتدريس علم القياسات. يعتمد النموذج على مستشعر الضغط MPX2200GP، ومضخم القياس AD620، وبطاقة Arduino UNO، وشاشة عرض LCD I2C. يوضح هذا العمل مختلف مراحل سلسلة القياس : الكشف، تكييف الإشارة، التحويل من التناظري إلى الرقمي، المعالجة والعرض. أظهرت النتائج التجريبية توافقاً عاماً مع القيم النظرية، مع وجود فروق ناتجة عن تسامح المكونات وحدود المستشعر. تكمن القيمة البيداغوجية لهذا العمل في بساطة النموذج وقابليته للتطوير وتعدد استخداماته، حيث يمكن تكييفه مع مستشعرات أخرى من نفس العائلة. كما نقترح تحسينات مستقبلية مثل إدماج مستشعرات إضافية وتطوير واجهة برمجية لاكتساب البيانات.

# Table des matières

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Introduction générale</b>                                               | 11 |
| <b>Chapitre 1 : Généralités sur les capteurs</b>                           | 13 |
| 1.1. Introduction                                                          | 14 |
| 1.2. Capteurs et chaîne de mesure                                          | 14 |
| 1.2.1. Définition des capteurs                                             | 14 |
| 1.2.2. Constitution générale des capteurs                                  | 15 |
| 1.2.3. Grandeurs électriques et non électriques                            | 16 |
| 1.2.4. La chaîne de mesure                                                 | 18 |
| 1.3. Classification des capteurs                                           | 19 |
| 1.3.1. Nature du mesurande                                                 | 19 |
| 1.3.2. Nature du signal de sortie                                          | 19 |
| 1.3.3. Principe de fonctionnement                                          | 20 |
| 1.3.4. Type de détection                                                   | 23 |
| 1.4. Caractéristiques métrologiques                                        | 24 |
| 1.4.1. Justesse (ou exactitude)                                            | 24 |
| 1.4.2. Fidélité (ou répétabilité)                                          | 25 |
| 1.4.3. Précision                                                           | 25 |
| 1.4.4. Sensibilité                                                         | 25 |
| 1.4.5. Résolution                                                          | 25 |
| 1.4.6. Linéarité                                                           | 25 |
| 1.4.7. Rapidité                                                            | 26 |
| 1.4.8. Temps de réponse                                                    | 26 |
| 1.4.9. Limites d'utilisation                                               | 26 |
| 1.4.10. Hystérésis                                                         | 27 |
| 1.5. Erreurs de mesure                                                     | 27 |
| 1.5.1. Erreurs accidentelles                                               | 27 |
| 1.5.2. Erreurs aléatoires                                                  | 27 |
| 1.5.3. Erreurs systématiques                                               | 27 |
| 1.6. Conditionnement des signaux                                           | 29 |
| 1.6.1. Diviseur de tension                                                 | 30 |
| 1.6.2. Pont de Wheatstone                                                  | 30 |
| 1.6.3. Amplification                                                       | 30 |
| 1.7. Conclusion                                                            | 32 |
| <b>Chapitre 2 : Choix et étude des composants matériels de la maquette</b> | 33 |
| 2.1. Introduction                                                          | 34 |
| 2.2. La pression : notions fondamentales                                   | 34 |
| 2.2.1. Définition de la pression                                           | 34 |
| 2.2.2. Types de pression                                                   | 35 |
| 2.2.3. Unités de mesure                                                    | 36 |
| 2.2.4. Domaines d'application de la mesure de pression                     | 37 |
| 2.3. Le capteur MPX2200GP : choix et fonctionnement                        | 38 |
| 2.3.1. Présentation générale du capteur                                    | 38 |
| 2.3.2. Motivation du choix du MPX2200GP                                    | 39 |
| 2.3.3. Principe de fonctionnement                                          | 40 |
| 2.3.4. Caractéristiques techniques                                         | 41 |
| 2.3.5. Brochage simplifié                                                  | 42 |
| 2.4. L'amplificateur d'instrumentation AD620                               | 43 |

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1. Description de l'AD620                              | 43        |
| 2.4.2. Tension de sortie et calcul du gain                 | 44        |
| 2.4.3. Caractéristiques techniques                         | 45        |
| 2.4.4. Motivation du choix du modèle AD620                 | 47        |
| 2.5. L'ARDUINO UNO dans la chaîne d'acquisition            | 47        |
| 2.5.1. Présentation de la carte ARDUINO UNO                | 48        |
| 2.5.2. rôle de l'ARDUINO UNO                               | 49        |
| 2.5.3. Caractéristiques de l'ADC 10 bits                   | 50        |
| 2.6. L'affichage LCD I2C                                   | 51        |
| 2.6.1. L'afficheur LCD 1602                                | 51        |
| 2.6.2. Le module d'interface I2C                           | 52        |
| 2.7. Conclusion                                            | 52        |
| <b>Chapitre 3 : Réalisation de la maquette pédagogique</b> | <b>53</b> |
| 3.1. Introduction                                          | 54        |
| 3.2. Schema bloc de la chaine de mesure                    | 54        |
| 3.2.1. Illustration du schéma bloc                         | 54        |
| 3.2.2. Description des étapes                              | 55        |
| 3.3. Réalisation pratique de la maquette                   | 56        |
| 3.3.1. Circuit électrique détaillé                         | 56        |
| 3.3.2. Présentation de la maquette réalisée                | 59        |
| 3.3.3. Calibration                                         | 60        |
| 3.3.4. Mise à l'échelle                                    | 62        |
| 3.3.5. Polyvalence de la maquette pédagogique              | 62        |
| 3.4. Résultats expérimentaux et discussions                | 63        |
| 3.4.1. Caractéristiques expérimentales tension vs pression | 63        |
| 3.4.2. Comparaison avec les courbes théoriques             | 64        |
| 3.4.3. Interprétation des résultats                        | 66        |
| 3.5. Conclusion                                            | 67        |
| <b>Conclusion générale</b>                                 | <b>70</b> |
| <b>Bibliographies</b>                                      | <b>71</b> |
| <b>Annexes</b>                                             | <b>72</b> |
| Annexe 1                                                   | 72        |
| Annexe 2                                                   | 73        |
| Annexe 3                                                   | 75        |

# Liste des figures

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1.1</b> : Schéma fonctionnel d'un capteur                                   | 14 |
| <b>Figure 1.2</b> : Constitution générale d'un capteur                                | 15 |
| <b>Figure 1.3</b> : Schéma synoptique d'une chaîne de mesure                          | 18 |
| <b>Figure 1.4</b> : Capteur résistif (variation de pression)                          | 21 |
| <b>Figure 1.5</b> : Capteur résistif (variation de niveau du liquide)                 | 21 |
| <b>Figure 1.6</b> : Capteur capacitif                                                 | 22 |
| <b>Figure 1.7</b> : Capteur inductif                                                  | 22 |
| <b>Figure 1.8</b> : Caractéristique linéaire                                          | 25 |
| <b>Figure 1.9</b> : Domaines de fonctionnement d'un capteur                           | 26 |
| <b>Figure 1.10</b> : Erreur de point zéro                                             | 28 |
| <b>Figure 1.11</b> : Erreur d'échelle                                                 | 28 |
| <b>Figure 1.12</b> : Erreur de linéarité                                              | 29 |
| <b>Figure 1.13</b> : Diviseur résistif et capacitif                                   | 30 |
| <b>Figure 1.14</b> : Pont de Wheatstone                                               | 30 |
| <b>Figure 1.15</b> : Schéma d'amplificateurs différentiel à circuit intégré INA106    | 31 |
| <b>Figure 1.16</b> : Schéma d'amplificateurs d'instrumentation                        | 31 |
| <b>Figure 2.1</b> : Le capteur de pression MPX2200GP                                  | 39 |
| <b>Figure 2.2</b> : Schéma en coupe du capteur                                        | 40 |
| <b>Figure 2.3</b> : Caractéristiques de sortie du capteur MPX2200GP                   | 42 |
| <b>Figure 2.4</b> : Boîtier monobloc du capteur MPX2200GP                             | 42 |
| <b>Figure 2.5</b> : L'amplificateur d'instrumentation AD620                           | 43 |
| <b>Figure 2.6</b> : Schéma fonctionnel de l'AD620                                     | 43 |
| <b>Figure 2.7</b> : Gain théorique de l'AD620 pour différentes valeurs de $R_G$       | 46 |
| <b>Figure 2.8</b> : Caractéristiques tension vs pression appliquée                    | 46 |
| <b>Figure 2.9</b> : La carte Arduino UNO                                              | 48 |
| <b>Figure 2.10</b> : L'afficheur LCD 1602                                             | 51 |
| <b>Figure 2.11</b> : Le module I2C                                                    | 52 |
| <b>Figure 3.1</b> : Schéma bloc de mesure de pression                                 | 54 |
| <b>Figure 3.2</b> : Schéma électrique détaillé de la maquette                         | 57 |
| <b>Figure 3.3</b> : Prototype réalisé pour la mesure de pression                      | 60 |
| <b>Figure 3.4</b> : Mesure de la tension amplifiée à $P=0$ avant et après calibration | 62 |
| <b>Figure 3.5</b> : Courbes expérimentales tension mesurée vs pression appliquée      | 64 |
| <b>Figure 3.6</b> : Courbes théorique et expérimentale du capteur MPX2200GP           | 65 |
| <b>Figure 3.7</b> : Courbes théorique et expérimentale de l'AD620                     | 66 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1.1 :</b> Principes physiques des effets utilisés                                   | 23 |
| <b>Tableau 2.1 :</b> Unités usuelles de mesure de pression hors SI                             | 36 |
| <b>Tableau 2.2 :</b> Correspondance entre les unités de pression                               | 37 |
| <b>Tableau 2.3 :</b> Principales caractéristiques du capteur MPX2200GP                         | 41 |
| <b>Tableau 2.4 :</b> Brochage simplifié du capteur MPX2200GP                                   | 42 |
| <b>Tableau 2.5 :</b> Brochage simplifié de l'AD620                                             | 44 |
| <b>Tableau 2.6 :</b> Principales caractéristiques de l'AD620                                   | 45 |
| <b>Tableau 3.1 :</b> Variation des tensions de sortie mesurées en fonction de la pression      | 63 |
| <b>Tableau 3.2 :</b> Comparaison entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux | 65 |

## Table d'abréviations

| Acronyme  | Signification                                                                           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| ADC       | Analog to Digital Converter (Convertisseur Analogique-Numérique)                        |
| AD620     | Amplificateur d'instrumentation produit par Analog Devices                              |
| DC        | Direct Current (Courant continu)                                                        |
| I2C       | Inter-Integrated Circuit (bus de communication série)                                   |
| LCD       | Liquid Crystal Display (Afficheur à cristaux liquides)                                  |
| MCU       | Microcontroller Unit (Microcontrôleur)                                                  |
| MPX2200GP | Capteur de pression piézorésistif non amplifié de la série MPX (Motorola/Freescale/NXP) |
| PCB       | Printed Circuit Board (Carte à circuit imprimé)                                         |
| $R_G$     | Résistance de Gain (pour l'amplificateur AD620)                                         |
| $V_{CC}$  | Tension d'alimentation continue (souvent +5V)                                           |

# **Introduction générale**

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

L'enseignement de l'instrumentation et des systèmes de mesure constitue un pilier fondamental dans la formation des étudiants en électronique et en électrotechnique. En effet, la maîtrise des capteurs, des circuits de conditionnement de signal et des systèmes d'acquisition est indispensable pour comprendre et développer des applications concrètes dans divers domaines technologiques et industriels. Dans ce contexte, la réalisation d'une maquette pédagogique dédiée à la mesure constitue un outil didactique efficace permettant aux étudiants d'expérimenter, d'observer et de mieux assimiler les principes théoriques abordés en cours.

L'objectif principal de ce travail est donc la conception et la réalisation d'une maquette pédagogique de mesure intégrant un capteur, un circuit d'amplification, une carte d'acquisition et un système d'affichage. L'intérêt de cette maquette réside dans sa capacité à illustrer de manière pratique et interactive les différentes étapes de la chaîne de mesure, depuis la détection de la grandeur physique jusqu'à l'affichage numérique des résultats. Elle offre ainsi aux étudiants une meilleure compréhension des notions de capteurs, d'amplification, de conversion analogique-numérique et de traitement du signal.

Le choix s'est porté sur un capteur de pression (MPX2200GP) comme élément central de cette maquette. Ce choix s'explique par plusieurs raisons pédagogiques et pratiques. En premier lieu, la pression est une grandeur physique facile à générer et à faire varier de manière contrôlée à l'aide d'une poire sphygmomanométrique et d'un brassard, contrairement à d'autres grandeurs comme la température, l'humidité ou le rayonnement, qui nécessitent des moyens plus complexes pour être manipulées dans un cadre pédagogique. En second lieu, ce capteur présente une bonne sensibilité et une réponse quasi linéaire, ce qui facilite son exploitation dans des travaux pratiques.

Au-delà de son intérêt spécifique, la maquette développée se veut polyvalente. Grâce à son architecture modulaire, elle peut accueillir d'autres capteurs de la série MPX (capteurs de pression différentielle, absolue, etc.), permettant ainsi d'élargir les expériences possibles sans nécessiter de profondes modifications du système. Cette flexibilité renforce sa valeur pédagogique en offrant aux étudiants la possibilité d'explorer plusieurs types de mesures de pression avec un seul support expérimental.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré à la présentation générale des capteurs, leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques essentielles ainsi que leur classification.

Dans le deuxième chapitre, une attention particulière est portée sur la notion de pression et les capteurs associés. Ce chapitre détaille les différents éléments constituant la chaîne de mesure, à savoir le capteur de pression MPX2200GP, l'amplificateur d'instrumentation AD620, la carte Arduino UNO et le module d'affichage LCD I2C. Pour chacun de ces composants, le choix, le fonctionnement et les caractéristiques techniques sont étudiés en détail.

Le dernier chapitre décrit la mise en œuvre de la maquette, depuis le schéma bloc de la chaîne de mesure jusqu'à la calibration et la validation expérimentale. Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs théoriques, et une analyse des erreurs est effectuée.

En somme, ce travail vise à mettre à disposition un outil pédagogique simple, fiable et polyvalent, permettant aux étudiants d'expérimenter concrètement les concepts liés à l'instrumentation et à la mesure, tout en favorisant une meilleure intégration entre la théorie et la pratique.

# **Chapitre 1 :**

## **Généralités sur les capteurs**

## 1.1. Introduction

Les capteurs jouent un rôle fondamental dans les systèmes modernes de mesure, de contrôle et d'automatisation. Leur fonction principale consiste à convertir une grandeur physique telle que la température, la pression, la lumière ou encore un mouvement en un signal exploitable, généralement de nature électrique. Ce signal peut ensuite être traité, analysé ou utilisé pour commander un système [1].

Devenus indispensables dans des domaines aussi variés que l'industrie, la domotique, la médecine ou l'aéronautique, les capteurs constituent aujourd'hui une interface essentielle entre le monde physique et les systèmes numériques [2].

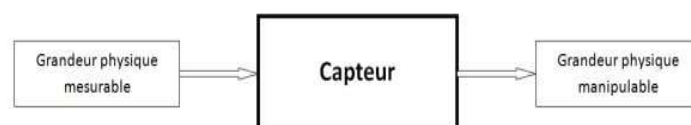
Ce chapitre introductif présente les principes de fonctionnement des capteurs, leur classification selon divers critères, leurs principales caractéristiques métrologiques, ainsi que les méthodes de conditionnement des signaux de mesure. Ces éléments permettront de mieux comprendre les choix technologiques qui seront justifiés dans les chapitres suivants.

## 1.2. Capteurs et chaîne de mesure

### 1.2.1. Définition des capteurs

Un capteur est un dispositif qui permet de détecter une grandeur physique, chimique ou biologique, puis de la transformer en une valeur mesurable et exploitable, le plus souvent sous forme d'un signal électrique. Cette conversion rend l'information détectée accessible à un système de traitement ou de commande. Lorsqu'un capteur réalise une conversion d'une forme d'énergie en une autre, on le désigne également sous le nom de transducteur [3].

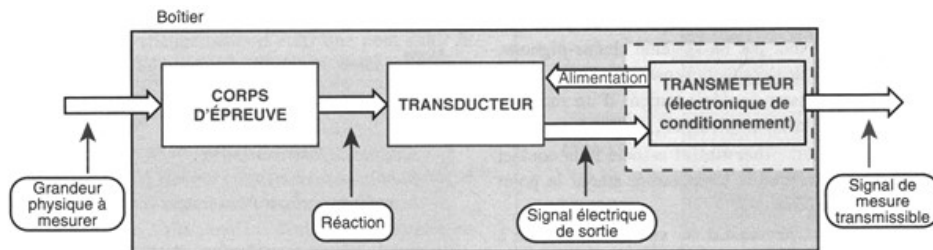
Les capteurs permettent de mesurer une grande variété de grandeurs telles que la température, la pression, l'humidité, la luminosité, la distance ou encore la concentration en gaz. Ils jouent un rôle d'interface entre le monde physique et les systèmes électroniques ou informatiques, en assurant la perception des phénomènes extérieurs. Dans les dispositifs intelligents, ils remplissent une fonction comparable à celle des organes sensoriels [4]. Le schéma suivant illustre leur principe de fonctionnement.



**Figure 1.1 :** Schéma fonctionnel d'un capteur

### 1.2.2. Constitution générale des capteurs

Malgré la diversité des technologies utilisées, la plupart des capteurs partagent une architecture générale composée de trois blocs fonctionnels principaux, comme le montre la figure ci-dessous.



**Figure 1.2** : Constitution générale d'un capteur

#### 1.2.2.1. Le corps d'épreuve

Le corps d'épreuve constitue la partie mécanique ou physique du capteur directement exposée à la grandeur à mesurer. Il assure l'interface entre le milieu extérieur et l'élément sensible, qu'elle soit de nature mécanique, thermique, chimique ou optique, en transmettant fidèlement les variations de la grandeur physique détectée [5].

Le corps d'épreuve a pour fonction de convertir la variation de la grandeur non électrique appelée mesurande, en une modification physique détectable par l'élément sensible. Par exemples :

- Dans une jauge de contrainte, il s'agit de la structure qui se déforme sous l'effet d'une force appliquée.
- Dans un capteur de pression, c'est généralement une membrane flexible qui se déforme en fonction de la pression exercée.
- Dans un thermocouple, le corps d'épreuve est constitué de conducteurs métalliques soumis à la température à mesurer.

Le choix du matériau, de la forme et des propriétés mécaniques ou thermiques du corps d'épreuve est déterminant pour assurer la sensibilité, la robustesse et la précision globale du capteur.

### **1.2.2.2. L'élément sensible (ou détecteur primaire)**

C'est la partie du capteur qui est en contact direct avec la grandeur non électrique à mesurer (la température, la pression, la lumière, etc.). Cet élément réagit à cette grandeur en produisant un effet physique mesurable tel qu'une variation de résistance, de tension ou de charge. Par exemple, une thermistance modifie sa résistance en fonction de la température.

### **1.2.2.3. Le transducteur (ou convertisseur)**

Il convertit la variation physique perçue par l'élément sensible en un signal électrique. Cette transformation est cruciale pour permettre à la mesure d'être utilisée par des systèmes électroniques. Par exemple, dans un capteur piézorésistif, la déformation mécanique se traduit par une modification de la résistance.

### **1.2.2.4. Le conditionneur de signal (intégré ou externe)**

Le conditionneur de signal, qu'il soit intégré au capteur ou externe, a pour fonction d'adapter le signal électrique brut fourni par le transducteur. Ce signal étant souvent de faible amplitude ou perturbé par du bruit, le conditionneur intervient pour l'amplifier, le filtrer, le linéariser ou le convertir selon les besoins de l'application.

Certains capteurs récents, qualifiés d'intelligents, intègrent également des modules additionnels tels qu'un microcontrôleur, une interface de communication ou un système d'auto-calibration.

### **1.2.2.5. Le transmetteur**

C'est un dispositif chargé de convertir le signal de sortie du capteur en un format standardisé, adapté à la transmission vers un système de commande ou d'acquisition. Il assure ainsi l'interface entre le capteur et l'unité de traitement. Le transmetteur peut être intégré au capteur ou bien constituer un module séparé, selon l'architecture du système de mesure.

## **1.2.3. Grandeurs électriques et non électriques**

### **1.2.3.1. Les grandeurs électriques**

Dans une chaîne de mesure, les grandeurs électriques jouent un rôle central car elles servent de support à l'information issue du capteur. La majorité des capteurs convertissent la grandeur physique mesurée en un signal électrique, plus facile à traiter et à transmettre [6].

Parmi les grandeurs électriques les plus couramment utilisées, on distingue :

- **Tension électrique (V) :** C'est la sortie la plus répandue. La tension générée est souvent proportionnelle à la grandeur physique mesurée. Elle se prête facilement à l'amplification et à la conversion analogique-numérique.
- **Courant électrique (I) :** Certains capteurs délivrent un signal en courant, notamment dans des plages normalisées (ex. : 4–20 mA), particulièrement utile pour les transmissions à distance en raison de sa faible sensibilité aux perturbations.
- **Résistance électrique (R) :** Certains capteurs modifient leur résistance en fonction de la grandeur mesurée (ex. : thermistances, jauges de contrainte). Un circuit supplémentaire est requis pour convertir cette variation en tension.
- **Impédance (Z) :** En régime alternatif, certains capteurs exploitent la variation de l'impédance (associant résistance et réactance), comme dans les capteurs capacitifs ou inductifs.

Ces grandeurs établissent ainsi le lien électrique entre le capteur et le reste du système de mesure, et un traitement approprié de celles-ci garantit une mesure fiable, précise et utilisable.

### 1.2.3.2. Les grandeurs non électriques

Les grandeurs non électriques sont les grandeurs physiques, chimiques ou mécaniques que les capteurs sont conçus pour détecter et mesurer. Ce sont ces grandeurs, appelées mesurandes, que les capteurs transforment en signaux électriques exploitables par la chaîne de mesure [6]. Voici quelques exemples courants :

- **Température (°C, K) :** Mesurée par des thermocouples, thermistances ou capteurs à résistance (RTD).
- **Pression (Pa, bar) :** Mesurée par des capteurs piézorésistifs, capacitifs ou à déformation.
- **Déplacement / Position (m, mm) :** Détecté par des capteurs inductifs, optiques ou à effet Hall.
- **Vitesse et accélération (m/s, m/s<sup>2</sup>) :** Évaluées par des capteurs tachymétriques ou accéléromètres.
- **Humidité (%RH) :** Mesurée par des capteurs capacitifs ou résistifs.
- **Lumière (lux) :** Mesurée par des photodiodes ou photorésistances (LDR).

Ces grandeurs sont converties en signaux électriques par l'intermédiaire de l'élément sensible et du transducteur, ce qui permet leur intégration dans une chaîne de traitement.

### 1.2.4. La chaîne de mesure

Dans tout système d'acquisition, un capteur n'est jamais utilisé isolément : il fait partie intégrante d'un ensemble cohérent appelé chaîne de mesure. Cette chaîne regroupe plusieurs éléments permettant de détecter une grandeur physique, de la convertir, de la traiter, puis de l'afficher ou de l'enregistrer sous une forme exploitable [6].

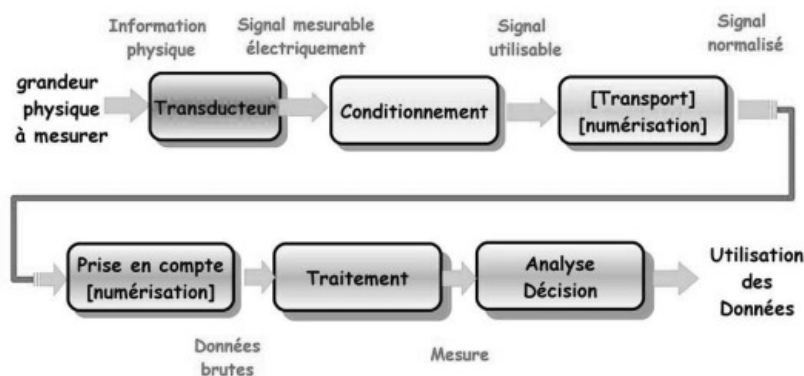
La structure de base d'une chaîne de mesure comprend généralement quatre niveaux fonctionnels (Figure 1.3) :

**1. Le capteur :** Il réagit aux variations d'une grandeur physique et fournit un signal électrique proportionnel. Ce signal est souvent analogique. Le capteur inclut au minimum un transducteur assurant la conversion du mesurande en une autre grandeur mesurable avec une précision spécifiée.

**2. La partie électronique analogique :** Placée en général à proximité du capteur, cette unité traite le signal brut (amplification, filtrage, adaptation). Elle élève le niveau du signal à une valeur compatible avec l'unité de traitement. Un filtre peut y être intégré pour atténuer les perturbations.

**3. L'unité de numérisation :** Elle assure les opérations de calcul, de comparaison ou d'analyse sur le signal conditionné. Cela peut être un microcontrôleur, un automate ou une interface de conversion analogique-numérique.

**4. Dispositif d'affichage ou d'enregistrement :** Il présente la mesure de manière lisible ou permet son stockage (écran, graphique, interface numérique, etc.).



**Figure 1.3 :** Schéma synoptique d'une chaîne de mesure

Cette chaîne garantit une exploitation correcte de la mesure, qu'il s'agisse d'une surveillance, d'un contrôle ou d'une régulation automatique.

### 1.3. Classification des capteurs

Les capteurs peuvent être classés selon plusieurs critères, chacun permettant de mieux comprendre leur fonctionnement, leurs applications et leurs spécificités techniques. Ces classifications facilitent le choix du capteur adapté à une application donnée. On distingue notamment [7]:

#### 1.3.1. Nature du mesurande

Cette classification repose sur le type de grandeur physique que le capteur est conçu pour détecter. On distingue généralement les grandes familles suivantes :

- **Capteurs de grandeur mécanique** : Mesurent des paramètres comme la position, la vitesse, l'accélération, la force ou la déformation. Exemples : jauges de contrainte, capteurs piézoélectriques, capteurs de déplacement à effet Hall.
- **Capteurs de grandeur thermique** : Utilisés pour mesurer la température ou les flux thermiques. Exemples : thermocouples, thermistances (NTC, PTC), capteurs à résistance de platine (RTD).
- **Capteurs de grandeur optique** : Ces capteurs sont sensibles à la lumière ou à ses propriétés. Exemples : photodiodes, cellules photovoltaïques, phototransistors.
- **Capteurs de grandeur acoustique** : Ils détectent les ondes sonores ou ultrasonores. Exemples : microphones, capteurs ultrasoniques.
- **Capteurs de grandeur électrique et magnétique** : Mesurent des tensions, des courants ou des champs électriques/magnétiques. Exemples : capteurs à effet Hall, transformateurs de courant, électrodes pour signaux bioélectriques.
- **Capteurs de grandeur chimique** : Réagissent à la composition chimique de l'environnement (gaz, ions, pH, etc.). Exemples : capteurs de gaz, capteurs électrochimiques, électrodes de pH.

Cette classification met en évidence la diversité des phénomènes physiques pouvant être mesurés, soulignant l'importance de bien définir le *mesurande* pour sélectionner le capteur le plus adapté.

#### 1.3.2. Nature du signal de sortie

Un autre critère de classification repose sur le type de signal que le capteur délivre. Ce signal détermine la manière dont l'information sera traitée et intégrée dans un système de commande ou d'acquisition. On distingue trois grandes catégories [8].

### **1.3.2.1. Capteurs à sortie analogique**

Ces capteurs produisent un signal continu dans le temps, généralement sous forme de tension ou de courant, proportionnel à la grandeur mesurée. Ils sont bien adaptés pour représenter des variations fines et progressives du mesurande. Toutefois, ces signaux sont sensibles au bruit et nécessitent souvent un conditionnement (amplification, filtrage, etc.) [8].

On peut citer :

- Thermocouple : tension analogique proportionnelle à la température.
- Potentiomètre : variation de tension selon la position.
- Capteur de pression : piézorésistif.

### **1.3.2.2. Capteurs à sortie logique (ou tout ou rien)**

Ces capteurs fournissent un signal binaire, qui prend uniquement deux états possibles (haut ou bas, 1 ou 0). Ils sont utilisés pour signaler la présence ou l'absence d'un phénomène, la détection d'un seuil ou d'une position franchie. On peut citer :

- Interrupteur de fin de course.
- Détecteur infrarouge de proximité : (présence/absence).
- Capteur magnétique : à effet Hall tout ou rien.

### **1.3.2.3. Capteurs à sortie numérique**

Les capteurs numériques délivrent une information codée, généralement via un protocole de communication série (ex. : I2C, SPI, 1-Wire). Ils intègrent souvent un convertisseur analogique-numérique (CAN) et parfois un traitement local du signal, comme dans les capteurs dits intelligents [9]. On peut citer :

- Capteur de température numérique DS18B20.
- Capteur de pression BMP280.

Cette classification est particulièrement importante en électronique embarquée, où la compatibilité entre le capteur et le microcontrôleur conditionne la performance globale du système.

## **1.3.3. Principe de fonctionnement**

Les capteurs peuvent également être classés selon la manière dont ils réagissent à la grandeur à mesurer, autrement dit en fonction de leur principe physique de fonctionnement. On distingue deux grandes familles : les capteurs passifs et les capteurs actifs.

### 1.3.3.1. Capteurs passifs

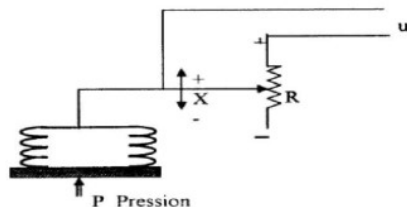
Les capteurs passifs ne génèrent pas eux-mêmes de signal électrique. Ils nécessitent une source d'alimentation externe pour fonctionner. Leur principe repose généralement sur la modification d'une propriété physique (résistance, capacité, inductance...) en réponse à la grandeur mesurée. Cette variation est ensuite exploitée à l'aide d'un circuit de mesure.

#### 1.3.3.1.1. Capteurs résistifs

Ces capteurs fonctionnent en modifiant leur résistance en fonction d'une grandeur physique. La mesure de cette variation nécessite souvent un pont de Wheatstone ou un diviseur de tension. Exemples :

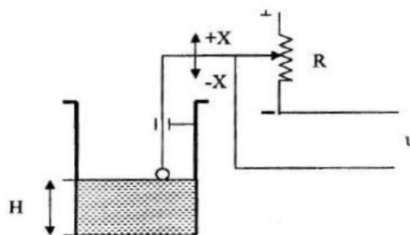
- Thermistances (NTC/PTC) : Capteurs de température dont la résistance varie fortement avec la température.
- La déformation de la jauge entraîne une variation de sa longueur et de sa section, modifiant ainsi sa résistance.
- Capteurs de position à potentiomètre : La position d'un curseur mobile modifie la longueur de la piste résistive en contact, ce qui change la résistance mesurée.

La figure suivante représente la variation de la résistance électrique par la déformation du soufflet en fonction la variation de la pression  $P$ .



**Figure 1.4 :** Capteur résistif (variation de pression)

La figure suivante représente la variation de la résistance par le déplacement du curseur du potentiomètre  $R$  en fonction de la variation du niveau du liquide  $H$ .



**Figure 1.5 :** Capteur résistif (variation de niveau du liquide)

### 1.3.3.1.2. Capteurs capacitifs

Les capteurs capacitifs exploitent la variation de la capacité entre deux électrodes en réponse à une grandeur physique (déplacement, humidité, niveau de liquide...). La capacité dépend de la distance entre les électrodes, de leur surface, et de la constante diélectrique du milieu (Figure 1.6).

Les capteurs capacitifs peuvent détecter des déplacements linéaires ou angulaires (variation de la distance  $d$ ), la présence d'un objet (modification de la constante diélectrique  $\epsilon$ ), des variations d'humidité ou de niveau de liquide (influence sur la constante diélectrique  $\epsilon$ ), ou des déformations (changement de forme ou de distance entre les électrodes).

Ces capteurs fonctionnent sans contact mécanique direct et parfois influencés par les interférences électromagnétiques.

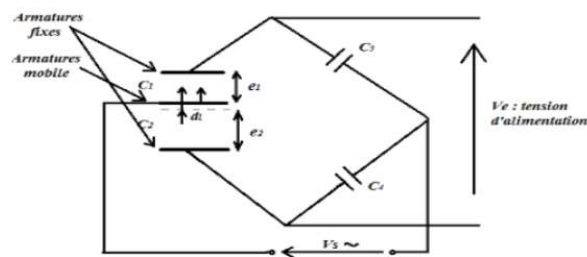


Figure 1.6 : Capteur capacitif

### 1.3.3.1.3. Capteurs inductifs

Ces capteurs sont principalement utilisés pour détecter la présence ou la position d'objets métalliques. Leur fonctionnement repose sur la variation d'inductance d'une bobine ou sur les courants de Foucault générés dans un objet conducteur placé dans un champ magnétique.

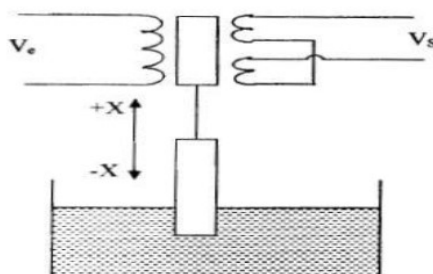


Figure 1.7 : Capteur inductif

Les capteurs inductifs sont largement utilisés dans l'industrie pour leur robustesse et leur fiabilité dans des environnements exigeants. Ils représentent une solution idéale pour la détection de proximité métallique sans contact et sans entretien.

### 1.3.3.2. Capteurs actifs

Les capteurs actifs génèrent directement un signal électrique en réponse à la grandeur physique sans nécessiter d'alimentation externe pour la conversion. Ils convertissent l'énergie du mesurande en énergie électrique via un phénomène physique donné.

Un capteur actif est basé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement. Voici Quelques exemples de correspondances entre mesurande, principe physique et signal de sortie :

| Mesurande                     | Effet physique utilisé | Grandeur de sortie |
|-------------------------------|------------------------|--------------------|
| Force, pression, accélération | Piézoélectricité       | Charge électrique  |
| Position                      | Effet Hall             | Tension électrique |
| Vitesse                       | Induction              | Tension électrique |
| Température                   | Thermoélectricité      | Tension électrique |
| Flux optique                  | Photoémission          | Courant électrique |

**Tableau 1.1** : Principes physiques des effets utilisés

Ce type de capteur est souvent utilisé lorsque la simplicité, l'autonomie ou la rapidité de réponse sont des critères importants.

### 1.3.4. Type de detection

Les capteurs peuvent également être classés en fonction de leur mode d'interaction avec la grandeur à mesurer, c'est-à-dire selon qu'ils nécessitent ou non un contact physique direct avec le mesurande. Ce critère est particulièrement important dans les environnements sensibles ou contraints (hygiène, sécurité, usure mécanique, etc.). Par exemple, dans les chaînes de production automatisées ou les dispositifs médicaux, les capteurs sans contact sont souvent privilégiés pour leur rapidité, leur fiabilité et leur absence d'usure mécanique.

#### **1.3.4.1. Capteurs à détection avec contact**

Ces capteurs nécessitent un contact physique direct avec l'objet ou la grandeur à mesurer. Ils sont souvent simples, robustes et adaptés aux environnements industriels classiques. Toutefois, leur durée de vie peut être limitée par l'usure mécanique ou des conditions d'utilisation sévères. Exemples :

- Interrupteurs de fin de course.
- Thermomètres à contact : sondes thermocouples insérées.
- Capteurs de pression mécaniques.
- Jauges de contrainte collées sur une surface.

#### **1.3.4.2. Capteurs à détection sans contact**

Ces capteurs détectent la grandeur mesurée à distance, sans interaction physique directe. Ils sont privilégiés dans les environnements difficiles ou pour des objets en mouvement, car ils permettent une mesure rapide, fiable et sans usure. Exemples :

- Capteurs infrarouges : détection de mouvement ou température.
- Capteurs à ultrasons : .détection de distance.
- Capteurs inductifs ou capacitifs : détection de proximité.
- Caméras thermiques.
- Capteurs optiques : codeurs, barrières infrarouges.

### **1.4. Caractéristiques métrologiques**

Dans tout système de mesure, les performances du capteur sont évaluées à travers un ensemble de caractéristiques appelées caractéristiques métrologiques. Ces paramètres permettent de juger de la qualité, de la précision et de la fiabilité du capteur. Leur connaissance est essentielle pour sélectionner un capteur adapté aux exigences d'une application donnée [10].

#### **1.4.1. Justesse (ou exactitude)**

La justesse représente l'aptitude d'un capteur à fournir une valeur de sortie proche de la valeur réelle du mesurande. Elle se mesure par l'erreur systématique entre la mesure obtenue et la valeur de référence.

### 1.4.2. Fidélité (ou répétabilité)

La fidélité traduit la capacité du capteur à reproduire la même valeur lorsqu'on effectue plusieurs mesures d'une même grandeur, dans les mêmes conditions.

### 1.4.3. Précision

La précision combine la justesse et la fidélité. Elle exprime globalement l'écart entre la valeur réelle et la valeur mesurée. Un capteur précis doit donc être à la fois juste et fidèle.

### 1.4.4. Sensibilité

La sensibilité correspond au rapport entre la variation du signal de sortie et la variation de la grandeur mesurée. Elle indique la capacité du capteur à détecter de faibles variations du mesurande. Si cette sensibilité est constante sur l'ensemble de la plage de mesure, le capteur est dit linéaire.

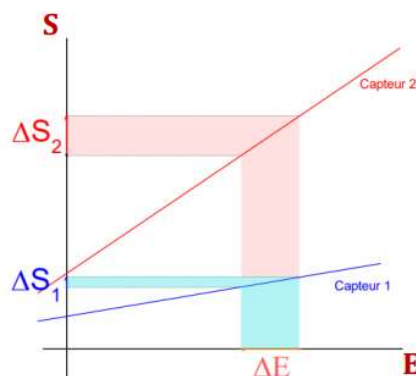


Figure 1.8 : Caractéristique linéaire

### 1.4.5. Résolution

La résolution est la plus petite variation de la grandeur d'entrée que le capteur est capable de détecter. Elle conditionne la finesse de mesure et joue un rôle essentiel dans les applications de haute précision.

### 1.4.6. Linéarité

La linéarité évalue dans quelle mesure la relation entre la grandeur d'entrée et le signal de sortie suit une droite. Plus cette relation est proche d'une droite, plus le capteur est considéré comme linéaire.

### 1.4.7. Rapidité

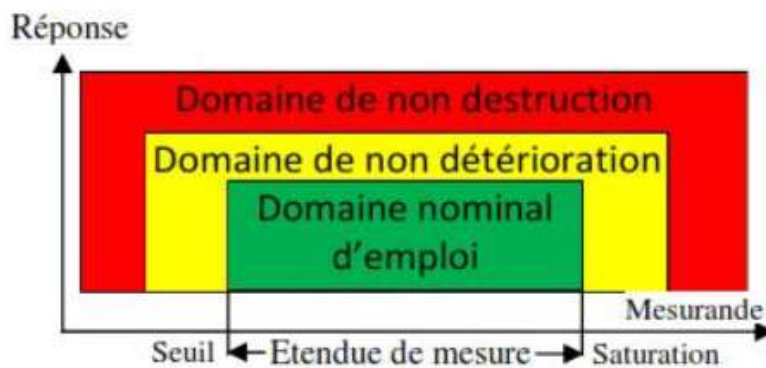
La rapidité caractérise la capacité du capteur à suivre les variations rapides du mesurande. Elle est généralement exprimée en bande passante ou en temps de réponse.

### 1.4.8. Temps de réponse

Il s'agit du temps nécessaire pour que la sortie du capteur passe de 10 % à 90 % de sa valeur finale, suite à un changement soudain de l'entrée. Un temps de réponse court est essentiel dans les systèmes dynamiques.

### 1.4.9. Limites d'utilisation

Chaque capteur présente des limites liées à ses composants (mécaniques, thermiques, électriques). Ces limites sont regroupées en domaines de fonctionnement (Figure 1.9)



**Figure 1.9 :** Domaines de fonctionnement d'un capteur

- **Domaine nominale d'emploi :** il correspond aux conditions normales d'utilisation (pas de modification des caractéristiques). Ces limites sont les valeurs extrêmes que peuvent atteindre de façon permanente le mesurande.
- **Domaine de non-détérioration :** lorsque les valeurs du mesurande ou des grandeurs d'influences dépassent le domaine nominal mais restent inférieures au domaine de non-détérioration, les caractéristiques métrologiques du capteur sont modifiées. Cette altération est cependant réversible. On retrouve le domaine nominal quand les conditions de fonctionnement redeviennent normales.

- **Domaine de non-destruction** : lorsque les valeurs du mesurande ou des grandeurs d'influences dépassent le domaine de non-détérioration mais restent inférieurs au domaine de non-destruction, les caractéristiques du capteur sont modifiées de manière irréversible. La réutilisation du capteur nécessite un nouvel étalonnage.
- **Domaine de destruction** : le capteur est hors d'usage.

#### 1.4.10. Hystérésis

L'hystérésis désigne l'écart entre les valeurs de sortie mesurées lorsque la grandeur varie dans un sens, puis dans le sens inverse. Ce phénomène révèle une dépendance au sens de variation et peut entraîner une erreur significative si elle n'est pas prise en compte.

### 1.5. Erreurs de mesure

Les résultats de la mesure peuvent s'écarter de la valeur réelle du mesurande en raison de différentes perturbations ou imperfections. Ces écarts sont appelés erreurs de mesure et peuvent compromettre la fiabilité, la précision et la reproductibilité des données. Il est donc essentiel d'en comprendre les origines afin de pouvoir les réduire, les corriger ou les compenser. On distingue généralement trois grandes catégories d'erreurs selon leur origine.

#### 1.5.1. Erreurs accidentelles

Ces erreurs sont imprévisibles et souvent causées par une mauvaise manipulation, une erreur de lecture ou un dysfonctionnement soudain de l'appareil de mesure. Elles produisent des écarts importants et inhabituels par rapport aux valeurs attendues. Bien qu'occasionnelles, elles peuvent fortement perturber l'analyse des données.

#### 1.5.2. Erreurs aléatoires

Les erreurs aléatoires sont dues à des perturbations imprévisibles, telles que le bruit électronique, les fluctuations de température ou les vibrations mécaniques. Elles affectent la fidélité des mesures et provoquent une dispersion des résultats autour d'une valeur moyenne.

#### 1.5.3. Erreurs systématiques

Les erreurs systématiques sont reproductibles et prévisibles. Elles sont généralement liées à des défauts d'étalonnage, à des décalages internes, ou à des influences extérieures constantes.

Ces erreurs affectent la justesse des mesures et peuvent souvent être corrigées par des ajustements matériels ou logiciels.

#### 1.5.3.1. Erreur de point zéro

Cette erreur correspond à un décalage constant du signal de sortie, même lorsque la grandeur mesurée est supposée nulle. Elle peut provenir d'un défaut d'étalonnage, d'une dérive électronique ou de l'influence de l'environnement (température, humidité, etc.). Elle est généralement corrigée par une remise à zéro manuelle ou automatique.

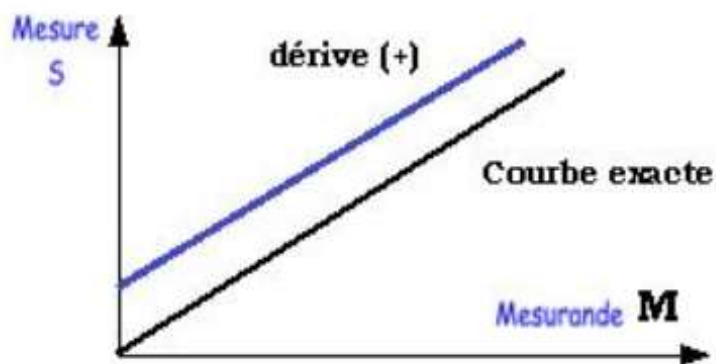


Figure 1.10 : Erreur de point zéro

#### 1.5.3.2. Erreur d'étendue

Elle se manifeste par une pente incorrecte dans la relation entre la grandeur mesurée et le signal de sortie. Autrement dit, la mesure est systématiquement surestimée ou sous-estimée. Cette erreur est souvent liée à un gain mal ajusté ou à des composants électroniques vieillissants.

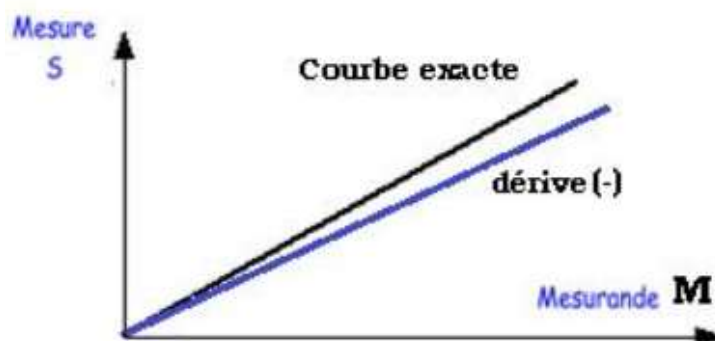


Figure 1.11 : Erreur d'échelle

### 1.5.3.3. Erreur de linéarité

Elle apparaît lorsque la réponse du capteur ne suit pas une courbe parfaitement linéaire sur l'ensemble de la plage de mesure. Cela engendre un écart variable entre la sortie réelle et la sortie théorique attendue. La linéarisation peut se faire par des circuits électroniques ou par des algorithmes logiciels.

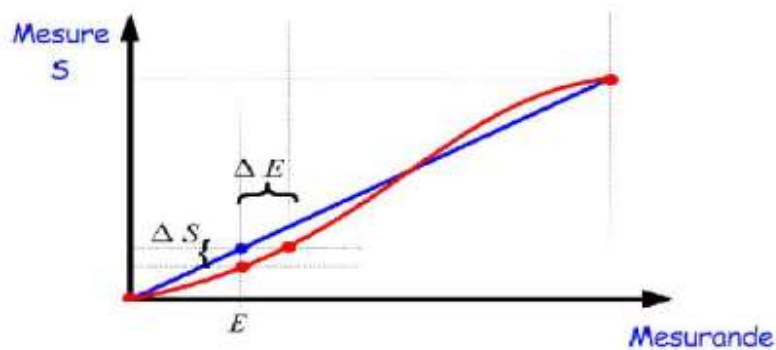


Figure 1.12 : Erreur de linéarité

### 1.5.3.4. Erreurs dues aux grandeurs d'influence

Certaines grandeurs extérieures, qui ne font pas partie du mesurande, peuvent influencer les performances du capteur. Il peut s'agir de la température ambiante, de l'humidité, des champs électromagnétiques, des vibrations, ou encore des variations d'alimentation. Ces perturbations peuvent être réduites par blindage, compensation ou conception robuste.

### 1.5.3.5. Erreurs dues au phénomène d'hystérésis

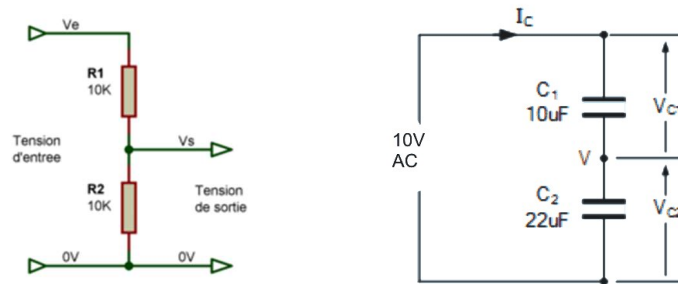
Ce type d'erreur survient lorsque le signal de sortie dépend non seulement de la valeur actuelle du mesurande, mais aussi de son évolution passée. Ainsi, pour une même valeur d'entrée, la sortie peut différer selon que l'on monte ou descend. Ce phénomène est fréquent dans les matériaux magnétiques ou les capteurs à composants mécaniques.

## 1.6. Conditionnement des signaux

Le signal brut délivré par un capteur n'est généralement pas exploitable tel quel. Il peut être de faible amplitude, bruité, non linéaire ou incompatible avec les niveaux de tension requis par les unités de traitement. Pour garantir une mesure fiable et précise, il est indispensable de conditionner ce signal avant son exploitation par un microcontrôleur, un automate ou un système d'acquisition. Le conditionnement repose sur différents circuits électroniques adaptés à la nature du capteur et au type de signal à traiter. Voici quelques exemples typiques [11].

### 1.6.1. Diviseur de tension

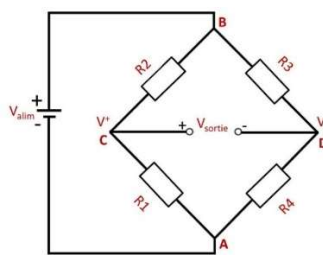
Le diviseur de tension est un circuit simple constitué de deux résistances en série. Il permet de transformer une variation de résistance comme celle produite par un capteur résistif (CTN, LDR, potentiomètre, etc.) en une variation de tension mesurable. La tension au point de jonction varie proportionnellement au mesurande, ce qui permet une lecture facile par un convertisseur analogique-numérique (CAN).



**Figure 1.13 :** Diviseur résistif et capacitif

### 1.6.2. Pont de wheatstone

Le pont de Wheatstone est spécialement conçu pour mesurer de faibles variations de résistance. Il est constitué de quatre résistances disposées en pont, dont l'une au moins est sensible à la grandeur à mesurer. Lorsqu'un déséquilibre est provoqué par une variation de résistance, une tension apparaît entre les branches du pont. Ce principe est utilisé dans de nombreux capteurs : jauges de contrainte, thermistances, photorésistances, etc.



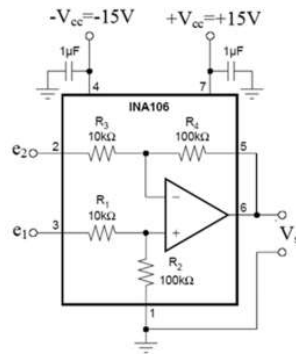
**Figure 1.14 :** Pont de Wheatstone

### 1.6.3. Amplification

Les signaux issus des capteurs ont souvent une amplitude trop faible pour être directement exploitée. Il est donc nécessaire de les amplifier à l'aide de circuits adaptés. Cependant, l'amplification peut également accentuer les bruits indésirables, ce qui impose une sélection rigoureuse des composants.

### 1.6.3.1. Amplificateurs différentiels

Ces amplificateurs permettent d'amplifier uniquement la différence entre deux signaux d'entrée, tout en rejetant les signaux communs (bruit, parasites). Leur principale qualité est le fort taux de réjection du mode commun (CMRR), ce qui les rend adaptés aux applications de mesure sensibles.

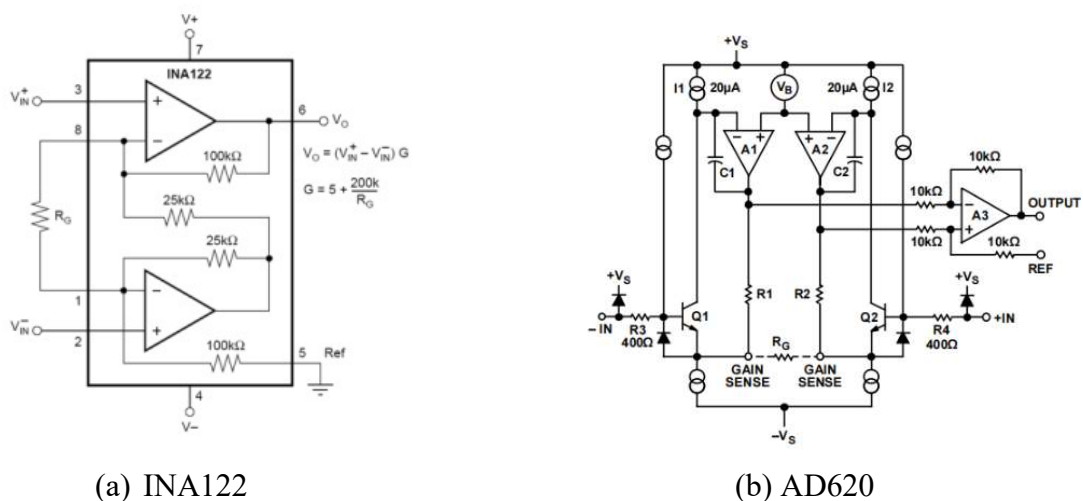


**Figure 1.15 :** Schéma d'amplificateurs différentiel à circuit intégré INA106

### 1.6.3.2. Amplificateurs d'instrumentation

Les amplificateurs d'instrumentation sont des versions hautes performances des amplificateurs différentiels. Ils offrent une impédance d'entrée très élevée, une excellente stabilité thermique et un gain facilement ajustable. Ils sont souvent utilisés avec des capteurs délivrant des signaux très faibles (jauges de contrainte, RTD, capteurs de pression) dans des environnements industriels ou biomédicaux.

Ils sont disponibles sous forme de circuits intégrés (ex. : INA122, AD620) et sont conçus pour garantir une précision optimale du signal conditionné.



(a) INA122

(b) AD620

**Figure 1.16 :** Schéma d'amplificateurs d'instrumentation

à 2 (a) et 3 (b) étages à circuit intégré

## **1.7. Conclusion**

Ce premier chapitre a posé les bases nécessaires à la compréhension des capteurs et de leur rôle fondamental dans les systèmes de mesure. Nous avons présenté les définitions essentielles, la structure générale d'un capteur, ainsi que les différentes catégories des capteurs.

Les caractéristiques métrologiques ont été détaillées afin d'évaluer la qualité et la pertinence d'un capteur dans un contexte donné. Nous avons également identifié les différentes sources d'erreurs susceptibles d'affecter les mesures, et souligné l'importance de leur correction ou compensation pour garantir la fiabilité des résultats.

Enfin, le conditionnement des signaux a été abordé comme une étape incontournable entre la détection de la grandeur physique et son traitement numérique. Des circuits simples comme le diviseur de tension aux systèmes plus évolués comme les amplificateurs d'instrumentation, chaque solution répond à un besoin précis d'adaptation du signal.

Ces connaissances constituent un socle indispensable pour aborder les aspects pratiques abordés dans les chapitres suivants. Dans le deuxième chapitre, l'attention sera portée sur le choix des composants matériels pour la mise en œuvre de notre maquette pédagogique. L'étude portera notamment sur le capteur utilisé, l'amplification du signal, son traitement numérique et l'affichage des données sur une maquette pédagogique.

**Chapitre 2 :**  
**Choix et étude des composants**  
**matériels de la maquette**

## **2.1. Introduction**

Pour concevoir une maquette pédagogique capable de mesurer la pression de manière fiable, précise et lisible, il est nécessaire de s'appuyer sur une chaîne de mesure complète, constituée de plusieurs blocs fonctionnels complémentaires.

Ce chapitre est dédié à l'étude théorique des composants matériels sélectionnés pour cette chaîne. Il débute par un rappel des notions fondamentales liées à la pression, afin de fournir le contexte physique indispensable. Ensuite, il présente les critères ayant motivé le choix du capteur MPX2200GP, ainsi que de l'amplificateur d'instrumentation AD620, chargé de conditionner le signal issu du capteur. L'étude se poursuit avec l'analyse du rôle de la carte Arduino UNO, qui assure le traitement numérique des données, et se termine par la description du module LCD I2C, utilisé pour l'affichage des résultats.

## **2.2. La pression : notions fondamentales**

### **2.2.1. Définition de la pression**

La pression est une grandeur physique qui exprime l'intensité d'une force appliquée perpendiculairement sur une surface donnée. Elle correspond au rapport entre la force exercée et la surface sur laquelle elle s'applique [12].

La pression  $P$  se définit, mathématiquement, par le rapport entre la force  $F$  (en newtons) et la surface  $S$  (en mètres carrés) sur laquelle elle s'applique :

$$P = \frac{F}{S}$$

où :

$P$  est la pression en pascals (Pa),

$F$  est la force en newtons (N),

$S$  est la surface en mètres carrés ( $m^2$ ).

La pression peut être exercée par des gaz (comme l'air), des liquides ou des solides. Par exemple, l'air ambiant exerce une force continue sur les objets environnants ; c'est ce qu'on appelle la pression atmosphérique. Ce phénomène est central dans de nombreux domaines, tels que la météorologie, l'aéronautique, la médecine ou l'industrie.

En instrumentation, la pression est mesurée indirectement à l'aide de capteurs capables de convertir les variations de pression en signaux électriques (tension ou courant) exploitables par des dispositifs électroniques.

### 2.2.2. Types de pression

Selon le contexte de mesure et le référentiel utilisé, plusieurs types de pression peuvent être définis [12] .

#### 2.2.2.1. Pression absolue

La pression absolue est mesurée par rapport au vide absolu (pression nulle). Elle représente la pression réelle exercée par un fluide, y compris la pression atmosphérique si le fluide est un gaz. Elle se calcule comme suit :

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{atm}$$

où :

$P_{abs}$  est la pression absolue (par rapport au vide),

$P_{rel}$  est la pression relative ou manométrique (ce que mesure un manomètre standard),

$P_{atm}$  est la pression atmosphérique (environ 1013,25 hPa au niveau de la mer).

#### 2.2.2.2. Pression relative (ou manométrique)

La pression relative est mesurée par rapport à la pression atmosphérique locale. C'est celle indiquée par la plupart des instruments usuels (comme les manomètres pour pneus ou réservoirs). Une pression relative peut être positive (si supérieure à la pression atmosphérique) ou négative (si inférieure à la pression atmosphérique, on parle alors de dépression ou vide partiel) [12].

#### 2.2.2.3. Pression différentielle

Il s'agit de la différence entre deux pressions mesurées à deux points distincts d'un système. Elle est souvent utilisée pour évaluer les pertes de charge dans les conduites, les filtres ou les dispositifs de ventilation.

#### 2.2.2.4. Pression atmosphérique

C'est la pression exercée par l'air sur toutes les surfaces exposées. Elle varie avec l'altitude, la température et les conditions météorologiques. Sa valeur standard au niveau de la mer est de 101325 Pa = 1013,25 hPa = 760 mmHg.

### 2.2.2.5. Vide (pression négative)

Le vide correspond à une pression inférieure à la pression atmosphérique. Le vide est couramment exprimé en mmHg ou en mbar, et il intervient dans les systèmes de pompage, les laboratoires ou les équipements de contrôle de fuites.

### 2.2.3. Unités de mesure

La pression, en tant que grandeur physique fondamentale, peut être exprimée dans plusieurs unités selon les contextes d'utilisation ; scientifiques, industriels ou médicaux. Ces unités se divisent principalement en deux catégories : les unités du Système International (SI) et les unités hors SI, encore largement utilisées dans certains domaines.

#### 2.2.3.1. Unité si : le Pascal (Pa)

C'est l'unité officielle de la pression dans le Système International. Elle se définit comme une force de 1 newton exercée uniformément sur une surface d'un mètre carré. Cependant, le Pascal est une unité relativement petite, donc on utilise souvent des multiples (hPa et kPa).

#### 2.2.3.2. Unités usuelles hors SI

En pratique, plusieurs unités traditionnelles subsistent, notamment dans les domaines médicaux, industriels ou météorologiques. Le tableau 2.1 donne quelques unités de mesure de pression.

| Unité         | Symbole | Équivalence en Pascal (Pa)   | Utilisation courante                   |
|---------------|---------|------------------------------|----------------------------------------|
| bar           | bar     | 1 bar = 100 kPa              | Industrie (pneumatiques, hydraulique)  |
| mm de mercure | mmHg    | 1 mmHg $\approx$ 0,13332 kPa | Médecine, vide, pression sanguine      |
| Torr          | Torr    | 1 Torr = 1333,22 hPa         | Vide, laboratoire                      |
| atmosphère    | atm     | 1 atm = 1013,25 hPa          | Référence standard                     |
| psi           | psi     | 1psi $\approx$ 6,894 kPa     | Pays anglo-saxons (pneus, hydraulique) |

**Tableau 2.1** : Unités usuelles de mesure de pression hors SI

### 2.2.3.3. Conversion entre unités

Dans certains domaines comme l'électronique médicale ou la science du vide, les pressions sont exprimées en unités hors SI (par exemple mmHg). Toutefois, les capteurs modernes tel le MPX2200GP utilisé dans ce projet délivrent une tension proportionnelle à une pression exprimée en kPa ou en psi. Le tableau ci-dessous présente les principales conversions entre unités de pression.

| Unité  | Pa       | bar                    | mmHg                | atm                   | psi                   |
|--------|----------|------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 Pa   | 1        | $10^{-5}$              | $7,5 \cdot 10^{-3}$ | $9,87 \cdot 10^{-6}$  | $1,45 \cdot 10^{-4}$  |
| 1 bar  | $10^5$   | 1                      | 750,06              | 0,9869                | 14,5038               |
| 1 mmHg | 133,322  | $1,3333 \cdot 10^{-3}$ | 1                   | $1,315 \cdot 10^{-3}$ | $1,934 \cdot 10^{-2}$ |
| 1 atm  | 101325   | 1,01325                | 760                 | 1                     | 14,696                |
| 1 psi  | 6 894,76 | 0,06895                | 51,715              | 0,068046              | 1                     |

**Tableau 2.2 :** Correspondance entre les unités de pression

### 2.2.4. Domaines d'application de la mesure de pression

La mesure de la pression est essentielle dans de nombreux secteurs d'activité, tant pour des raisons de sécurité que pour le bon fonctionnement des procédés. Selon le domaine, les exigences en matière de précision, de robustesse ou de dynamique de mesure peuvent fortement varier. Voici quelques domaines représentatifs dans lesquels la mesure de pression joue un rôle central.

- **Industrie :** Dans le secteur industriel, la pression est surveillée dans les systèmes hydrauliques, pneumatiques, les circuits de vapeur ou de gaz, ainsi que dans les procédés de fabrication (exemple : moulage sous pression, injection de fluides, pressurisation de cuves). La régulation de la pression permet d'optimiser les performances des machines et de garantir la sécurité des installations.
- **Automobile et transport :** Les capteurs de pression sont largement utilisés dans les véhicules pour contrôler :
  - la pression des pneumatiques (TPMS),
  - la pression d'huile moteur,
  - la pression du liquide de frein,
  - la pression dans les systèmes d'injection (essence ou diesel), et

▪ **Domaine médical :** Dans le domaine biomédical, la pression est une grandeur vitale. Elle est mesurée pour surveiller :

- la pression artérielle,
- la pression intracrânienne ou intraoculaire,
- la respiration (pression dans les voies respiratoires),
- les dispositifs de perfusion ou de dialyse.

La précision et la stabilité des capteurs sont ici primordiales pour garantir la fiabilité du diagnostic ou du traitement.

▪ **Aéronautique et spatial :** La pression intervient dans la navigation (altitude), la régulation de la cabine, les moteurs à réaction, les capteurs barométriques, ou encore les systèmes d'oxygénation. Les capteurs doivent ici résister à des conditions extrêmes ; variation rapide de pression, températures très basses, vibrations.

▪ **Environnement et météorologie :** La pression atmosphérique est un indicateur essentiel dans les stations météorologiques pour prédire le temps, détecter les changements climatiques, ou mesurer l'altitude. Les capteurs barométriques sont souvent intégrés dans des stations automatiques, drones, smartphones ou dispositifs portables.

▪ **Applications domestiques :** On retrouve aussi des capteurs de pression dans les objets du quotidien : chaudières, stations de pompage, machines à laver, systèmes d'arrosage, balances électroniques, etc.

## **2.3. Le capteur MPX2200GP : choix et fonctionnement**

### **2.3.1. Présentation générale du capteur**

Le MPX2200GP est un capteur de pression de type piézorésistif, conçu pour mesurer des pressions relatives de l'ordre de quelques centaines de kilopascals (jusqu'à 200 kPa). Il est fabriqué par la société NXP Semiconductors (anciennement Motorola) et se distingue par sa robustesse, sa simplicité d'intégration et sa compatibilité avec des applications industrielles et pédagogiques [13] (Figure 2.1) .

Ce capteur délivre une tension analogique proportionnelle à la pression appliquée, ce qui en fait un composant adapté aux systèmes de mesure embarqués ou aux maquettes didactiques utilisant des microcontrôleurs comme l'Arduino.

Le MPX2200GP est un capteur non amplifié, ce qui signifie que le signal de sortie est faible (de l'ordre de quelques millivolts) et nécessite un conditionnement par amplification pour être correctement exploité.



**Figure 2.1 :** Le capteur de pression MPX2200GP

### 2.3.2. Motivation du choix du MPX2200GP

Le choix du capteur MPX2200GP pour la réalisation de la maquette pédagogique n'est pas arbitraire. Il repose sur plusieurs critères techniques, pédagogiques et pratiques qui répondent aux objectifs du projet.

Tout d'abord, ce capteur est basé sur la technologie piézorésistive, reconnue pour sa robustesse, sa linéarité et sa facilité d'exploitation. Il offre une plage de mesure allant jusqu'à 200 kPa ( $\approx 2$  bar), ce qui permet de couvrir une grande variété d'applications éducatives en lien avec la mesure de pression, notamment atmosphérique, hydraulique ou pneumatique.

Le modèle MPX2200GP est de type non amplifié, ce qui présente un avantage pédagogique majeur ; il nécessite un conditionnement du signal, permettant d'introduire l'utilisation d'un amplificateur d'instrumentation (tel que l'AD620), et ainsi d'illustrer une étape essentielle dans la chaîne de mesure.

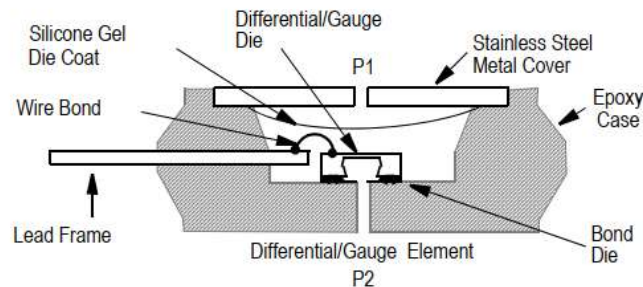
De plus, il s'agit d'un composant facile à intégrer dans une maquette expérimentale. Il dispose d'un boîtier plastique à quatre broches montable sur support, ce qui le rend compatible avec les plaques d'essai et les circuits imprimés éducatifs. Il fonctionne sous une tension d'alimentation de 12 V, couramment disponible dans les laboratoires pédagogiques.

Enfin, le coût modéré du MPX2200GP et sa large disponibilité sur le marché en font une solution accessible et durable pour les activités pratiques de formation en instrumentation.

### 2.3.3. Principe de fonctionnement

Le MPX2200GP repose sur l'effet piézorésistif appliqué à une membrane en silicium (Figure 2.2). Lorsqu'une pression est exercée sur cette membrane, elle se déforme légèrement, provoquant une variation de résistance dans des jauges piézorésistives intégrées. Ces variations sont ensuite converties en une tension électrique proportionnelle à la pression [14].

Le capteur est généralement intégré dans un pont de Wheatstone, permettant de linéariser la réponse et de faciliter l'exploitation du signal de sortie. Cette tension est très faible (quelques dizaines de millivolts à pleine échelle), ce qui justifie l'utilisation d'un amplificateur d'instrumentation en aval pour augmenter l'amplitude du signal et améliorer la précision de la mesure.



**Figure 2.2 :** Schéma en coupe du capteur

#### 2.3.3.1. Pression mesurée

Le capteur MPX2200GP mesure la différence entre la pression appliquée sur sa membrane et la pression atmosphérique ambiante. Cette dernière est directement fournie par une chambre de référence intégrée au boîtier du capteur, ouverte à l'air libre. Ainsi, la pression ambiante  $P_{amb}$  est automatiquement prise en compte par le capteur, ce qui dispense l'utilisateur de la mesurer séparément. Soit :

$$P_{mesurée} = P_{appliquée} - P_{amb}$$

où :

$P_{mesurée}$  est la pression relative,

$P_{appliquée}$  est la pression appliquée,

$P_{amb}$  est la pression ambiante locale.

### 2.3.3.2. Tension de sortie du capteur MPX2200GP

Le capteur fournit une faible tension différentielle  $V_{out}$  (quelques mV) proportionnelle à la pression appliquée. Sa sortie s'exprime en général par :

$$V_{out} = V_{offset} + (S \times P_{appliquée})$$

où :

$V_{out}$  est la tension de sortie différentielle en volts,

$V_{offset}$  est la tension de décalage (offset), c'est la sortie quand  $P_{appliquée}$  est nulle,

$S$  est la sensibilité du capteur, en V/Pa ou en mV/kPa.

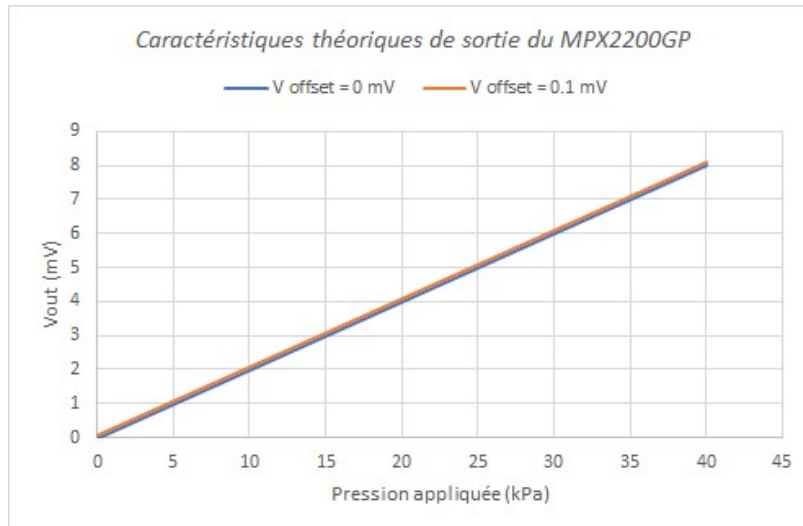
### 2.3.4. Caractéristiques techniques

Le tableau suivant résume les principales caractéristiques du capteur MPX2200GP.

| Caractéristique                    | Valeur typique                      | Unité            |
|------------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| Type de capteur                    | Pression relative (non amplifié)    |                  |
| Plage de mesure                    | 0 à 200                             | kPa              |
| Sensibilité                        | 0,2                                 | mV/kPa           |
| Tension de sortie                  | 0 à 40                              | mV (0 à 200kPa)  |
| Offset de sortie                   | ~ 0 à 1                             | mV (à 0 kPa)     |
| Tension d'alimentation recommandée | 10 (peut aller jusqu'à 16 max)      | V (DC)           |
| Courant d'alimentation             | 6                                   | mA               |
| Technologie                        | Piézorésistive (pont de Wheatstone) |                  |
| Nombre de broches                  | 4                                   |                  |
| Boîtier                            | SIP 4 broches (GP : Gauge Pressure) |                  |
| Température de fonctionnement      | -40 à +125                          | °C               |
| Linéarité                          | ±0,2                                | % pleine échelle |
| Réponse en fréquence               | Jusqu'à 1                           | kHz              |

**Tableau 2.3 :** Principales caractéristiques du capteur MPX2200GP

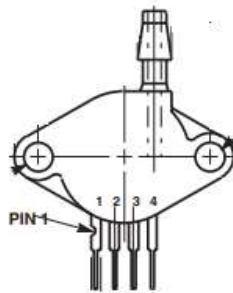
Voici les caractéristiques de sortie de la série MPX2200GP. La sortie est directement proportionnelle à la pression appliquée et est essentiellement linéaire.



**Figure 2.3 :** Caractéristiques de sortie du capteur MPX2200GP

### 2.3.5. Brochage simplifié

Sur le plan physique, le capteur se présente sous forme d'un boîtier à 4 broches (Single In-Line Package (SIP)), dont la disposition est décrite ci-après.



**Figure 2.4 :** Boîtier monobloc du capteur MPX2200GP

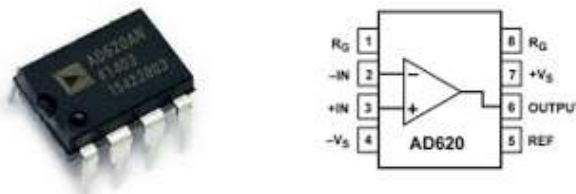
| Broche | Nom                   | Fonction                                      |
|--------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| 1      | GND                   | Masse                                         |
| 2      | Sortie V <sub>-</sub> | Sortie différentielle positive                |
| 3      | + V                   | Entrée de l'alimentation positive (ex. +12 V) |
| 4      | Sortie V <sub>+</sub> | Sortie différentielle négative                |

**Tableau 2.4 :** Brochage simplifié du capteur MPX2200GP

## 2.4. L'amplificateur d'instrumentation AD620

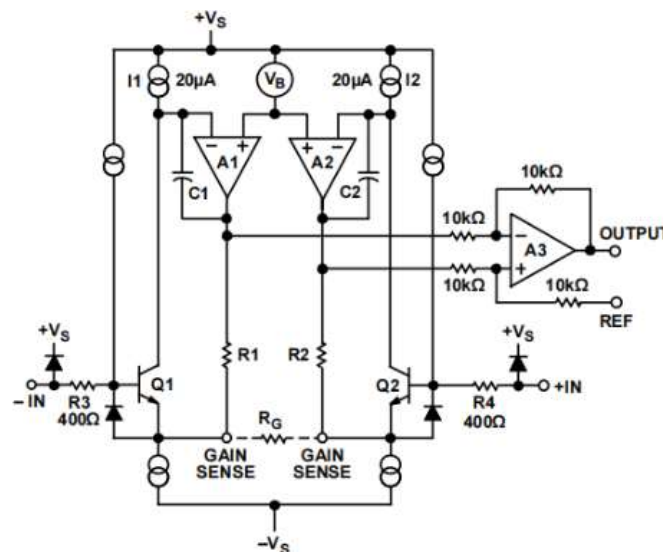
### 2.4.1. Description de l'AD620

L'AD620 est un amplificateur d'instrumentation monolithique, à faible consommation, conçu par Analog Devices. Il est destiné aux applications de mesure de précision, en particulier lorsqu'il s'agit de traiter des signaux analogiques faibles provenant de capteurs résistifs ou piézo-résistifs, comme le MPX2200GP [15]



**Figure 2.5 :** L'amplificateur d'instrumentation AD620

L'architecture interne de l'AD620 repose sur trois amplificateurs opérationnels configurés de manière symétrique (Figure 2.5). Deux d'entre eux servent d'étage d'entrée différentiel à haute impédance, tandis que le troisième agit comme amplificateur de gain, déterminé par une résistance externe  $R_G$ . Ce montage permet d'obtenir un gain programmable compris entre 1 et 10000, avec une excellente rejection du mode commun (CMRR). Le brochage de l'AD620 est présenté dans le tableau 2.5.



**Figure 2.6 :** Schéma fonctionnel de l'AD620

| Broche | Nom             | Fonction                                                        |
|--------|-----------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1      | R <sub>G</sub>  | Connexion pour la résistance de gain R <sub>G</sub>             |
| 2      | -IN             | Entrée négative (signal différentiel)                           |
| 3      | +IN             | Entrée positive (signal différentiel)                           |
| 4      | -V <sub>s</sub> | Alimentation négative (ex. -12 V)                               |
| 5      | Ref             | Tension de référence de sortie (généralement reliée à la masse) |
| 6      | OUTPUT          | Sortie de l'amplificateur                                       |
| 7      | +V <sub>s</sub> | Alimentation positive (ex. +12 V)                               |
| 8      | R <sub>G</sub>  | Connexion pour la résistance de gain R <sub>G</sub>             |

Tableau 2.5 : Brochage simplifié de l'AD620

#### 2.4.2. Tension de sortie et calcul du gain

L'AD620 amplifie la différence de tension entre ses deux entrées (-IN et +IN), tout en rejetant efficacement les signaux communs. Il offre une grande précision de gain, avec un faible écart par rapport au gain théorique. Grâce à sa faible tension d'offset et son bruit réduit, il permet d'amplifier des signaux faibles sans altération significative. La tension de sortie de l'AD620 s'exprime par :

$$V_{out} = G \times (V^+ - V^-) + V_{ref}$$

où :

$V^+$  et  $V^-$  sont les tensions d'entrée différentielles,

G est le gain d'amplification

$V_{ref}$  est la tension appliquée sur la broche 5 (généralement reliée à la masse si on souhaite un signal centré sur 0).

L'un des avantages majeurs de l'AD620 est la possibilité de régler précisément le gain d'amplification à l'aide d'une seule résistance externe R<sub>G</sub> placée entre les broches 1 et 8. Cette souplesse permet d'adapter facilement l'amplification du signal délivré par un capteur en fonction des besoins de l'application. Le gain de l'AD620 est donné par la formule :

$$G = 1 + \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

où :

$G$  est le gain de l'amplificateur,

$R_G$  est la résistance externe connectée entre les broches 1 et 8 (en ohms),

49.4 k $\Omega$  est une constante interne du circuit.

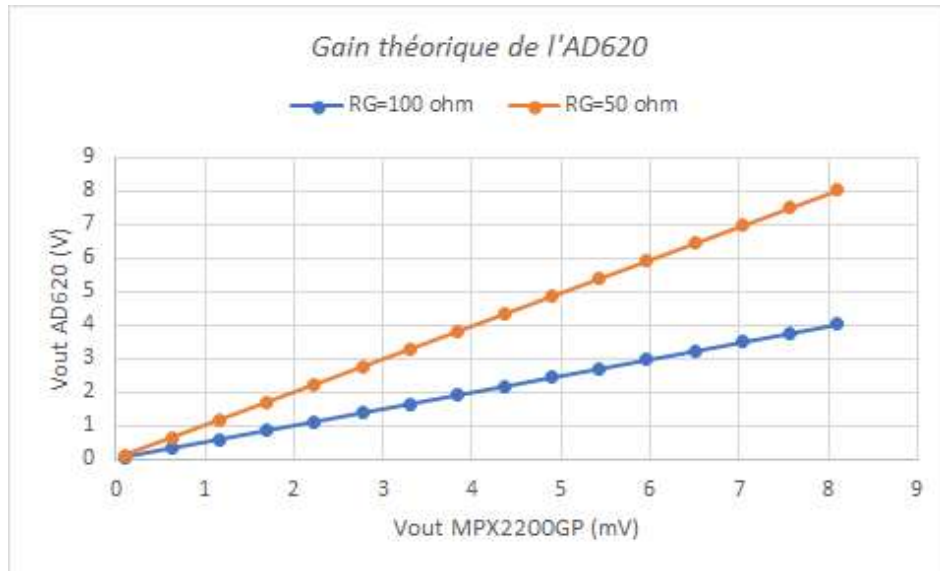
### 2.4.3. Caractéristiques techniques

L'AD620 est un amplificateur d'instrumentation de haute précision. Ses caractéristiques techniques en font un composant de choix pour les applications biomédicales, industrielles et pédagogiques. Le tableau suivant résume les principales caractéristiques.

| Paramètre                         | Valeur typique                              | Remarques                                     |
|-----------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Tension d'alimentation            | $\pm 2,3 \text{ V}$ à $\pm 18 \text{ V}$    | Fonctionne aussi en alimentation simple       |
| Consommation (courant d'alim.)    | 1.3 mA                                      | Très faible consommation                      |
| Plage de gain programmable        | 1 à 10000                                   | Par résistance externe $R_G$                  |
| Impédance d'entrée différentielle | 10 G $\Omega$                               |                                               |
| Tension d'offset d'entrée         | 50 $\mu\text{V}$                            | Faible erreur d'offset                        |
| Dérive de l'offset (drift)        | 0,6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$            | Stabilité thermique élevée                    |
| Bruit en tension (0,1 à 10 Hz)    | 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$                    | Faible bruit, bon rapport signal/bruit        |
| CMRR (à $G = 10$ )                | 100 dB                                      | Excellente réjection du mode commun           |
| Largeur de bande ( $G = 10$ )     | 120 kHz                                     | Bonne réponse en fréquence                    |
| Tension de sortie                 | $\pm 10 \text{ V}$ max (selon alim.)        | Signal exploitable par microcontrôleur ou ADC |
| Boîtier disponible                | DIP 8 broches, SOIC                         | Facile à intégrer sur breadboard ou PCB       |
| Température de fonctionnement     | -40 $^\circ\text{C}$ à +85 $^\circ\text{C}$ | Adapté aux environnements variés              |

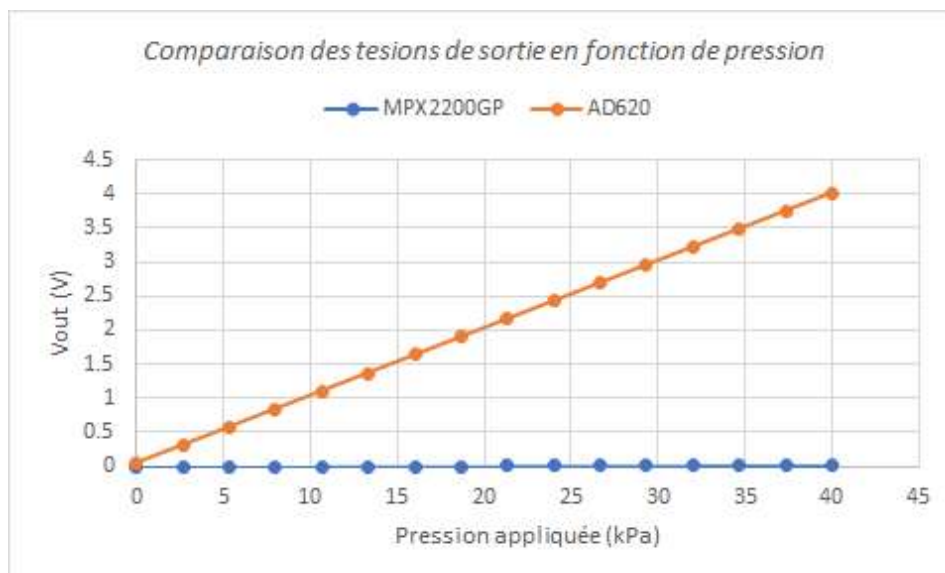
**Tableau 2.6 :** Principales caractéristiques de l'AD620

Les caractéristiques de sortie de l'AD620 pour différentes valeurs de  $R_G$  sont représentées sur la figure suivante.



**Figure 2.7 :** Gain théorique de l'AD620 pour différentes valeurs de  $R_G$

La figure 2.8 représente une comparaison entre la tension de sortie du MPX2200GP et celle de l'AD620 pour différentes valeurs de pression.



**Figure 2.8 :** Caractéristiques tension vs pression appliquée

#### **2.4.4. Motivation du choix du modèle AD620**

Dans une chaîne de mesure analogique, comme celle utilisée dans cette maquette pédagogique, le signal issu du capteur est généralement de très faible amplitude. Le capteur MPX2200GP délivre une tension de sortie de l'ordre de quelques millivolts, ce qui est insuffisant pour une exploitation directe par un microcontrôleur ou un système d'affichage. C'est dans ce contexte qu'intervient l'amplificateur d'instrumentation.

Le choix de l'amplificateur d'instrumentation AD620 pour la conception de cette maquette pédagogique repose sur plusieurs critères techniques et pédagogiques. L'AD620 est un circuit intégré reconnu pour sa performance, sa simplicité d'utilisation et sa souplesse d'intégration dans les systèmes de mesure. Par rapport aux amplificateurs classiques, il est adapté aux applications de mesure de précision et spécialement conçu pour amplifier les petites différences de tension entre deux entrées, tout en rejetant les signaux communs (bruit ou parasites). Voici ses principaux atouts :

- Une impédance d'entrée élevée, qui évite de perturber le capteur,
- Un gain précis et ajustable, grâce à une résistance externe,
- Grâce à sa faible tension d'offset (50  $\mu$ V typique) et à son faible bruit de fond, l'AD620 permet d'amplifier des signaux faibles sans introduire de bruit significatif.
- Avec une consommation typique de 1,3 mA, l'AD620 est adapté aux applications à faible consommation d'énergie.
- Il peut accepter des signaux différentiels allant de quelques microvolts jusqu'à plusieurs volts, ce qui convient parfaitement à la sortie très faible du capteur MPX2200GP.
- L'AD620 est disponible en boîtier DIP 8 broches, facile à utiliser sur une maquette pédagogique, notamment sur breadboard ou circuits imprimés simples.
- Sa sortie est directement exploitable par un microcontrôleur tel que l'Arduino UNO, car elle fournit une tension analogique proportionnelle à la pression mesurée.

Ces caractéristiques rendent l'amplificateur d'instrumentation indispensable dans toute application de mesure sensible, où précision et fidélité du signal sont requises. Il est donc particulièrement adapté à un montage pédagogique visant à illustrer les étapes du conditionnement de signal, de la détection jusqu'à l'affichage.

#### **2.5. L'ARDUINO UNO dans la chaîne d'acquisition**

Le rôle du microcontrôleur est central, il permet d'acquérir, de traiter et d'afficher les données provenant du capteur. L'Arduino UNO a été choisi pour assurer cette fonction en raison de sa simplicité, sa flexibilité et sa large adoption dans le monde de l'enseignement.

Dans cette section, nous présenterons les principales caractéristiques techniques de l'Arduino UNO, les raisons de son choix dans le cadre de cette maquette, ainsi que son rôle spécifique dans l'acquisition et le traitement du signal mesuré.

### 2.5.1. Présentation de la carte ARDUINO UNO

L'Arduino UNO (Figure 2.9) est une carte à microcontrôleur basée sur l'ATmega328P, conçue pour faciliter le développement de systèmes embarqués et d'applications de mesure. C'est l'une des cartes les plus populaires de la plateforme Arduino, un projet open-source né en Italie dans les années 2000 à l'Interaction Design Institute Ivrea (IDII). Son objectif initial était de fournir un outil simple, économique et flexible aux étudiants, artistes, ingénieurs et enseignants [16].

Elle est dotée d'entrées analogiques permettant la lecture des tensions issues du conditionnement de signaux (comme ceux délivrés par l'AD620), et de sorties numériques facilitant l'affichage sur un écran LCD ou l'envoi des données vers un ordinateur. Sa programmation intuitive via l'environnement Arduino IDE en fait un outil parfaitement adapté pour initier les étudiants à l'électronique embarquée et à la mesure numérique [16].

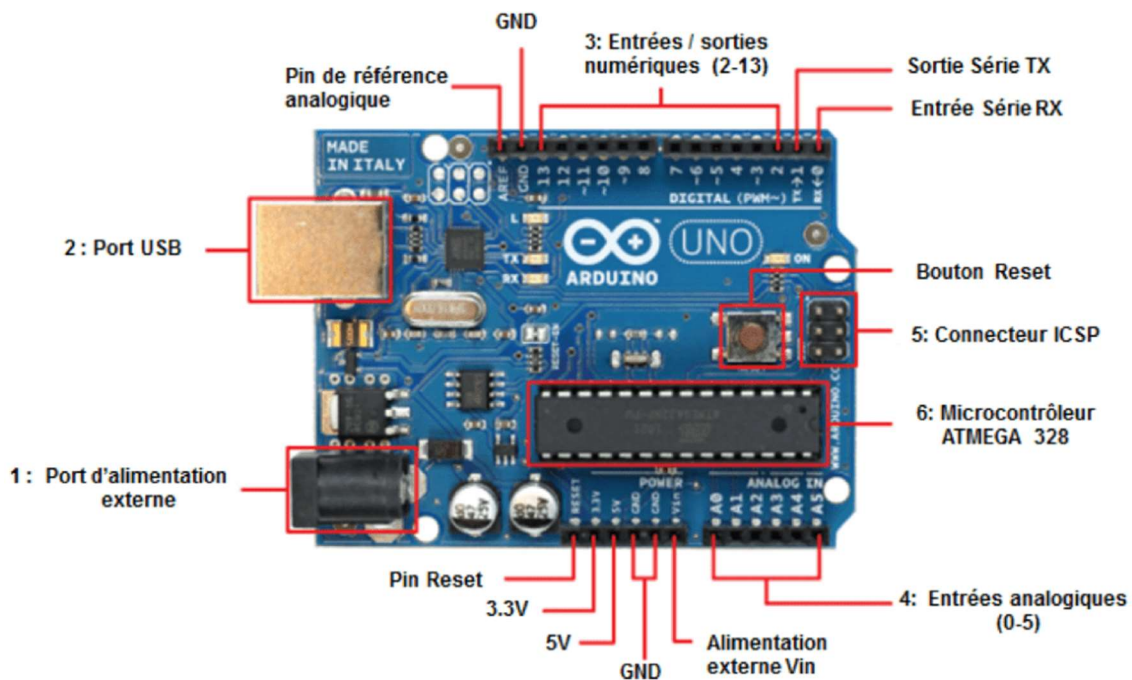


Figure 2.9 : La carte Arduino UNO

La carte Arduino UNO est aujourd'hui fabriquée par plusieurs entreprises sous licence libre, ce qui a permis une large diffusion mondiale. Elle est généralement dotée des éléments suivants :

- **Microcontrôleur principal** : ATmega328P, avec une mémoire flash de 32 kB, une mémoire de 2 kB et une EEPROM de 1 kB.
- **Interface USB** : permet de connecter la carte à un ordinateur pour la programmation et la communication série.
- **Régulateur de tension** : assure une alimentation stable à 5 V à partir d'une source externe (batterie ou adaptateur 7-12 V).
- **Oscillateur à quartz** : 16 MHz, assurant la synchronisation interne du microcontrôleur.
- **Broches d'E/S** : Interface pour capteurs, actionneurs, afficheurs, etc.
  - 14 broches numériques (dont 6 peuvent être utilisées en PWM),
  - 6 entrées analogiques (A0 à A5) pour lire des signaux analogiques.
- **Connecteurs d'alimentation** : 3.3 V, 5 V, GND, Vin.
- **LEDs intégrées** : pour tester les sorties ou indiquer l'état de la carte (notamment la LED "L" connectée à la broche D13).

## 2.5.2. Rôle de l'ARDUINO UNO

Dans la chaîne de mesure développée dans cette maquette pédagogique, l'Arduino UNO joue un rôle essentiel en tant qu'interface numérique entre le circuit de conditionnement du signal (capteur + amplificateur) et le système d'affichage. Il assure les fonctions d'acquisition, de conversion, de traitement et d'affichage du signal analogique issu du capteur de pression, après amplification par l'AD620.

### 2.5.2.1. Acquisition du signal

Le signal de sortie du capteur MPX2200GP, amplifié par l'AD620, est une tension analogique proportionnelle à la pression mesurée. Ce signal est connecté à une des entrées analogiques de l'Arduino UNO (par exemple la broche A0). L'Arduino utilise un convertisseur analogique-numérique (CAN ou ADC) intégré de 10 bits, capable de convertir une tension d'entrée comprise entre 0 V et 5 V en une valeur numérique comprise entre 0 et 1023. Par exemple, une tension de 2,5 V correspondra à une valeur numérique de 512.

### 2.5.2.2. Traitement du signal

Une fois le signal converti en valeur numérique, l'Arduino exécute un traitement logiciel dans son programme (sketch). Ce traitement comprend :

- La conversion de la valeur ADC en tension (V).
- Le calcul de la pression en kPa ou en mmHg à partir de la tension lue, selon la sensibilité du capteur et le gain de l'amplificateur.
- Éventuellement, un lissage ou une moyenne sur plusieurs lectures pour atténuer les perturbations et le bruit.

### 2.5.2.3. Affichage des données

L'Arduino transmet ensuite les valeurs calculées (tension et pression) vers un afficheur LCD 1602 utilisé dans notre maquette, connecté via le bus I2C (broches A4 et A5). Les données peuvent être affichées :

- En volts (V) pour la tension,
- En kilopascals (kPa) pour la pression,
- En millimètres de mercure (mmHg).

Ce retour visuel immédiat permet à l'utilisateur (étudiant ou enseignant) de visualiser les variations de pression en temps réel, rendant l'expérience pédagogique plus interactive et concrète.

### 2.5.3. Caractéristiques de l'ADC 10 bits

L'Arduino UNO intègre un convertisseur analogique-numérique (ADC) essentiel pour l'acquisition des signaux analogiques issus de capteurs. Ce composant permet de transformer une tension analogique continue (variant entre 0 V et 5 V) en une valeur numérique discrète que le microcontrôleur peut ensuite traiter.

#### 2.5.3.1. Résolution de 10 bits

L'ADC de l'Arduino UNO possède une résolution de 10 bits, ce qui signifie qu'il peut représenter  $2^{10} = 1024$  niveaux distincts. La plage de conversion va donc de 0 à 1023. Par exemple, pour une plage de tension d'entrée de 0 à 5 V, chaque pas de quantification vaut :

$$\text{Résolution} = \frac{5V}{1024} \approx 4.88 \text{ mV}$$

Cela signifie qu'une variation de tension de 4,88 mV correspondra à une variation d'une unité dans la valeur numérique lue par l'Arduino.

### 2.5.3.2. Temps de conversion

Le temps nécessaire à l'ADC pour effectuer une conversion est de l'ordre de 100  $\mu$ s, ce qui permet une vitesse de lecture maximale de 10 000 échantillons par seconde. Cela est suffisant pour les applications lentes comme la mesure de pression.

### 2.5.3.3. Multiplexage des entrées

L'ADC est relié à 6 canaux d'entrée analogique (A0 à A5). Grâce à un multiplexeur interne, il peut sélectionner l'une de ces entrées à chaque instant. Cela permet de mesurer plusieurs signaux analogiques avec un seul convertisseur.

## 2.6. L'affichage LCD I2C

L'affichage des résultats joue un rôle essentiel en permettant à l'utilisateur d'observer en temps réel les grandeurs physiques mesurées. Dans le cadre de cette maquette, un écran LCD avec interface I2C a été choisi pour sa simplicité d'intégration, sa faible consommation de broches, et sa lisibilité.

### 2.6.1. L'afficheur LCD 1602

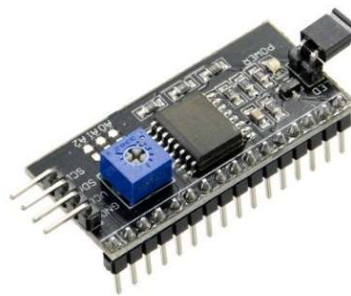
L'afficheur LCD 1602 (Figure 2.10), est un composant largement utilisé dans les systèmes embarqués pour l'affichage de données. Il s'agit d'un écran alphanumérique capable d'afficher 16 caractères sur 2 lignes, ce qui est suffisant pour présenter des informations telles que la tension mesurée (en volts), la pression (en kPa et mmHg), et tout autre paramètre calculé ou utile à l'utilisateur dans le cadre expérimental. Ce type d'afficheur est basé sur le contrôleur HD44780, un standard dans le domaine des écrans LCD [17].



**Figure 2.10 :** L'afficheur LCD 1602

### 2.6.2. Le module d'interface I2C

Afin de faciliter son utilisation avec des microcontrôleurs comme l'Arduino, l'écran est souvent couplé à un module d'interface I2C, généralement basé sur le circuit PCF8574. L'ajout d'un module I2C (Inter-Integrated Circuit) à l'arrière de l'afficheur permet de réduire le nombre de connexions nécessaires à seulement deux lignes de donnée et d'horloge (SDA et SCL), ce qui libère les autres broches de l'Arduino UNO pour d'éventuelles extensions [17].



**Figure 2.11** : Le module I2C

Le module I2C simplifiée permet de libérer des broches sur l'Arduino, chaîner plusieurs dispositifs I2C sur les mêmes lignes et aussi faciliter le câblage et le développement. Il s'utilise avec des bibliothèques dédiées, comme LiquidCrystal I2C, qui permettent une programmation simple pour l'affichage de texte et de variables. Ce composant est donc idéal pour les projets pédagogiques et les maquettes de mesure, car il combine simplicité, efficacité et coût réduit.

## 2.7. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter et de justifier le choix de chaque composant intervenant dans la chaîne de mesure de la maquette pédagogique. Le capteur MPX2200GP a été retenu pour sa sensibilité et sa plage de fonctionnement adaptées à un usage didactique. Le circuit AD620, quant à lui, permet d'amplifier précisément le signal délivré par le capteur. L'Arduino UNO offre une solution simple et efficace pour le traitement du signal, tandis que l'afficheur LCD I2C assure une visualisation claire des résultats.

Tous ces composants forment une chaîne cohérente et optimisée pour une utilisation dans un cadre d'enseignement. Le chapitre suivant sera consacré à la mise en œuvre pratique de cette chaîne, à travers la réalisation physique de la maquette, les tests de fonctionnement et l'affichage des mesures.

**Chapitre 3 :**  
**Réalisation de la maquette**  
**pédagogique**

### 3.1. Introduction

Après avoir présenté, dans les chapitres précédents, les notions théoriques liées à la pression ainsi que les composants matériels constituant la chaîne de mesure, ce chapitre est consacré à la réalisation pratique de la maquette pédagogique et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

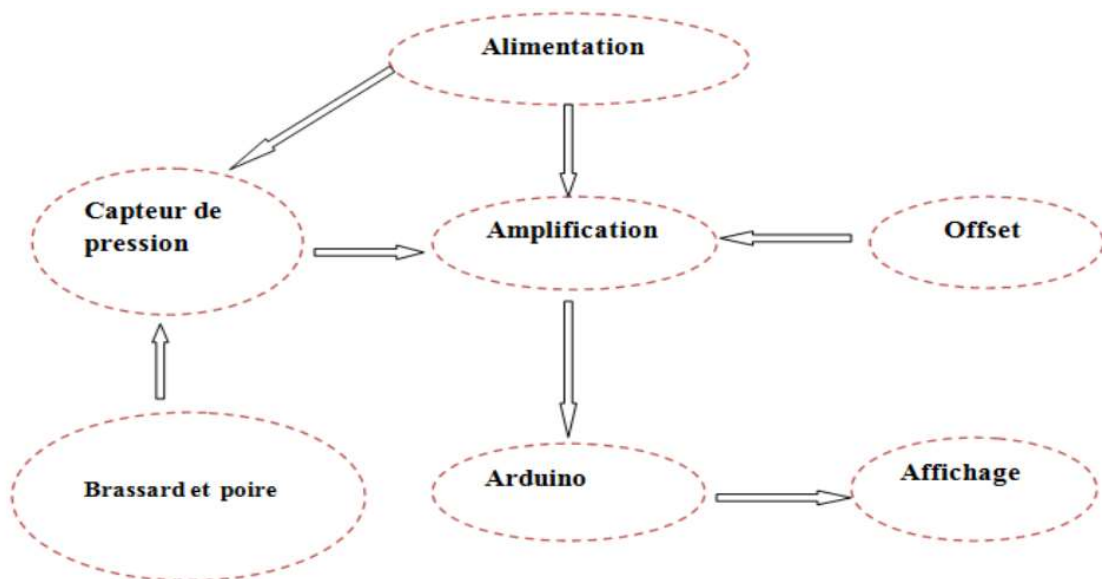
L'objectif est de mettre en œuvre l'ensemble des éléments étudiés : capteur de pression MPX2200GP, amplificateur d'instrumentation AD620, carte Arduino UNO et afficheur LCD I2C afin de construire une chaîne complète d'acquisition.

Dans un premier temps, nous présenterons le schéma bloc général ainsi que le montage pratique de la maquette. Ensuite, nous aborderons l'acquisition des données et leur affichage. Enfin, une étude comparative entre les résultats expérimentaux et les valeurs théoriques sera réalisée.

### 3.2. Schema bloc de la chaine de mesure

#### 3.2.1. Illustration du schéma bloc

Afin de mieux comprendre l'organisation et l'interconnexion des différents éléments constituant la maquette, il est utile de représenter la chaîne de mesure sous forme de schéma bloc (figure 3.1). Celui-ci met en évidence le parcours du signal, depuis la pression appliquée sur le capteur jusqu'à l'affichage numérique sur l'écran LCD.



**Figure 3.1** : Schéma bloc de mesure de pression

### **3.2.2. Description des étapes**

Chaque bloc assure une fonction bien précise : la conversion de la pression en signal électrique, son amplification, son acquisition numérique, son traitement par la carte Arduino UNO, puis enfin sa restitution visuelle à l'utilisateur. Cette représentation simplifiée facilite la compréhension globale du système avant d'aborder la réalisation pratique.

#### **3.2.2.1. Alimentation de laboratoire**

Elle fournit les tensions continues nécessaires au fonctionnement du capteur MPX2200GP (+12 V) et de l'amplificateur AD620 ( $\pm 12$  V). Elle garantit une alimentation stable, indispensable pour la fiabilité des mesures. Et la carte Arduino est alimentée par 5 V obtenue à partir du régulateur 78L05.

#### **3.2.2.2. Source de pression (poire sphygmomanométrique et brassard)**

La poire sphygmomanométrique associée au brassard médical est utilisée pour générer appliquer et lire la pression sur le capteur. En comprimant l'air dans le brassard, on obtient une variation contrôlée de la pression, simulant ainsi différentes conditions de mesure.

#### **3.2.2.3. Grandeur physique (pression appliquée)**

La pression exercée par la poire et transmise au capteur à travers le brassard constitue la grandeur physique mesurée par la maquette.

#### **3.2.2.4. Capteur de pression (MPX2200GP)**

Ce capteur piézorésistif convertit la pression appliquée en une faible tension différentielle proportionnelle à la valeur de la pression.

#### **3.2.2.5. Amplification du signal**

Le signal millivoltique fourni par le capteur est amplifié par l'AD620, afin d'obtenir une tension adaptée à l'acquisition numérique. Grâce à son architecture différentielle, il minimise le bruit et améliore la précision.

#### **3.2.2.6. Conversion analogique-numérique (ADC de l'Arduino UNO)**

Le signal amplifié est envoyé vers une entrée analogique de l'Arduino UNO. Son convertisseur ADC 10 bits transforme la tension analogique en une valeur numérique comprise entre 0 et 1023.

### 3.2.2.7. Microcontrôleur (Arduino UNO)

Le microcontrôleur traite la valeur issue de l'ADC, applique les équations de conversion et calcule la pression correspondante en différentes unités (kPa, mmHg).

### 3.2.2.8. Afficheur LCD avec interface I2C

Le résultat final est affiché sur l'écran LCD 16x2. L'utilisateur visualise directement la tension mesurée ainsi que la pression convertie en unités physiques.

### 3.2.2.9. Offset dans la chaîne de mesure

Le capteur MPX2200GP ne délivre pas une tension de sortie nulle lorsque la pression appliquée est égale à zéro. En effet, comme tous les capteurs piézorésistifs différentiels, il présente une tension d'offset (souvent de l'ordre de quelques millivolts). Cette tension correspond à la sortie électrique du capteur en absence de pression appliquée (pression différentielle nulle).

Cet offset peut avoir plusieurs origines :

- Asymétrie du pont de Wheatstone interne au capteur.
- Tolérances de fabrication des résistances piézorésistives.
- Dérives thermiques dues à la température de fonctionnement.

Dans la pratique et lors de l'amplification par l'AD620, cet offset est lui aussi amplifié, ce qui peut entraîner une erreur de mesure si aucune correction n'est faite. Pour compenser, on effectue généralement une calibration ; on mesure la valeur de l'offset à pression nulle, puis on la soustrait automatiquement des mesures ultérieures dans le programme Arduino.

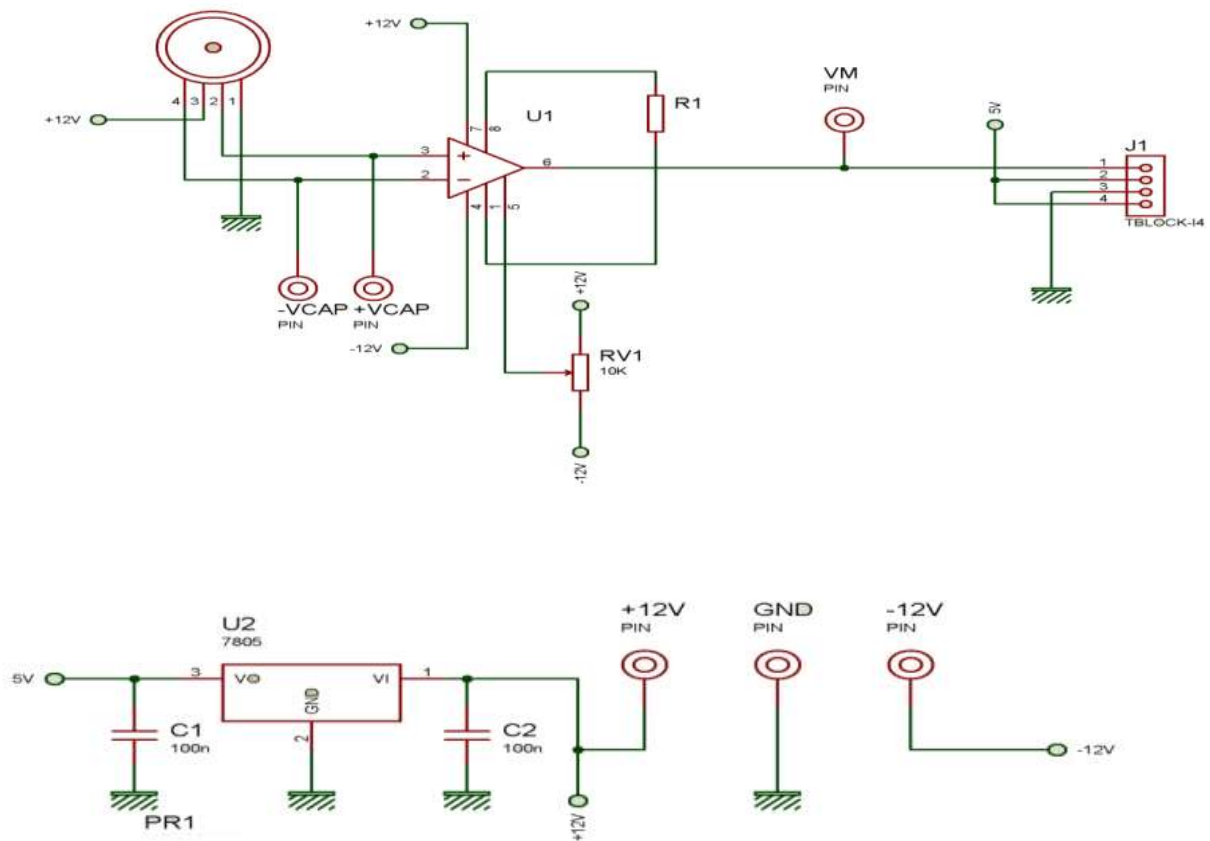
## 3.3. Réalisation pratique de la maquette

### 3.3.1. Circuit électrique détaillé

Après avoir présenté les composants essentiels de la chaîne de mesure et décrit leur rôle respectif, il est nécessaire de passer à l'étape de mise en œuvre pratique. Cette phase consiste à assembler les différents éléments ; capteur, amplificateur, carte Arduino, afficheur LCD et alimentation afin d'obtenir une maquette pédagogique fonctionnelle. L'objectif est de concrétiser l'architecture théorique étudiée dans les sections précédentes et de valider expérimentalement le principe de mesure de la pression.

La figure 3.2 illustre le circuit de conditionnement du capteur de pression MPX2200GP que nous avons réalisé sur Proteus. Le circuit fournit la possibilité de mesurer la tension de sortie du capteur et la sortie amplifiée par l'AD620.

Le circuit est alimenté par une tension de  $\pm 12$  V et la carte Arduino par 5 V obtenue à partir du régulateur 78L05.



**Figure 3.2 :** Schéma électrique détaillé de la maquette

### 3.3.1.1. Alimentation de laboratoire et circuit 78L05

Une alimentation de laboratoire est utilisée pour fournir les tensions continues nécessaires au capteur MPX2200GP et à l'amplificateur AD620, à savoir  $\pm 12$  V. Cependant, la carte Arduino UNO et le module d'affichage LCD fonctionnent sous +5 V. Pour garantir cette tension régulée et stable, un circuit basé sur le régulateur linéaire 78L05 a été intégré. Ce composant convertit une tension d'entrée plus élevée (par exemple +12 V) en une tension fixe de +5 V, adaptée aux circuits logiques et aux modules numériques. L'utilisation du 78L05 permet ainsi de dériver l'alimentation de +12 V déjà disponible, tout en assurant une protection contre les variations de tension et en évitant d'avoir recours à plusieurs sources d'alimentation distinctes. Les capacités C1 et C2 (100 nF) permettent de réduire les fluctuations de la tension à l'entrée et sortie du 78L05 et éliminer les pics de courant.

### 3.3.1.2. Capteur de pression MPX2200 GP

Le capteur de pression MPX2200GP constitue l'élément sensible de la chaîne de mesure, et son câblage doit être réalisé avec soin pour garantir la fiabilité des résultats. Ce composant, est fourni dans un boîtier à 4 broches. La broche 1 est reliée à la masse (GND), tandis que la broche 3 reçoit une tension d'alimentation stable de +12 V fournie par l'alimentation de laboratoire. Les broches 2 et 4 correspondent aux sorties différentielles du pont de Wheatstone interne au capteur. elles délivrent une faible tension proportionnelle à la pression appliquée. Ces deux sorties sont connectées directement aux entrées différentielles IN+ et IN- de l'amplificateur instrumentation AD620.

### 3.3.1.3. Amplificateur d'instrumentation AD620

Le câblage est effectué de manière à exploiter pleinement ses performances.

Les broches 2 (IN-) et 3 (IN+) reçoivent respectivement les signaux de sortie différentielle du capteur.

La broche 5 (REF) est reliée à un potentiomètre du type multitours ajustable à vis 10k (RV1), ce qui fixe la référence de sortie à 0 V. Les broches 4 (-Vs) et 7 (+Vs) assurent l'alimentation symétrique du composant.

La broche 6 (VM) fournit la tension amplifiée, proportionnelle à la pression appliquée sur le capteur, et est ensuite acheminée vers l'entrée analogique de la carte Arduino UNO pour le traitement numérique et l'affichage.

Enfin, la broche 1 ( $R1 = RG = 100 \Omega$ ) est utilisée pour régler le gain de l'amplificateur via une résistance externe connectée entre les broches 1 et 8. Ce câblage précis garantit une amplification adaptée et un signal exploitable pour l'acquisition et l'affichage.

Un atout important dans notre réalisation réside dans la possibilité de modifier facilement la résistance RG connectée entre les broches 1 et 8 de l'AD620. En effet, cette résistance détermine directement le gain de l'amplificateur selon la relation citée en chapitre précédent. Grâce à cette conception, il devient possible d'adapter la sensibilité de la chaîne de mesure en fonction de la plage de pression étudiée ou des besoins pédagogiques. Ainsi, l'utilisateur peut remplacer la résistance par une autre valeur, voire utiliser un potentiomètre, afin d'optimiser l'amplification sans modifier l'ensemble du montage. Cette flexibilité rend la maquette non seulement pratique pour l'expérimentation, mais aussi évolutive pour différentes applications d'enseignement et de démonstration.

#### **3.3.1.4. Carte Arduino UNO**

Dans le montage, la carte Arduino UNO est alimentée en +5 V par la sortie régulée du circuit 78L05 (J2), ce qui garantit une tension stable et adaptée à son fonctionnement.

Les broches d'alimentation VCC (5 V) et GND de l'Arduino sont reliées directement à cette source régulée. Pour l'acquisition du signal, l'entrée analogique A0 reçoit la tension issue de la sortie de l'AD620 VM (J1).

Ce choix de brochage simplifie la lecture des données via le convertisseur analogique numérique (CAN) intégré à l'Arduino. Grâce à cette configuration, l'Arduino assure à la fois la numérisation, le traitement et la communication avec l'afficheur.

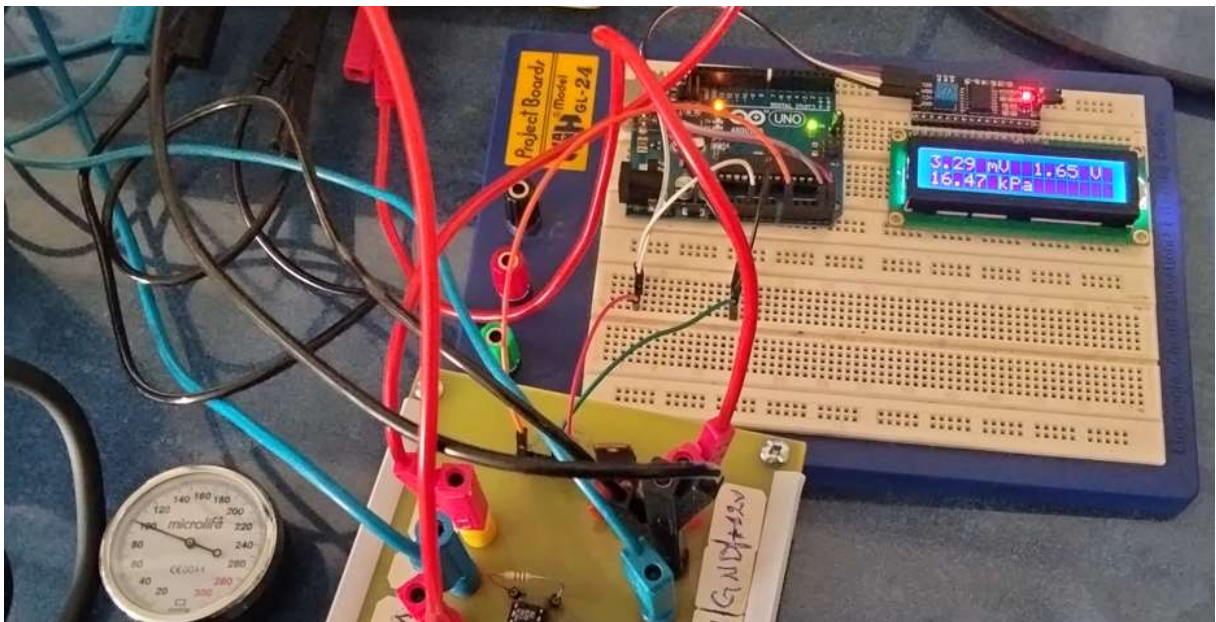
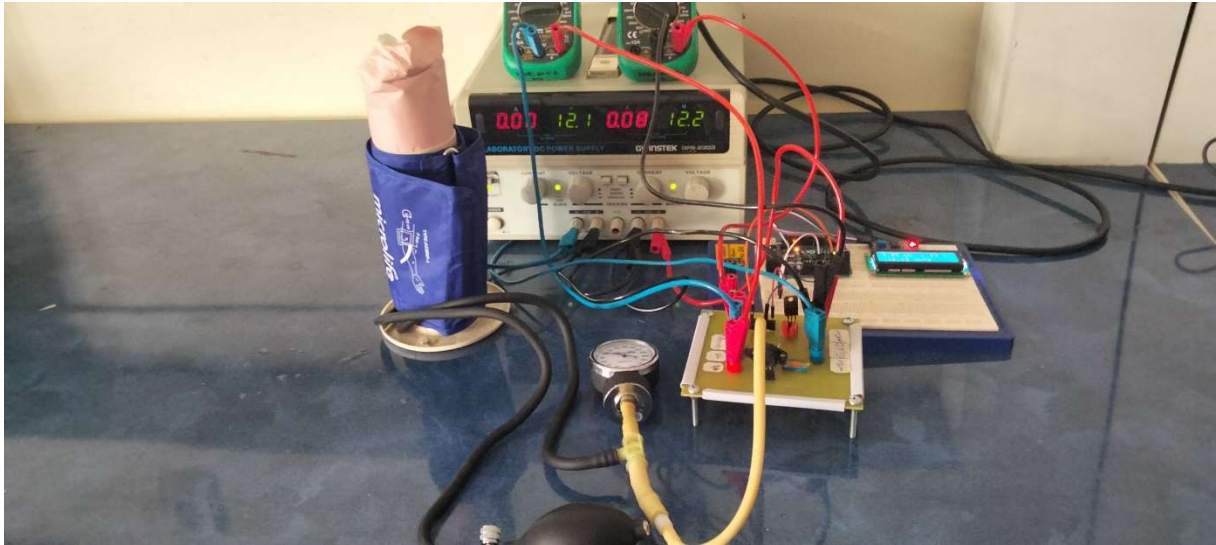
#### **3.3.1.5. Afficheur LCD avec interface I2C**

L'afficheur LCD 16×2, piloté via un module I2C basé sur le PCF8574, est également alimenté en +5 V fourni par le 78L05, avec la broche VCC reliée à la sortie régulée (J4) et la broche GND connectée à la masse commune. Grâce à l'interface I2C, seules deux lignes suffisent pour la communication avec l'Arduino ; SDA et SCL, reliées respectivement aux broches A4 et A5 de l'Arduino.

Ce module inclut également un potentiomètre intégré pour régler le contraste, ainsi qu'un transistor de commande pour le rétroéclairage, ce qui évite d'ajouter des composants externes. Cette solution optimise le câblage, réduit le risque d'erreurs de connexion et facilite l'intégration de l'afficheur dans la maquette pédagogique.

### **3.3.2. Présentation de la maquette réalisée**

La figure 3.3 illustre la maquette pédagogique que nous avons réalisée. On y distingue les principaux éléments de la chaîne de mesure, à savoir le capteur de pression MPX2200GP, le circuit d'amplification basé sur l'AD620, le régulateur 78L05 pour l'alimentation en +5 V, ainsi que la carte Arduino UNO et l'afficheur LCD 16×2 avec module I2C. Cette maquette constitue la base expérimentale permettant de valider le fonctionnement du système et d'effectuer les différentes mesures de pression.



**Figure 3.3 :** Prototype réalisé pour la mesure de pression

### 3.3.3. Calibration

La calibration est une étape essentielle afin d'assurer la correspondance entre la tension de sortie du capteur et les valeurs réelles de pression appliquée. Cependant, en raison des tolérances de fabrication, des décalages d'offset et des imprécisions liées au montage, il est indispensable de procéder à une calibration manuelle ou par code.

La procédure adoptée consiste à appliquer plusieurs pressions connues à l'aide d'une poire sphgmomanométrique et d'un manomètre de référence, puis à relever les tensions correspondantes délivrées par la chaîne de mesure. Ces couples de valeurs (pression réelle, tension mesurée) permettent de tracer une courbe expérimentale. En comparant cette courbe à la relation théorique fournie par le constructeur, il est possible de déterminer les écarts et d'établir une droite d'étalonnage.

### 3.3.3.1. Calibration par code

la calibration par code est une méthode souvent utilisée lorsqu'on travaille avec un microcontrôleur comme l'Arduino. Elle consiste à corriger les erreurs de mesure directement dans le logiciel.

#### ➤ Offset (zéro pression)

Quand aucune pression n'est appliquée (pression =  $P_{amb}$ ), le capteur ne donne pas exactement 0 V mais une petite tension résiduelle. Dans le code, on mesure cette valeur initiale et on la soustrait systématiquement.

```
Float offset = 0.21 ; // tension mesurée sans pression (en volts)
float Vcorrigé = Vmesuree - offset ;
```

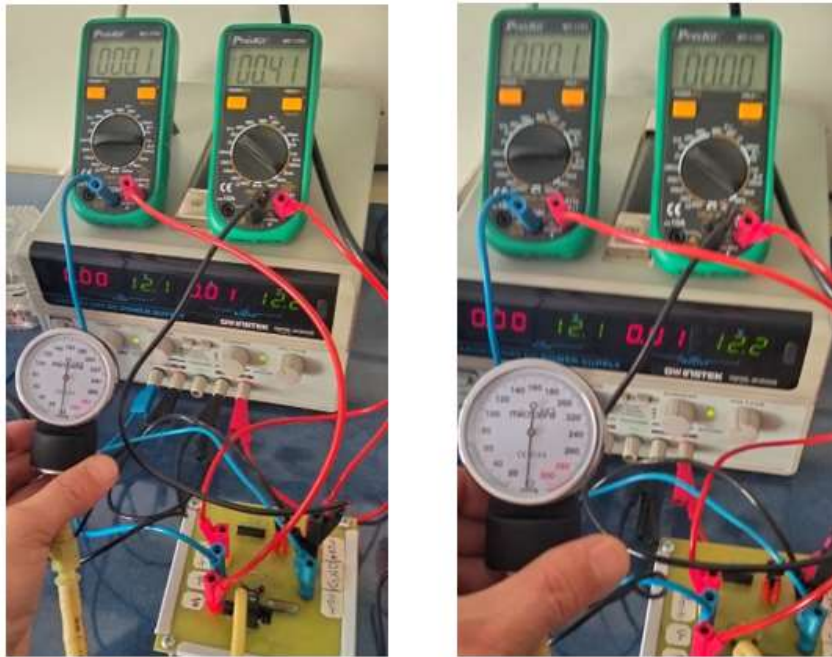
#### ➤ Gain (erreur d'échelle)

Si à 100 mmHg le capteur ne donne pas la tension attendue, on ajuste un facteur d'échelle. Exemple : la théorie prévoit 0,8 V pour 100 mmHg, mais on mesure 0,75 V, on applique un facteur correctif.

```
Float facteur = 0.8 / 0.75;
float Vcalibrée = Vcorrigé * facteur;
```

### 3.3.3.2. Calibration manuelle

Pour une pression nulle ( $P=0$  kPa), nous avons récupéré à la sortie du capteur une très petite tension après l'amplication. Nous avons récupéré une tension voisine de 0,41 V (figure 3.4). Pour ajuster cette tension à 0 V, nous avons utilisé un potentiomètre du type multitours ajustable à vis 10 k $\Omega$ .



**Figure 3.4 :** Mesure de la tension amplifiée à P=0 avant et après calibration

### 3.3.4. Mise à l'échelle

La mise à l'échelle est réalisée au niveau du programme Arduino ; une fonction mathématique (souvent une relation linéaire de type  $P = a \times V + b$ ) est introduite pour convertir automatiquement la tension mesurée en pression exprimée dans différentes unités (mmHg et kPa). Cette étape garantit que les valeurs affichées sur l'écran LCD correspondent fidèlement aux pressions appliquées dans la pratique.

### 3.3.5. Polyvalence de la maquette pédagogique

Un des atouts majeurs de la maquette réalisée réside dans sa polyvalence. En effet, l'architecture conçue autour du conditionnement de signal, de l'amplification par l'AD620 et de l'acquisition par Arduino UNO permet d'intégrer non seulement le capteur MPX2200GP, mais également d'autres capteurs de pression de la même famille (par exemple MPX2100, MPX2010, MPX4250, etc.). Il suffit de remplacer le capteur utilisé par un autre modèle compatible pour adapter la plage de mesure de la maquette sans modifier le reste du circuit.

De plus, cette flexibilité s'étend à différents types de mesures ; pression absolue, relative (ou manométrique) et différentielle, en fonction du capteur MPX sélectionné.

Ainsi, la maquette permet non seulement de varier la plage de pression mesurée, mais aussi d'illustrer aux étudiants la diversité des technologies et applications des capteurs de pression. Cette capacité d'adaptation fait de la maquette une plateforme d'apprentissage évolutive et pédagogique, particulièrement utile pour expérimenter et comparer différents capteurs dans des conditions réelles.

### 3.4. Résultats expérimentaux et discussions

#### 3.4.1. Caractéristiques expérimentales tension vs pression

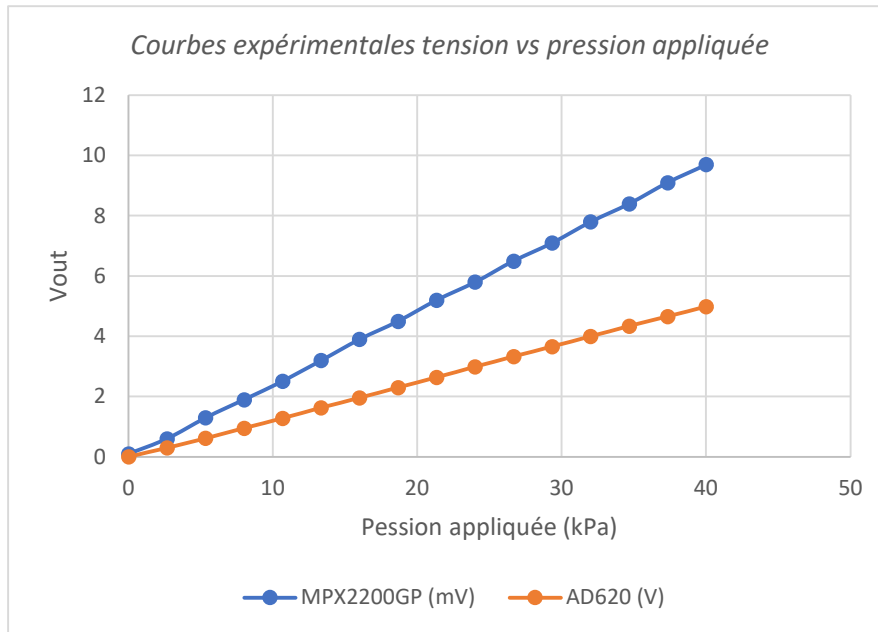
Afin d'établir la caractéristique reliant la pression appliquée à la tension de sortie du capteur, nous avons procédé à une série de mesures expérimentales. Pour cela, différentes valeurs de pression ont été appliquées au capteur à l'aide du système pneumatique (poire sphygmomanométrique et brassard), tandis que les tensions correspondantes ont été relevées en sortie du capteur et de l'amplificateur d'instrumentation AD620. Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus dans la plage 0 – 300 mmHg, qui serviront par la suite à tracer la courbe tension pression et à évaluer la sensibilité expérimentale du capteur.

| P (kPa) | P(mmHg) | Vcap (mV) | Vamp (V) | Sensibilité (mV/kPa) | Gain       |
|---------|---------|-----------|----------|----------------------|------------|
| 0       | 0       | 0.1       | 0        |                      |            |
| 2.666   | 20      | 0.6       | 0.3      | 0.225056264          | 500        |
| 5.332   | 40      | 1.3       | 0.62     | 0.243810953          | 476.923077 |
| 7.999   | 60      | 1.9       | 0.95     | 0.237529691          | 500        |
| 10.665  | 80      | 2.51      | 1.28     | 0.235349273          | 509.960159 |
| 13.332  | 100     | 3.2       | 1.63     | 0.240024002          | 509.375    |
| 15.998  | 120     | 3.9       | 1.96     | 0.243780473          | 502.564103 |
| 18.665  | 140     | 4.5       | 2.3      | 0.241092955          | 511.111111 |
| 21.331  | 160     | 5.2       | 2.64     | 0.243776663          | 507.692308 |
| 23.998  | 180     | 5.8       | 2.99     | 0.241686807          | 515.517241 |
| 26.664  | 200     | 6.5       | 3.33     | 0.243774377          | 512.307692 |
| 29.33   | 220     | 7.1       | 3.66     | 0.242072963          | 515.492958 |
| 31.997  | 240     | 7.8       | 4        | 0.243772854          | 512.820513 |
| 34.663  | 260     | 8.4       | 4.34     | 0.242333324          | 516.666667 |
| 37.33   | 280     | 9.1       | 4.66     | 0.243771765          | 512.087912 |
| 39.996  | 300     | 9.7       | 4.99     | 0.242524252          | 514.43299  |

**Tableau 3.1 :** Variation des tensions de sortie mesurées en fonction de la pression

À partir des valeurs consignées dans le tableau précédent, nous avons tracé la courbe représentant la tension mesurée en fonction de la pression appliquée.

Cette représentation graphique permet de visualiser la relation entre les deux grandeurs et de vérifier le comportement linéaire attendu du capteur MPX2200GP. L'analyse de cette courbe fournit également des informations sur la sensibilité expérimentale du capteur et met en évidence d'éventuels écarts par rapport au modèle théorique.



**Figure 3.5 :** Courbes expérimentales tension mesurée vs pression appliquée

### 3.4.2. Comparaison avec les courbes théoriques

Nous présentons ici une analyse comparative entre les résultats expérimentaux obtenus lors de la réalisation de la maquette et les valeurs théoriques fournies par le constructeur ou calculées à partir des modèles. Cette comparaison permet d'évaluer la fiabilité des mesures, de mettre en évidence les écarts éventuels et d'identifier leurs causes possibles. L'objectif est de vérifier la cohérence globale du système développé et de confirmer sa validité pédagogique.

#### 3.4.2.1. Tableau comparatif

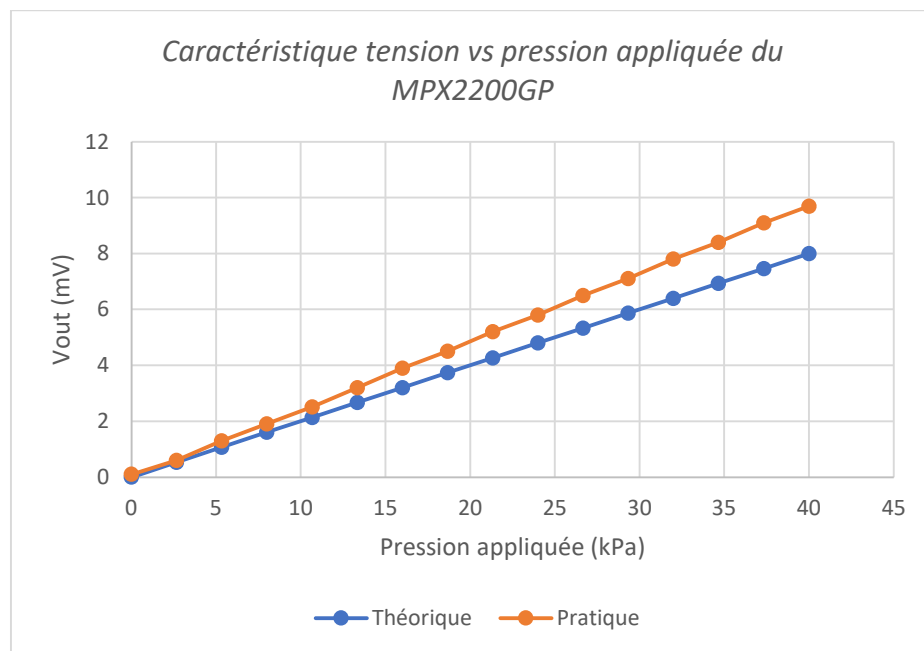
Le tableau suivant présente une comparaison entre les résultats théoriques fournis par le constructeur et ceux obtenus expérimentalement lors de nos mesures.

| Pression |         | Théorique  |           | Pratique  |          |
|----------|---------|------------|-----------|-----------|----------|
| P (kPa)  | P(mmHg) | Vcap (mV ) | Vamp (V)  | Vcap (mV) | Vamp (V) |
| 0        | 0       | 0          | 0         | 0.1       | 0        |
| 2.666    | 20      | 0.5332     | 0.2644672 | 0.6       | 0.3      |
| 5.332    | 40      | 1.0664     | 0.5289344 | 1.3       | 0.62     |
| 7.999    | 60      | 1.5998     | 0.7935008 | 1.9       | 0.95     |
| 10.665   | 80      | 2.133      | 1.057968  | 2.51      | 1.28     |
| 13.332   | 100     | 2.6664     | 1.3225344 | 3.2       | 1.63     |
| 15.998   | 120     | 3.1996     | 1.5870016 | 3.9       | 1.96     |
| 18.665   | 140     | 3.733      | 1.851568  | 4.5       | 2.3      |
| 21.331   | 160     | 4.2662     | 2.1160352 | 5.2       | 2.64     |
| 23.998   | 180     | 4.7996     | 2.3806016 | 5.8       | 2.99     |
| 26.664   | 200     | 5.3328     | 2.6450688 | 6.5       | 3.33     |
| 29.33    | 220     | 5.866      | 2.909536  | 7.1       | 3.66     |
| 31.997   | 240     | 6.3994     | 3.1741024 | 7.8       | 4        |
| 34.663   | 260     | 6.9326     | 3.4385696 | 8.4       | 4.34     |
| 37.33    | 280     | 7.466      | 3.703136  | 9.1       | 4.66     |
| 39.996   | 300     | 7.9992     | 3.9676032 | 9.7       | 4.99     |

**Tableau 3.2 :** Comparaison entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux

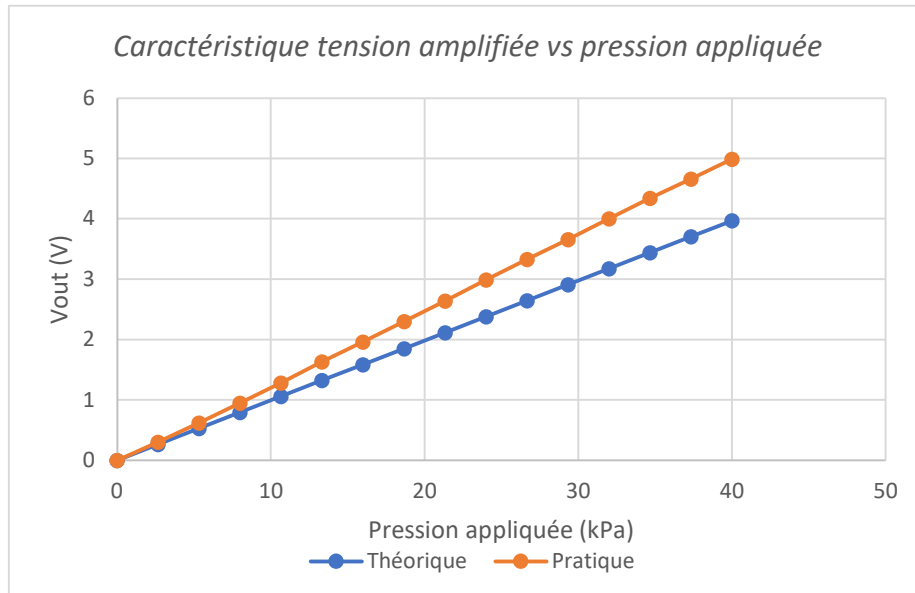
### 3.4.2.2. Caractéristiques tension vs pression

Afin d'évaluer la fidélité du capteur MPX2200GP, nous avons représenté sur un même graphe les courbes théorique et expérimentale de la tension de sortie en fonction de la pression appliquée (Figure 3.6). Cette comparaison visuelle permet de mettre en évidence les écarts observés et de juger la linéarité globale du capteur.



**Figure 3.6 :** Courbes théorique et expérimentale du capteur MPX2200GP

La figure suivante illustre la comparaison entre la réponse théorique attendue de l'amplificateur AD620 et les mesures expérimentales obtenues lors des tests de la maquette.



**Figure 3.7 :** Courbes théorique et expérimentale de l'AD620

### 3.4.3. Interprétation des résultats

#### 3.4.3.1. Sensibilité du capteur

Afin d'évaluer les performances du capteur, nous avons calculé la sensibilité expérimentale à partir des mesures de tension relevées pour différentes pressions appliquées. Pour ce faire, une colonne supplémentaire représentant la sensibilité a été ajoutée au tableau expérimental (Tableau 3.1). Les valeurs obtenues varient entre 0,22 et 0,24 mV/kPa, ce qui montre une bonne cohérence avec la sensibilité nominale indiquée par le constructeur, égale à 0,20 mV/kPa. Cette faible différence peut être attribuée aux imprécisions de mesure ainsi qu'aux tolérances de fabrication du capteur. Globalement, les résultats expérimentaux confirment donc la fiabilité et la justesse du modèle théorique fourni par le fabricant.

#### 3.4.3.2. Gain d'amplification

Concernant l'amplificateur, le gain expérimental a été déterminé pour différentes valeurs de tension en sortie (Tableau 3.1). Les résultats obtenus montrent une variation comprise entre 476 et 516, alors que le gain théorique calculé est de 495. Cette légère dispersion s'explique principalement par la tolérance de la résistance de gain R1 (RG), qui influe directement sur la valeur réelle du gain de l'AD620.

De plus, l'absence de résistances de précision sur le marché local accentue cette différence entre les valeurs expérimentales et théoriques. Malgré ces écarts, l'ordre de grandeur reste cohérent et confirme le bon fonctionnement de l'étage d'amplification.

#### **3.4.3.3. Erreur d'étendue**

L'analyse des résultats expérimentaux montre que, pour des pressions faibles (0 – 5 kPa), la courbe expérimentale suit fidèlement la courbe théorique, traduisant une bonne concordance entre le modèle et la réalité.

Cependant, lorsque la pression appliquée augmente, un écart croissant apparaît entre les deux courbes. Ce type de déviation est connu sous le nom d'erreur d'étendue (*span error*). Il s'agit d'une erreur systématique qui affecte la pente de la caractéristique capteur, entraînant une différence proportionnelle plus marquée aux valeurs élevées de pression. L'origine de cette erreur peut provenir des tolérances de fabrication du capteur, de l'amplificateur ou des résistances de gain, ainsi que des non-linéarités inhérentes au capteur de pression lui-même.

#### **3.4.3.4. Linéarité**

L'examen des courbes expérimentales met en évidence une bonne linéarité entre la pression appliquée et la tension de sortie au niveau du capteur et à la sortie de l'amplificateur. En effet, les points expérimentaux s'alignent globalement sur une droite, ce qui confirme que la relation tension vs pression peut être considérée comme linéaire dans la plage de mesure étudiée. Cette linéarité constitue un atout important, car elle simplifie le processus de calibration et de mise à l'échelle : une simple relation affine suffit pour établir la correspondance entre tension et pression. De plus, la bonne linéarité observée atteste du comportement satisfaisant de la chaîne de mesure réalisée. Par ailleurs, le constructeur du capteur MPX2200GP indique une linéarité typique de l'ordre de  $\pm 0,2$  % de l'étendue. Les résultats expérimentaux obtenus sont en accord avec cette spécification, puisque les courbes mesurées suivent fidèlement le comportement théorique, avec seulement de légères déviations aux fortes pressions. Cela confirme la fiabilité et la validité de la maquette réalisée.

### **3.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la réalisation pratique de la maquette de mesure de pression, en détaillant les différentes étapes de câblage, d'alimentation et d'intégration des composants principaux tels que le capteur MPX2200GP, l'amplificateur instrumentation AD620, la carte Arduino UNO et l'afficheur LCD.

Les essais expérimentaux ont permis de caractériser la relation pression–tension et de vérifier la sensibilité et le gain du système, qui se sont révélés globalement conformes aux spécifications théoriques malgré de légers écarts liés aux tolérances des composants et aux conditions de mesure. La comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux a montré une bonne linéarité de la réponse, avec un écart plus marqué aux fortes pressions (erreur d'étendue). Enfin, cette maquette présente un intérêt pédagogique certain, car elle permet d'expérimenter la mesure de pression et peut être adaptée pour accueillir différents capteurs de la série MPX.

## **Conclusion générale**

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Le présent travail avait pour objectif la conception et la réalisation d'une maquette pédagogique de mesure intégrant un capteur de pression MPX2200GP, un amplificateur d'instrumentation AD620, une carte Arduino UNO et un afficheur LCD I2C. L'approche adoptée a permis de mettre en évidence toutes les étapes de la chaîne de mesure : détection de la grandeur physique, conditionnement du signal, conversion analogique-numérique, traitement et affichage des données.

La réalisation pratique a montré que la maquette fonctionne de manière satisfaisante, avec des résultats expérimentaux globalement cohérents avec les données théoriques du constructeur. Les mesures obtenues ont permis de tracer les caractéristiques tension vs pression et de mettre en évidence la sensibilité ainsi que le gain de la chaîne de mesure. Les écarts observés, notamment à fortes pressions, ont été analysés et attribués aux tolérances des composants ainsi qu'aux limites de linéarité du capteur. Ces résultats illustrent parfaitement aux étudiants les notions de calibration, de mise à l'échelle et d'erreurs de mesure, renforçant ainsi l'intérêt pédagogique du dispositif.

L'un des atouts majeurs de cette maquette est sa modularité. En effet, sa conception permet d'accueillir d'autres capteurs de la famille MPX, qu'ils soient destinés à la mesure de pressions absolues, différentielles ou relatives. Cette polyvalence offre la possibilité de diversifier les expériences pédagogiques et d'élargir les applications du système sans nécessiter de grandes modifications.

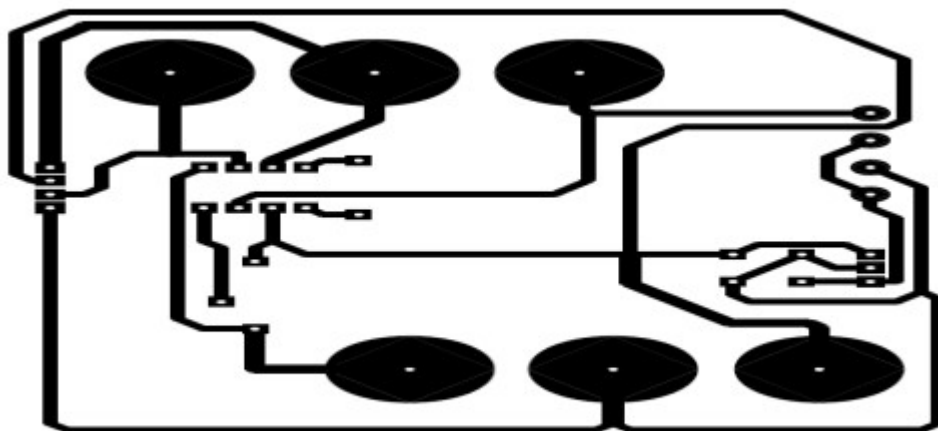
Toutefois, certaines améliorations peuvent être envisagées pour renforcer l'efficacité et l'attractivité de cette maquette. Parmi celles-ci, on peut citer l'intégration d'autres capteurs physiques (température, humidité, rayonnement) afin d'élargir les possibilités pédagogiques, l'utilisation de composants de précision pour réduire les écarts entre résultats théoriques et expérimentaux, la mise en place d'une interface logicielle sur PC pour l'acquisition et l'enregistrement des données en temps réel, permettant une analyse plus approfondie et enfin l'amélioration de l'aspect ergonomique et compact de la maquette pour faciliter son utilisation en travaux pratiques.

En conclusion, cette maquette constitue un outil pédagogique pertinent, fiable et évolutif, permettant aux étudiants de passer de la théorie à la pratique et de mieux appréhender les concepts fondamentaux liés à l'instrumentation et à la mesure. Elle représente ainsi une contribution concrète à l'enrichissement des supports didactiques au sein de la formation en électronique et électrotechnique.

## **Bibliographies**

- [1] Fraden, J, Handbook of Modern Sensors. Springer, 2010.
- [2] Dague, P, Capteurs : principes et applications. Dunod, 2006.
- [3] Bentoumi, H, Chaînes de mesure. Collection Mesures et Instrumentation, 2005.
- [4] Bernard, J, Traitement des signaux de capteurs. Dunod, 2012.
- [5] Andrieu, C, Introduction à la métrologie. Ellipses, 2011.
- [6] G. Asch, Acquisition de données : du capteur à l'ordinateur. Dunod, 2003.
- [7] Neiryneck, J, Introduction aux capteurs. PPUR, 1993.
- [8] K. Hama et S. Mahdjoubi, Détecteur de champ magnétique. Mémoire de projet de fin d'étude, Tlemcen 19 septembre 2017.
- [9] Dr S. Bensaid. Cours capteurs et actionneurs. Bouira, 2014.
- [10] Masson, G, Métrologie appliquée. Dunod, 2014.
- [11] Kester, W, Sensor Signal Conditioning. Analog Devices, 2005.
- [12] H. BUYSE, Cours les capteurs. Université catholique de Louvain, 2008.
- [13] NPX Semiconductors. MPX2200 Séries Data Sheet, <http://www.npx.com>
- [14] Datasheets de Motorola, MPX2200.
- [15] Analog Device, AD620 Low Cost, Low power Instrumentation Amplifier  
<http://www.analog.com/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>
- [16] Banzi. M & Shiloh. M, Getting Started with Arduino (3rd ed.). Maker Media, 2014.
- [17] Documentation technique : LCD 1602 I2C Module.

**Annexe 1 :** Circuit imprimé de mesure de pression sans composants



## Annexe 2 : Code ARDUINO implémenté pour la lecture de la pression

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Adresse I2C (souvent 0x27 ou 0x3F — à adapter si nécessaire)
// Initialisation de l'écran LCD I2C à l'adresse 0x27
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

const int analogPin = A0;          // A0 : Broche analogique utilisée
const float Vref = 5.0;            // Tension de référence de l'ADC
const float sensitivity = 0.24;    // Sensibilité du MPX2200GP : 0.2 mV/kPa = 0.0002 V/kPa
const float gain = 495;            // Gain fixé de l'AD620
const float kPa_to_mmHg = 7.50062; // Conversion de l'Unité de pression kPa >>>> mmHg
const float offset = 0.0;          // Offset de l'AD620 en V (ajuster si besoin)

void setup() {
  lcd.init();
  lcd.backlight();

  // Écran 1
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" Welcome !");
  delay(1000);
  lcd.clear();

  // Écran 2
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Pressure");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" Measurement");
  delay(1000);
  lcd.clear();

  // Écran 3
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" MPX2200GP");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" Pressure sensor");
  delay(1000);
}

void loop() {
  // Calcul de la tension en sortie de l'AD620 (après amplification)
  int valeurADC = analogRead(analogPin);
  float tension = (valeurADC * Vref) / 1023.0;
```

```

// Calcul de la tension en sortie du capteur (avant amplification)
float sensorVoltage = (((tension- offset) / gain)*1000)-0.1;

// Calcul de la pression en kPa et mmHg
float pression_kPa = sensorVoltage / sensitivity;
float pression_mmHg = pression_kPa * kPa_to_mmHg;

// Affichage de la tension après amplification
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print(sensorVoltage, 2);
lcd.print(" mV ");
lcd.print(tension, 2);
lcd.print(" V");

// Affichage de la pression en kPa
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(pression_kPa, 2);
lcd.print(" kPa");
delay(2000); // Rafraîchissement toutes les secondes

// Affichage de la pression en mmHg
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(pression_mmHg, 2);
lcd.print(" mmHg");
delay(2000); // Rafraîchissement toutes les secondes
}

```

## Annexe 3 : Les séries MPX2200

### Freemscale Semiconductor

**200 kPa On-Chip Temperature Compensated Silicon Pressure Sensors**

The MPX2200 series devices are silicon piezoresistive pressure sensor providing a highly accurate and linear voltage output directly proportional to the applied pressure. This sensor is a single monolithic silicon diaphragm with the strain gauge and a thin-film resistor network integrated on-chip. The chip is laser trimmed for precise span and offset calibration and temperature compensation. They are designed for use in applications such as pump/motor controllers, robotics, level indicators, medical diagnostics, pressure switching, barometers, altimeters, etc.

**Features**

- Temperature Compensated Over 0°C to +85°C
- $\pm 0.25\%$  Linearity (MPX2200D)
- Easy-to-Use Chip Carrier Package Options
- Absolute, Differential and Gauge Options

**MPX2200 Series**

0 to 200 kPa (0 to 29 psi)

40 mV Full Scale Span (Typical)

**Application Examples**

- Pump/Motor Control
- Robotics
- Level Detectors
- Medical Diagnostics
- Pressure Switching
- Barometers
- Altimeters

| ORDERING INFORMATION             |                 |          |            |        |      |               |              |          |                |
|----------------------------------|-----------------|----------|------------|--------|------|---------------|--------------|----------|----------------|
| Device Name                      | Package Options | Case No. | # of Ports |        |      | Pressure Type |              |          | Device Marking |
|                                  |                 |          | None       | Single | Dual | Gauge         | Differential | Absolute |                |
| Unibody Package (MPX2200 Series) |                 |          |            |        |      |               |              |          |                |
| MPX2200A                         | Tray            | 344      | *          |        |      |               |              | *        | MPX2200A       |
| MPX2200D                         | Tray            | 344      | *          |        |      |               | *            |          | MPX2200D       |
| MPX2200DP                        | Tray            | 344C     |            |        | *    |               | *            |          | MPX2200DP      |
| MPX2200AP                        | Tray            | 344B     |            | *      |      |               |              | *        | MPX2200AP      |
| MPX2200GP                        | Tray            | 344B     |            | *      |      | *             |              |          | MPX2200GP      |

#### UNIBODY PACKAGES



MPX2200A/D  
CASE 344-15



MPX2200AP/GP  
CASE 344B-01



MPX2200DP  
CASE 344C-01

## Pressure

### Operating Characteristics

Table 1. Operating Characteristics ( $V_S = 10\text{ V}_{DD}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted,  $P_1 > P_2$ )

| Characteristic                             | Symbol                             | Min           | Typ       | Max         | Units            |
|--------------------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------|-------------|------------------|
| Differential Pressure Range <sup>(1)</sup> | $P_{OP}$                           | 0             | —         | 200         | kPa              |
| Supply Voltage <sup>(2)</sup>              | $V_S$                              | —             | 10        | 18          | $V_{DD}$         |
| Supply Current                             | $I_O$                              | —             | 6.0       | —           | mA <sub>dc</sub> |
| Full Scale Span <sup>(3)</sup>             | $V_{FSS}$                          | 38.5          | 40        | 41.5        | mV               |
| Offset <sup>(4)</sup>                      | $V_{OFF}$                          | -1.0          | —         | 1.0         | mV               |
| Sensitivity                                | $\Delta V/\Delta P$                | —             | 0.2       | —           | mV/kPa           |
| Linearity                                  | MPX2200D Series<br>MPX2200A Series | -0.25<br>-1.0 | —         | 0.25<br>1.0 | % $V_{FSS}$      |
| Pressure Hysteresis(0 to 200 kPa)          | —                                  | —             | $\pm 0.1$ | —           | % $V_{FSS}$      |
| Temperature Hysteresis(-40°C to +125°C)    | —                                  | —             | $\pm 0.5$ | —           | % $V_{FSS}$      |
| Temperature Coefficient of Full Scale Span | $TCV_{FSS}$                        | -1.0          | —         | 1.0         | % $V_{FSS}$      |
| Temperature Coefficient of Offset          | $TCV_{OFF}$                        | -1.0          | —         | 1.0         | mV               |
| Input Impedance                            | $Z_{IN}$                           | 1300          | —         | 2500        | $\Omega$         |
| Output Impedance                           | $Z_{OUT}$                          | 1400          | —         | 3000        | $\Omega$         |
| Response Time <sup>(5)</sup> (10% to 90%)  | $t_R$                              | —             | 1.0       | —           | ms               |
| Warm-Up Time <sup>(6)</sup>                | —                                  | —             | 20        | —           | ms               |
| Offset Stability <sup>(7)</sup>            | —                                  | —             | $\pm 0.5$ | —           | % $V_{FSS}$      |

1. 1.0 kPa (kilopascal) equals 0.145 psi.

2. Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device above the specified excitation range may induce additional error due to device self-heating.

3. Full Scale Span ( $V_{FSS}$ ) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.

4. Offset ( $V_{OFF}$ ) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.

5. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.

6. Warm-up Time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the pressure is stabilized.

7. Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

## Pressure

### On-Chip Temperature Compensation and Calibration

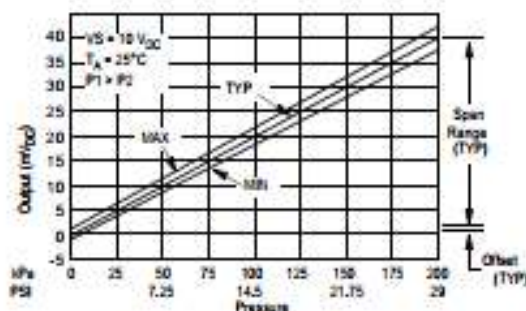


Figure 2. Output vs. Pressure Differential

Figure 2 shows the output characteristics of the MPX2200 series at 25°C. The output is directly proportional to the differential pressure and is essentially a straight line.

The effects of temperature on full scale span and offset are very small and are shown under Operating Characteristics.

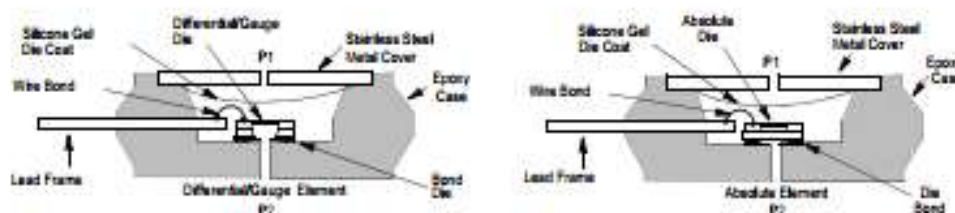


Figure 3. Cross Sectional Diagram (not to scale)

Figure 3 illustrates the differential gauge die in the basic chip carrier (Case 344). A silicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the silicon diaphragm.

The MPX2200 series pressure sensor operating characteristics and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media other than dry air may have adverse effects on sensor performance and long term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

#### LINEARITY

Linearity refers to how well a transducer's output follows the equation:  $V_{OUT} = V_{OFF} + \text{sensitivity} \times P$  over the operating pressure range. There are two basic methods for calculating nonlinearity: (1) end point straight line fit (see Figure 4) or (2) a least squares best line fit. While a least squares fit gives the "best case" linearity error (lower numerical value), the calculations required are burdensome.

Conversely, an end point fit will give the "worst case" error (often more desirable in error budget calculations) and the calculations are more straightforward for the user.

Freescal's specified pressure sensor linearities are based on the end point straight line method measured at the midrange pressure.

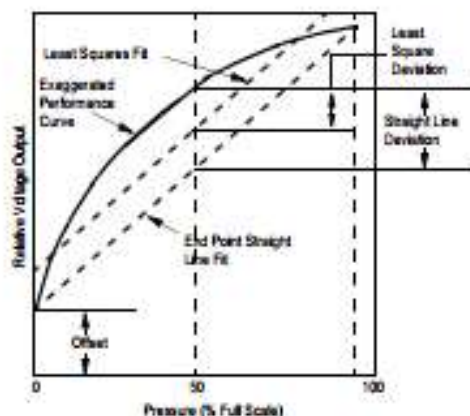
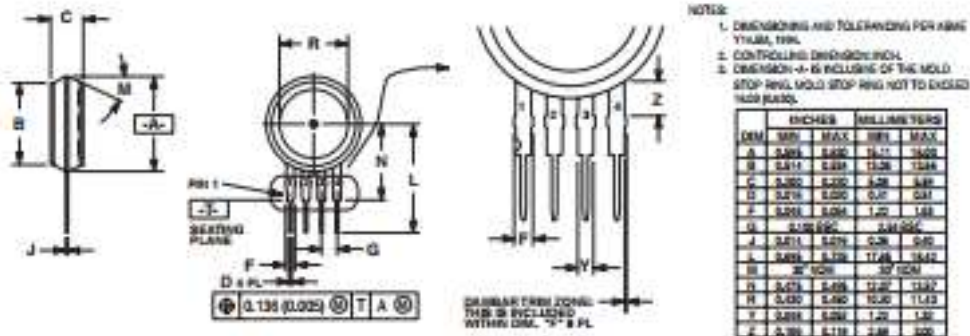


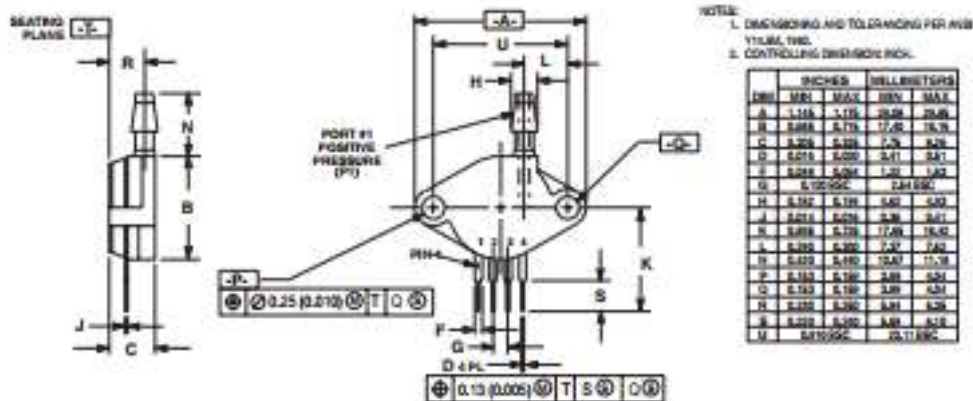
Figure 4. Linearity Specification Comparison

MPX2200

## PACKAGE DIMENSIONS

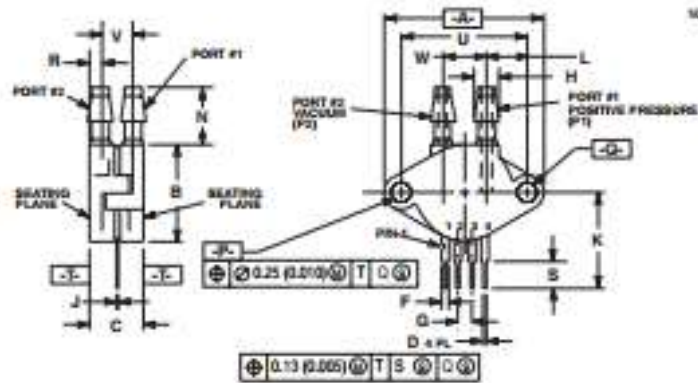


CASE 344-15  
ISSUE AA  
UNIBODY PACKAGE



CASE 344B-01  
ISSUE B  
UNIBODY PACKAGE

## PACKAGE DIMENSIONS



NOTES:  
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.  
2. CONTROLLING DIMENSION IS INCH.

|   | INCHES |       | MILLIMETERS |       |
|---|--------|-------|-------------|-------|
|   | MIN    | MAX   | MIN         | MAX   |
| A | 1.148  | 1.178 | 29.26       | 29.80 |
| B | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| C | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| D | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| E | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| F | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| G | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| H | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| J | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| K | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| L | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| M | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| N | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| P | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| Q | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| R | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| S | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| T | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| U | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| V | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |
| W | 0.488  | 0.518 | 12.40       | 13.15 |

CASE 344C-01  
ISSUE B  
UNIBODY PACKAGE

MPX2200

## Résumé

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'une maquette pédagogique de mesure destinée à l'enseignement de l'instrumentation. La maquette est basée sur un capteur de pression MPX2200GP, un amplificateur d'instrumentation AD620, une carte Arduino UNO et un afficheur LCD I2C. Elle permet d'illustrer les différentes étapes de la chaîne de mesure : détection, conditionnement, conversion analogique-numérique, traitement et affichage. Les résultats expérimentaux obtenus sont globalement en accord avec les données théoriques, avec des écarts attribués aux tolérances des composants et aux limites du capteur. L'intérêt pédagogique de ce travail réside dans la simplicité, la modularité et la polyvalence de la maquette, qui peut être adaptée à d'autres capteurs de la même famille. Des perspectives d'amélioration sont proposées, notamment l'intégration de nouveaux capteurs et la mise en place d'une interface logicielle pour l'acquisition des données.

**Mots clés :** Modèle de capteur - Capteurs - Métrologie - Traitement et affichage.

## Abstract

this thesis presents the design and implementation of a pedagogical measurement prototype intended for instrumentation teaching. The prototype is based on an MPX2200GP pressure sensor, an AD620 instrumentation amplifier, an Arduino UNO board, and an LCD I2C display. It illustrates the different stages of a measurement chain: detection, signal conditioning, analog-to-digital conversion, processing, and display. The experimental results are generally consistent with the theoretical data, with deviations attributed to component tolerances and sensor limitations. The pedagogical value of this work lies in the simplicity, modularity, and versatility of the prototype, which can be adapted to other sensors of the same family. Perspectives for improvement include the integration of additional sensors and the development of a software interface for data acquisition.

**Keywords:** Sensor model - Sensors - Metrology - Processing and display.

## المخلص

يعرض هذا البحث تصميم وإنجاز نموذج تعليمي للقياس موجّه لتدريس علم القياسات. يعتمد النموذج على مستشعر الضغط يوضح هذا العمل LCD I2C . وشاشة عرض ، Arduino UNO وبطاقة ، AD620 ومضخم القياس MPX2200GP ، مختلف مراحل سلسلة القياس : الكشف، تكييف الإشارة، التحويل من التناظري إلى الرقمي، المعالجة والعرض. أظهرت النتائج التجريبية توافقاً عاماً مع القيم النظرية، مع وجود فروق ناتجة عن تسامح المكونات وحدود المستشعر. تكمن القيمة البيداغوجية لهذا العمل في بساطة النموذج وقابليته للتطوير وتعدد استخداماته، حيث يمكن تكييفه مع مستشعرات أخرى من نفس العائلة. كما نقترح تحسينات مستقبلية مثل إدماج مستشعرات إضافية وتطوير واجهة برمجية لاكتساب البيانات.

الكلمات المفتاحية: نموذج المستشعر - أجهزة الاستشعار - علم القياسات - المعالجة والعرض .