



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université de Tissemsilt  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences et de la Technologie



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master  
académique en

Filière : Electronique  
Spécialité : Instrumentation

Présentée par :

Boutechaicha Ilhem

Mellouk Samira Bouchra

***Thème***

---

## **Analyse et compensation des erreurs systématiques dans les instruments électroniques de mesure**

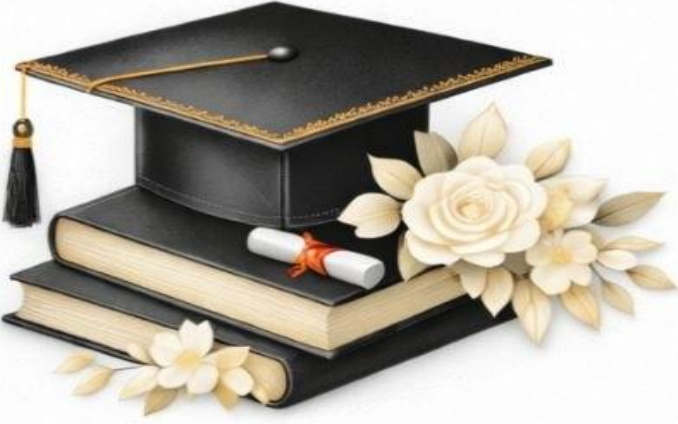
---

Soutenu le, 29/06/2026

**Devant le Jury :**

|                 |           |       |                 |
|-----------------|-----------|-------|-----------------|
| Berbara Djilali | Président | M.C.A | Univ-Tissemsilt |
| Taibi Ahmed     | Encadrant | M.C.A | Univ-Tissemsilt |
| Marich Mohamed  | Examineur | M.C.A | Univ-Tissemsilt |

**Année universitaire : 2025-2026**



## Dédicace

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تتحقق الأمنيات

إلى نفسي الطموحة التي قالت: أنا لها... سأنالها،

وها أنا اليوم أقف على عتبة تخرجي، أقطف ثمار تعبتي، وأرفع قبعتي بكل فخر واعتزاز.

إلى روح أبي الغالي رحمه الله، الذي كان سندي الأول وقودتي في هذه الحياة، رحلت عني، لكنك ما زلت حاضرا في قلبي ودعائي، أسأل الله أن يجعل هذا العمل نورا في قبرك ورفعاً في درجاتك.

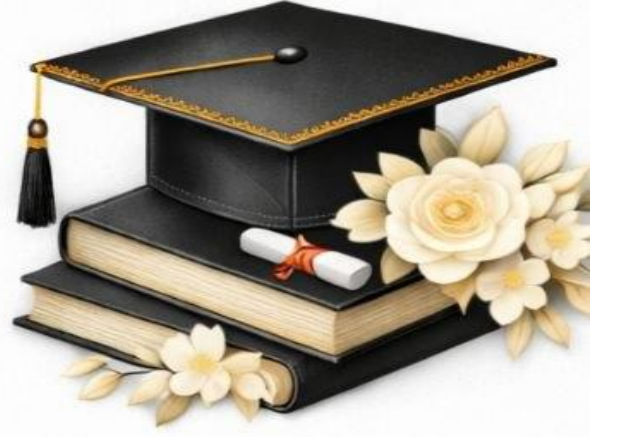
إلى أمي الحبيبة، أطال الله في عمرها، مصدر الحنان وسر النجاح، إليك أهدي ثمرة جهدي، فبفضلك بعد الله وصلت، وبدعائك استمررت.

إلى إخوتي وأخواتي، سندي في هذه الحياة وشركاء فرحتي، دمت لي قوة وعزيمة لا تنتهي.

أهديكم جميعاً هذا العمل المتواضع، تعبيراً عن حبي وامتناني، ورجاء أن أكون قد وفيت ولو جزءاً يسيراً مما تستحقون.



## Dédicace



إلى من يحملان قلبي بين كفيهما، إلى منبع الأمان والدعاء الذي لا ينقطع، والدي العزيزين.. حفظكما  
الله لي ذخرا وسندا.

إلى رفيق درب وشريك الكفاح، من كان لي خير عون وسند في طريقي العلمي، وتحمل معي الصعاب  
لأصل إلى هذا اليوم.. زوجي الغالي.



إلى قطعتي من الجنة، وبسمة غدي، من كان وجوده  
دافعي الأكبر للتفوق والنجاح.. ابني الحبيب.  
إلى من اشتد به عضدي، وكان لي ملاذا وفرحا،  
أخي الغالي "محمد".

إلى من تقاسمت معهن الحلم والضحكات، ووجدت  
في تشجيعهن طاقة لا تنفذ.. أخواتي الغاليات.  
أهديكم جميعا هذا العمل المتواضع ثمرة جهد وصبر،  
فأنتم السند في المشوار، وبكم يكتمل فرح النجاح.





## **Remercîment**

**قال الله تعالى: ((وَقُلْ أَعْمَلُوا بِسِيرِ اللَّهِ عَمَلَكُمْ وَرَسُولِهِ وَالْمُؤْمِنِينَ))**

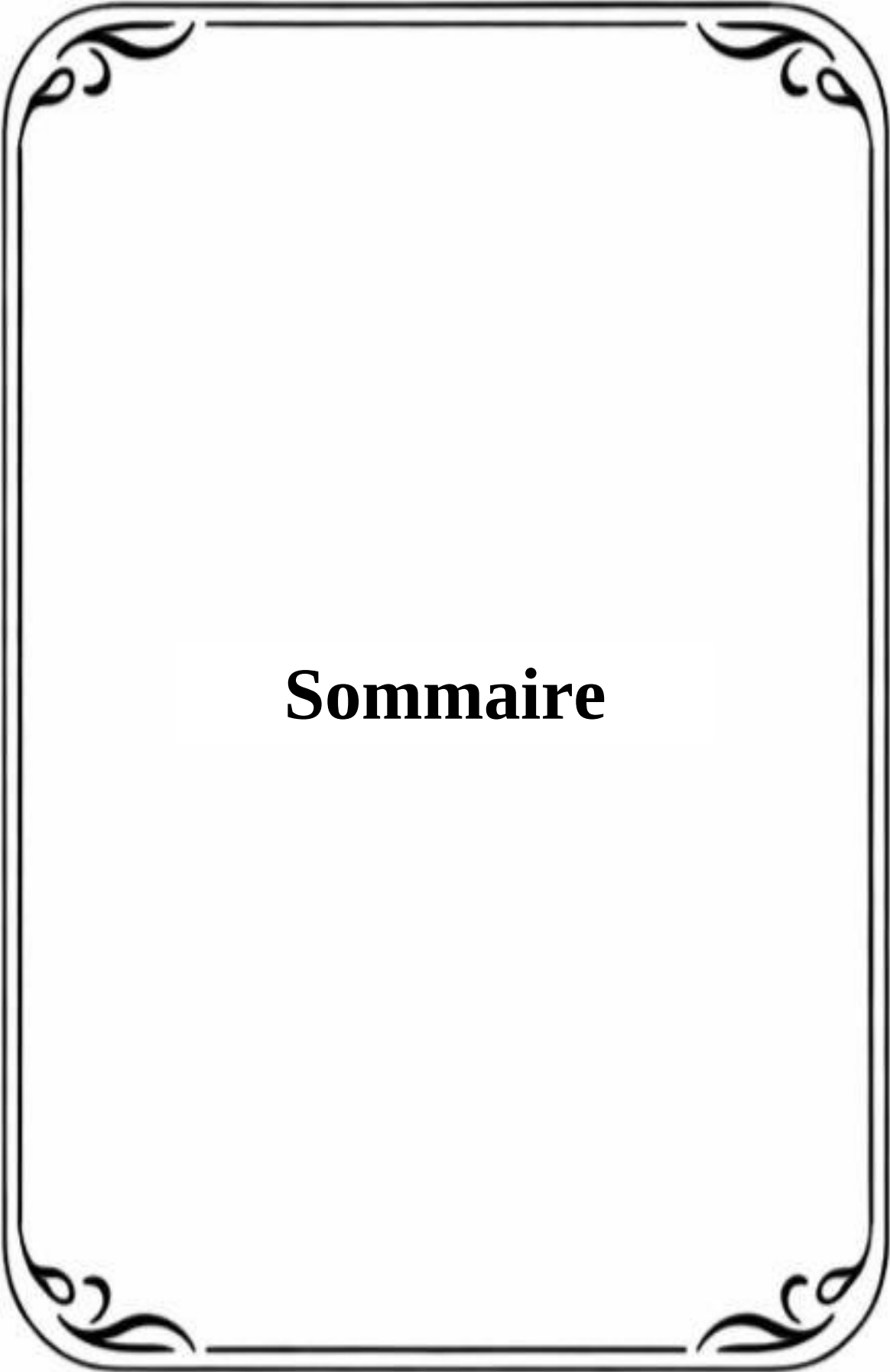
**Tout d’abord, nous rendons grâce à Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce modeste travail. Sans Sa bénédiction, cela n’aurait pas été possible.**

**Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, Monsieur Taibi Ahmed, pour son accompagnement, ses conseils précieux et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire. Sa rigueur scientifique et son soutien constant ont été une source d’inspiration.**

**Nos sincères remerciements vont également aux membres du jury pour l’honneur qu’ils nous ont fait en acceptant d’évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques constructives qui enrichiront notre réflexion.**

**Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce projet : notre famille, nos amies, nos collègues et toutes celles et ceux qui nous ont encouragés et soutenus dans ce parcours.**





# **Sommaire**

## Sommaire

---

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Résumé

Abstract

المخلص

Introduction générale ..... 1

### Chapitre I : Fondements théoriques de l'instrumentation

I.1 Introduction ..... 4

I.2 Rappels sur les instruments de mesure électroniques ..... 5

I.2.1 Les instruments fondamentaux..... 5

I.2.2 Grandeurs mesurées courantes ..... 5

I.2.3 Principe de fonctionnement du multimètre numérique ..... 6

I.2.4 La précision d'un instrument de mesure ..... 7

I.3 Types de signaux (Analogiques, Numériques) ..... 8

I.3.1 Signaux Analogiques (Analog Signals) ..... 8

I.3.2 Signaux numériques (Digital Signals)..... 9

I.3.3 Différences clés & Conversion..... 10

I.3.4 Avantages typiques..... 11

I.4 Architecture d'une chaîne de mesure électronique ..... 11

I.4.1 Capteurs..... 11

I.4.2 Conditionneurs ..... 13

I.4.3 Convertisseur..... 14

I.4.4 Microcontrôleur..... 16

I.4.5 Affichages ..... 16

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| I.4.6 Tableau récapitulai .....                              | 17 |
| I.5 Schéma bloc général d'un système d'instrumentation ..... | 17 |
| I.5.1 Structure de la chaîne de mesure .....                 | 18 |
| I.6 Conclusion.....                                          | 19 |

## Chapitre II : Les erreurs de mesure

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| II.1 Introduction.....                                      | 21 |
| II.2 Définitions et nature des erreurs .....                | 22 |
| II.2.1 Erreurs systématiques .....                          | 22 |
| II.2.2 Erreurs Aléatoires .....                             | 23 |
| II.2.3 Tableau comparatif .....                             | 23 |
| II.3 Caractéristique des instruments de mesure .....        | 24 |
| II.3.1 Gamme de mesure - Etendue de mesure .....            | 24 |
| II.3.2 Courbe d'étalonnage .....                            | 24 |
| II.3.3 Sensibilité.....                                     | 24 |
| II.3.4 Classe de précision – Résolution .....               | 25 |
| II.3.5 Rapidité - Temps de réponse.....                     | 25 |
| II.3.6 Bande passante .....                                 | 25 |
| II.3.7 Grandeur d'influence et compensation.....            | 25 |
| II.4 Les incertitude de mesure .....                        | 26 |
| II.4.1 Erreur absolue - incertitude absolue.....            | 26 |
| II.4.2 Erreur relative - incertitude relative .....         | 26 |
| II.5 Sources principales d'erreurs.....                     | 27 |
| II.5.1 Erreurs du capteur .....                             | 27 |
| II.5.2 Erreurs électroniques.....                           | 27 |
| II.5.3 Erreurs environnementales.....                       | 28 |
| II.6 Formules de propagation d'erreur.....                  | 28 |
| II.6.1 Principe général de la propagation des erreurs ..... | 28 |

## Sommaire

---

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| II.6.2 Opération de base.....                                         | 29 |
| II.7 Représentation graphique des écarts et incertitude .....         | 29 |
| II.7.1 Méthodes graphiques courantes .....                            | 29 |
| II.7.2 Types d'incertitudes représentées .....                        | 30 |
| II.7.2.1 Évaluation de l'incertitude de type A (statistique).....     | 31 |
| II.7.2.2 Évaluation de l'incertitude de type B (non statistique)..... | 32 |
| II.7.3 Expression d'un résultat de mesure .....                       | 33 |
| II.7.4 Incertitude relative d'une mesure.....                         | 33 |
| II.8 Conclusion .....                                                 | 34 |

## Chapitre III : Analyse des erreurs systématiques

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction .....                                                                   | 36 |
| III.2 Origine des erreurs systématiques dans les instruments électroniques de mesure ..... | 37 |
| III.2.1 Causes principales d'erreurs systématiques .....                                   | 37 |
| III.2.2 Manifestation des erreurs systématiques.....                                       | 38 |
| III.2.3 Méthodes d'analyse des erreurs systématiques .....                                 | 38 |
| III.2.4 Type des erreurs.....                                                              | 39 |
| III.3 Erreurs dues aux composants électroniques .....                                      | 41 |
| III.3.1 Tolérance des résistances et condensateur.....                                     | 41 |
| III.3.2 Dérive des amplificateurs opérationnels.....                                       | 41 |
| III.4 Erreurs liées aux capteurs .....                                                     | 41 |
| III.4.1 Non-linéarité .....                                                                | 41 |
| III.4.2 Hystérésis et dérive .....                                                         | 41 |
| III.5 Erreurs de conversion analogique-numérique .....                                     | 42 |
| III.5.1 Erreurs liées aux défauts de la référence .....                                    | 42 |
| III.5.2 Erreurs liées au signal à convertir.....                                           | 43 |

## Sommaire

---

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| III.6 Erreurs de référence et d'étalonnage .....           | 46 |
| III.7 Effets thermiques et environnementaux .....          | 47 |
| III.8 Causes principales .....                             | 48 |
| III.9 Types d'erreurs thermiques .....                     | 48 |
| III.10 Modélisation globale d'une erreur systématique..... | 50 |
| III.10 Conclusion.....                                     | 51 |

### Chapitre IV : Méthodes de compensation

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1 Introduction .....                                                              | 53 |
| IV.2 Principe d'étalonnage et de correction .....                                    | 54 |
| IV.2.1 L'étalonnage .....                                                            | 54 |
| IV.2.2 La correction.....                                                            | 55 |
| IV.3 Méthodes matérielles de compensation.....                                       | 55 |
| IV.3.1 Pont De Wheatstone .....                                                      | 56 |
| IV.3.2 Compensateur .....                                                            | 57 |
| IV.3.3 Filtres .....                                                                 | 58 |
| IV.4 Méthodes logicielles de compensation.....                                       | 59 |
| IV.4.1 Correction algorithmique.....                                                 | 60 |
| IV.4.2 Régression linéaire .....                                                     | 61 |
| IV.4.3 Intelligence artificielle (IA) .....                                          | 61 |
| IV.4.3.1 Applications du Machine Learning en instrumentation électronique ...        | 62 |
| IV.4.3.2 Avantages pour les prédictions et corrections en temps réel.....            | 62 |
| IV.5 Comparaison entre les méthodes matérielles et logicielles de compensation ..... | 64 |
| IV.6 Conclusion.....                                                                 | 65 |

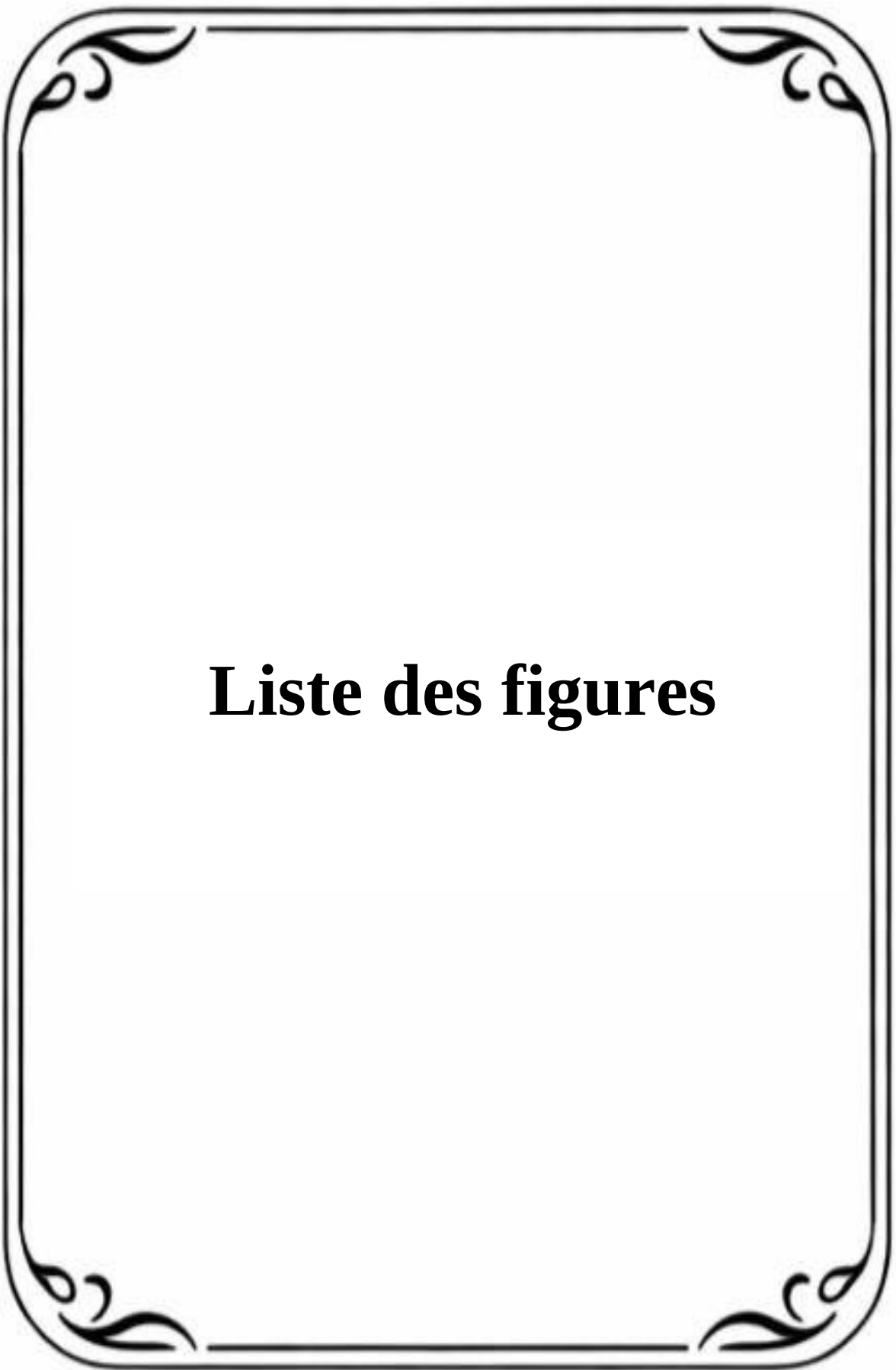
### Chapitre V : Modélisation et simulation

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| V.1 Introduction .....                                       | 67 |
| V.2 Modélisation mathématique des erreurs systématiques..... | 68 |

## Sommaire

---

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| V.2.1 Modèle de l'erreur d'offset (décalage) .....                                       | 68 |
| V.2.2 Modèle de l'erreur de gain .....                                                   | 69 |
| V.2.3 Modèle de l'erreur de Non-linéarité .....                                          | 70 |
| V.2.4 Modèle de la dérive thermique (thermal drift).....                                 | 71 |
| V.2.5 Synthèse des modèles d'erreurs systématiques .....                                 | 72 |
| V.3 Simulation et compensation des erreurs systématiques sous MATLAB/Simulink.....       | 72 |
| V.3.1 Architecture du schéma bloc.....                                                   | 74 |
| V.3.2 Implémentation sous MATLAB/Simulink .....                                          | 75 |
| V.3.2.1 Description des blocs utilisés .....                                             | 75 |
| V.3.2.2 Paramètres de simulation .....                                                   | 75 |
| V.3.3 Résultats de simulation et interprétation.....                                     | 76 |
| V.4 Synthèse des performances de l'algorithme de compensation des erreurs systématiques. | 77 |
| V.5 Conclusion .....                                                                     | 79 |
| Conclusion générale .....                                                                | 81 |
| Bibliographie .....                                                                      | 82 |



## Liste des figures

| Figure                                                                                       | Page |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Figure I.1</b> : Illustration d'une opération de mesure sur une carte électronique        | 4    |
| <b>Figure I.2</b> : Multimètre numérique                                                     | 6    |
| <b>Figure I.3</b> : Représentation de la relation entre justesse et fidélité                 | 7    |
| <b>Figure I.4</b> : Représentation d'un signal analogique en fonction du temps               | 8    |
| <b>Figure I.5</b> : Représentation d'un signal numérique en fonction du temps                | 9    |
| <b>Figure I.6</b> : Comparaison entre un signal analogique et un signal numérique            | 10   |
| <b>Figure I.7</b> : Quelques capteurs utilisés en instrumentation                            | 12   |
| <b>Figure I.8</b> : Principe de fonctionnement d'un capteur                                  | 13   |
| <b>Figure I.9</b> : Principe de fonctionnement d'un conditionneur                            | 14   |
| <b>Figure I.10</b> : Symbole normé du convertisseur analogique numérique                     | 15   |
| <b>Figure I.11</b> : Symbole normé du convertisseur numérique analogique                     | 15   |
| <b>Figure I.12</b> : Constitution d'une chaîne de mesures                                    | 18   |
| <b>Figure II.1</b> : Relation entre la gamme et l'étendue de mesure                          | 24   |
| <b>Figure II.2</b> : Illustration des erreurs typiques d'un capteur                          | 27   |
| <b>Figure II.3</b> : Représentation graphique des écarts et incertitude                      | 30   |
| <b>Figure III.1</b> : Modules de référence de tension utilisés pour l'étalonnage : AD584     | 40   |
| <b>Figure III.2</b> : Caractérisation des erreurs de mesure des capteurs                     | 42   |
| <b>Figure III.3</b> : Repliement du spectre d'un signal sinusoïdal de fréquence $f = 0,9$    | 44   |
| <b>Figure III.4</b> : L'erreur de quantification dans les CAN                                | 46   |
| <b>Figure III.5</b> : Illustration de l'erreur longue lors du processus d'étalonnage         | 46   |
| <b>Figure III.6</b> : Représentation de l'erreur courte observée sur chaque point de mesure  | 47   |
| <b>Figure III.7</b> : Erreur totale résultant de la combinaison des erreurs longue et courte | 47   |
| <b>Figure IV.1</b> : Représentation graphique des valeurs mesurées et ajustées               | 54   |
| <b>Figure IV.2</b> : Schéma du Pont de Wheatstone                                            | 56   |
| <b>Figure IV.3</b> : Exemple de schéma d'un amplificateur différentiel à AOP                 | 57   |
| <b>Figure IV.4</b> : Montage et vue externe de l'AD620                                       | 57   |
| <b>Figure IV.5</b> : Schéma d'un filtre passe-bas RC                                         | 58   |
| <b>Figure IV.6</b> : Schéma d'un filtre actif Sallen-Key                                     | 59   |
| <b>Figure IV.7</b> : Représentation graphique d'une régression linéaire                      | 61   |

## Liste des figures

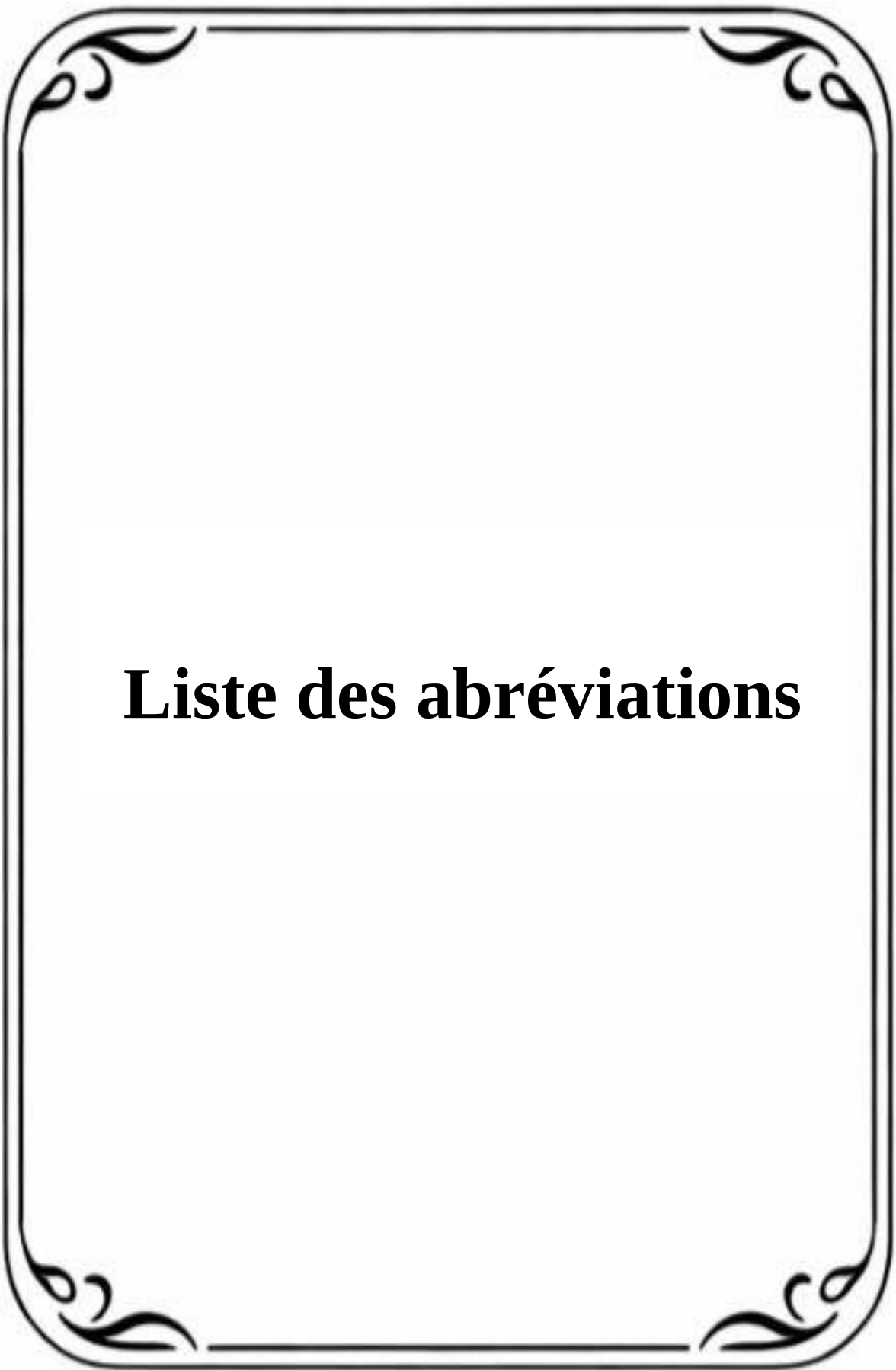
---

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure IV.8 :</b> Processus d'apprentissage du Machine Learning appliqué à la correction des erreurs de mesure | 62 |
| <b>Figure IV.9 :</b> Comparaison des mesures avant et après correction par Machine Learning                       | 63 |
| <b>Figure V.1 :</b> Relation entre $V_{in}$ et $V_{out}$ illustration l'effet de l'erreur d'offset                | 68 |
| <b>Figure V.2 :</b> Effet de l'erreur de gain sur la caractéristique entrée-sortie du système de mesure           | 69 |
| <b>Figure V.3 :</b> Effet de l'erreur de non-linéarité sur la caractéristique entrée-sortie du système de mesure  | 70 |
| <b>Figure V.4 :</b> Évolution du signal en présence d'une dérive thermique en fonction du temps                   | 71 |
| <b>Figure V.5 :</b> Organigramme du processus de simulation et de compensation des erreurs systématiques          | 73 |
| <b>Figure V.6 :</b> Architecture globale du simulateur de compensation sous Simulink                              | 74 |
| <b>Figure V.7 :</b> Comparaison des signaux avant et après compensation                                           | 76 |
| <b>Figure V.8 :</b> Comparaison des erreurs systématiques avant et après la compensation algorithmique            | 77 |



# Liste des tableaux

| <b>Tableau</b>                                                                                          | <b>Page</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Tableau I.1 :</b> Comparaison synthétique entre les signaux analogique et numérique                  | 11          |
| <b>Tableau I.2 :</b> Chaîne typique d'un système de mesure                                              | 17          |
| <b>Tableau II.1 :</b> Comparaison entre l'erreur aléatoire et l'erreur systématique                     | 23          |
| <b>Tableau II.2 :</b> Valeurs du coefficient de Student t pour différents niveaux de confiance          | 32          |
| <b>Tableau III.1 :</b> Influence du nombre de bits sur la tolérance relative de la tension de référence | 43          |
| <b>Tableau IV.1 :</b> Comparaison des méthodes de compensation matérielles et logicielles               | 64          |
| <b>Tableau V.1 :</b> Paramètre de configuration des blocs de simulation                                 | 75          |
| <b>Tableau V.2 :</b> Comparaison des performances avant et après compensation                           | 77          |



# **Liste des abréviations**

## Liste des abréviations

**ADC** : Analog to Digital Converter

**AOP** : Amplificateur Opérationnels

**BIPM** : Bureau International des Poids et Mesures

**CAN** : Convertisseur Analogique Numérique

**CNA** : Convertisseur Numérique Analogique

**CTN** : Coefficient de Température Négatif

**CTP** : Coefficient de Température Positif

**DAC** : Digital to Analog Converter

**IA** : Intelligence Artificielle

**IHM** : Interface Homme Machine

**LSB** : Least Significant Bit

**LCD** : Liquide Crystal Display

**LED** : Light Emitting Diode

**NTC** : Négative Temperature Coefficient

**PE** : Pleine Echelle

**ppm** : parties par million

**ppb** : parties par billion

**PTC** : Positive Temperature Coefficient

**TCR** : Température Coefficient of Résistance

**TOR** : Tout Ou Rien

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'analyse et la compensation des erreurs systématiques dans les instruments de mesure électroniques. L'objectif principal de cette étude est d'améliorer la précision et la fiabilité des mesures en identifiant les principales sources d'erreurs pouvant affecter les systèmes de mesure électroniques, notamment les dérives thermiques, les erreurs de zéro, les erreurs de gain ainsi que certaines imperfections liées aux composants électroniques et à la chaîne de mesure.

Dans un premier temps, ce travail présente les notions fondamentales de l'instrumentation électronique ainsi qu'une étude des différents types d'erreurs de mesure, avec une attention particulière accordée aux erreurs systématiques en raison de leur influence directe sur la justesse des résultats. Ensuite, les principales causes physiques et électroniques de ces erreurs sont analysées afin de mieux comprendre leur comportement et leurs effets sur les performances des instruments de mesure. Par la suite, différentes méthodes de compensation matérielles et logicielles sont étudiées dans le but de réduire l'influence des erreurs systématiques et d'améliorer la qualité métrologique des systèmes électroniques.

Enfin, une phase de modélisation et de simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink est réalisée afin d'évaluer l'efficacité des techniques de compensation proposées. Les résultats obtenus montrent une amélioration significative de la précision des mesures ainsi qu'une réduction importante des écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs réelles.

Ce travail met ainsi en évidence l'importance de la compensation des erreurs systématiques dans le développement des instruments de mesure électroniques modernes et ouvre des perspectives vers l'utilisation de techniques intelligentes pour concevoir des systèmes de mesure plus performants et plus fiables.

### Mots-clés :

Instrumentation électronique, Erreurs systématiques, Compensation, Métrologie, MATLAB/Simulink, Précision des mesures.

## **Abstract**

This thesis focuses on the analysis and compensation of systematic errors in electronic measuring instruments. The main objective of this study is to improve the accuracy and reliability of measurements by identifying the primary sources of errors affecting electronic measurement systems, notably thermal drifts, zero errors, gain errors, as well as certain imperfections related to electronic components and the measurement chain.

Initially, this work presents the fundamental notions of electronic instrumentation along with a study of different types of measurement errors, with particular attention given to systematic errors due to their direct influence on the accuracy of the results. Subsequently, the main physical and electronic causes of these errors are analyzed to better understand their behavior and their effects on the performance of measuring instruments. Following this, various hardware and software compensation methods are studied to reduce the influence of systematic errors and improve the metrological quality of electronic systems.

Finally, a modeling and simulation phase using the MATLAB/Simulink environment is carried out to evaluate the effectiveness of the proposed compensation techniques. The results obtained show a significant improvement in measurement accuracy as well as a substantial reduction in the discrepancies between measured values and real values.

This work highlights the importance of systematic error compensation in the development of modern electronic measuring instruments and opens perspectives toward using intelligent techniques to design more efficient and reliable measurement systems.

### **Keywords :**

Electronic instrumentation, Systematic errors, Compensation, Metrology, MATLAB/Simulink, Measurement accuracy.

## ملخص

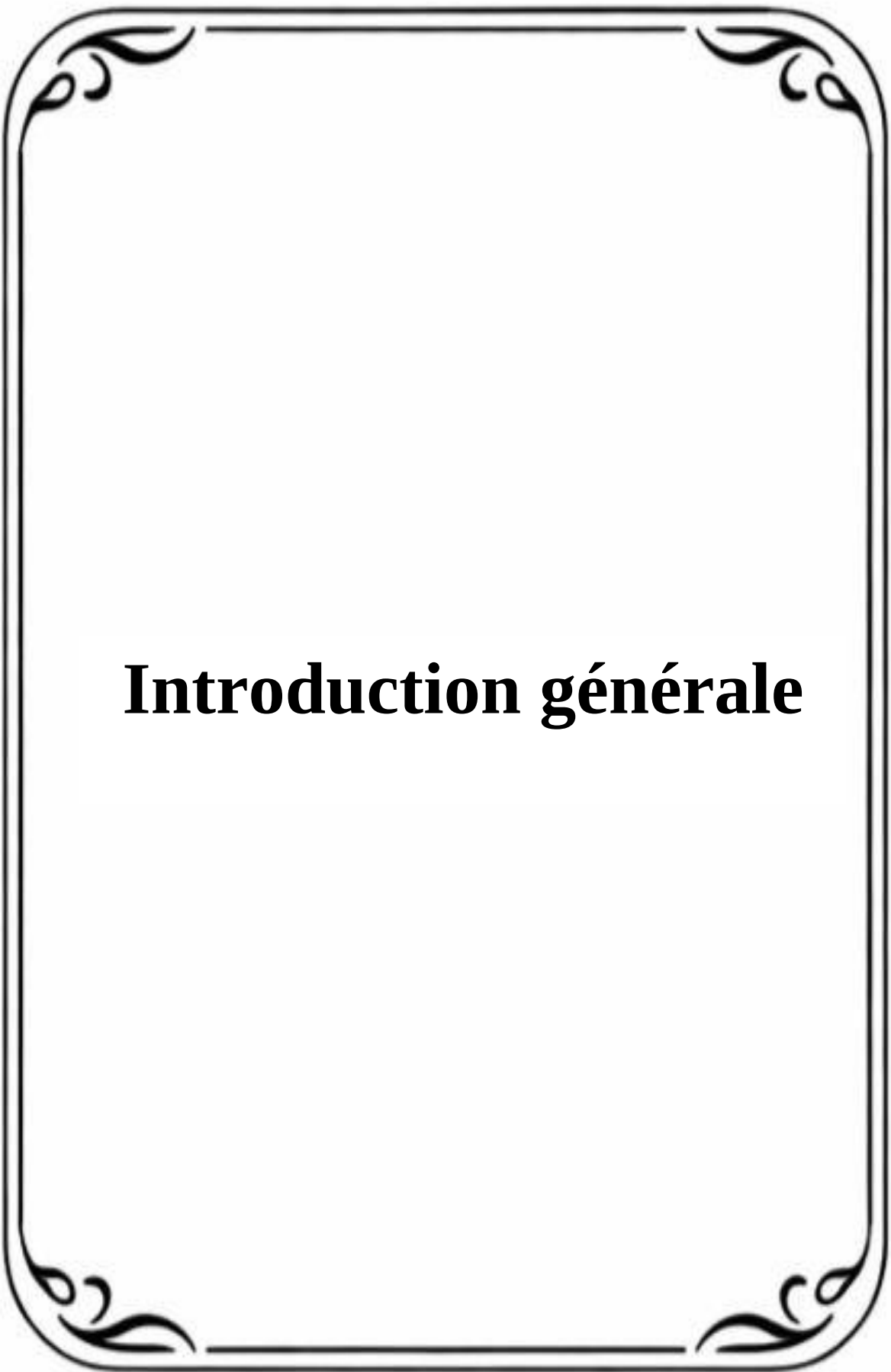
تتناول هذه المذكرة تحليل وتعويض الأخطاء المنهجية في أجهزة القياس الإلكترونية. يكمن الهدف الرئيسي لهذه الدراسة في تحسين دقة وموثوقية القياسات من خلال تحديد المصادر الرئيسية للأخطاء التي يمكن أن تؤثر على أنظمة القياس الإلكترونية. ولا سيما الانحرافات الحرارية، وأخطاء الصفر، وأخطاء الكسب، بالإضافة إلى بعض العيوب المتعلقة بالمكونات الإلكترونية وسلسلة القياس.

في البداية، يقدم هذا العمل المفاهيم الأساسية لأجهزة القياس الإلكترونية بالإضافة إلى دراسة لمختلف أنواع أخطاء القياس، مع إيلاء اهتمام خاص للأخطاء المنهجية نظرا لتأثيرها المباشر على ضبط النتائج. بعد ذلك، يتم تحليل الأسباب الفيزيائية والإلكترونية الرئيسية لهذه الأخطاء من أجل فهم سلوكها وآثارها على أداء أدوات القياس بشكل أفضل. ومن ثم، تتم دراسة طرق تعويض مختلفة، مادية وبرمجية، بهدف تقليل تأثير الأخطاء المنهجية وتحسين الجودة الميتورولوجيا للأنظمة الإلكترونية.

أخيرا، تم إنجاز مرحلة من النمذجة والمحاكاة في بيئة MATLAB/Simulink لتقييم فعاليات تقنيات التعويض المقترحة. أظهرت النتائج المحصل عليها تحسنا ملحوظا في دقة القياسات وتقليصا كبيرا في الفجوات بين القيم المقاسة والقيم الحقيقية. يسلط هذا العمل الضوء على أهمية تعويض الأخطاء المنهجية في تطوير أجهزة القياس الإلكترونية الحديثة، ويفتح آفاقا نحو استخدام التقنيات الذكية لتصميم أنظمة قياس أكثر كفاءة وموثوقية.

## الكلمات المفتاحية:

أجهزة القياس الإلكترونية، الأخطاء المنهجية، التعويض، علم القياس (المتورولوجيا)، MATLAB/Simulink دقة القياسات.



# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'instrumentation électronique occupe aujourd'hui une place importante dans plusieurs domaines scientifiques, industriels et technologiques. Le développement rapide des technologies modernes a fortement augmenté les besoins en mesures précises et fiables. Dans des secteurs comme l'industrie, les télécommunications, le domaine médical et les systèmes automatisés, les instruments de mesure jouent un rôle essentiel dans le contrôle et l'évaluation des grandeurs physiques. La qualité des mesures obtenues influence directement les performances des systèmes ainsi que la fiabilité des résultats [1].

Cependant, malgré les progrès réalisés dans le domaine de l'instrumentation électronique, aucune mesure ne peut être considérée comme parfaitement exacte. Toute mesure présente un écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle de la grandeur étudiée. Ces écarts, appelés erreurs de mesure, peuvent provenir des instruments, des conditions d'utilisation ou de l'environnement extérieur.

Parmi les différents types d'erreurs, les erreurs systématiques représentent l'un des problèmes les plus importants dans la mesure électronique. Contrairement aux erreurs aléatoires, qui varient de manière imprévisible et peuvent être réduites par des méthodes statistiques, les erreurs systématiques apparaissent de façon répétitive et influencent les résultats dans une direction déterminée [2]. Elles peuvent être causées par plusieurs facteurs tels que les dérives thermiques, les défauts de calibration, les imperfections des composants électroniques ainsi que les perturbations de la chaîne de mesure.

Avec l'évolution des systèmes électroniques modernes, la nécessité de développer des instruments de mesure plus performants et plus intelligents devient indispensable. Il est donc important d'identifier les sources d'erreurs et de mettre en œuvre des méthodes efficaces permettant de les corriger. L'objectif ne se limite pas à la détection de l'erreur, mais vise également à proposer des techniques de compensation capables d'améliorer la précision des mesures et de rapprocher les résultats des valeurs réelles [3].

Dans ce cadre, ce mémoire s'intéresse à l'étude des erreurs systématiques dans les instruments de mesure électroniques ainsi qu'aux différentes méthodes utilisées pour leur compensation. Le travail présenté vise à analyser les causes de ces erreurs, à étudier leurs effets sur les performances des systèmes de mesure et à proposer des techniques de correction adaptées.

Afin de mener cette étude de manière progressive et structurée, notre mémoire est organisé en cinq chapitres complémentaires.

Le premier chapitre, intitulé « Les fondamentaux théoriques de l'instrumentation », présente les notions générales liées à la chaîne de mesure ainsi que les principaux paramètres métrologiques tels que la sensibilité, la résolution, la fidélité et la précision. Cette partie permet de mieux comprendre le fonctionnement global des systèmes de mesure et les éléments pouvant influencer leurs performances.

Le deuxième chapitre, intitulé « Les erreurs de mesure », est consacré à l'étude des différents types d'erreurs rencontrés dans les systèmes électroniques. Nous y présentons une classification des erreurs en distinguant les erreurs grossières, les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques, tout en mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs conséquences sur les résultats de mesure.

Le troisième chapitre, intitulé « Analyse des erreurs systématiques », traite plus particulièrement des causes et des origines de ces erreurs. Nous y étudions plusieurs phénomènes physiques et électroniques tels que les dérives, les erreurs de zéro, les erreurs d'échelle, l'hystérésis ainsi que les effets liés aux composants électroniques et aux conditions de fonctionnement.

Le quatrième chapitre, intitulé « Méthodes de compensation », présente différentes techniques permettant de réduire ou de corriger les erreurs systématiques. Nous abordons aussi bien les méthodes matérielles utilisant des circuits électroniques de compensation que les méthodes logicielles basées sur des modèles mathématiques, des polynômes de correction et des tables de conversion.

Enfin, le cinquième chapitre, intitulé « Modélisation et simulation », est consacré à l'aspect pratique de l'étude. À l'aide de l'environnement MATLAB/Simulink, nous réalisons des simulations de systèmes de mesure affectés par des erreurs systématiques afin d'évaluer l'efficacité des méthodes de compensation proposées et de vérifier leurs performances dans différentes conditions de fonctionnement.

À travers ce travail, nous cherchons ainsi à mettre en évidence l'importance de l'analyse et de la compensation des erreurs systématiques dans l'amélioration de la qualité métrologique des instruments électroniques, tout en proposant une approche combinant étude théorique et validation pratique.



**Chapitre I :**  
**Fondements théoriques**  
**de l'instrumentation**

## I.1 Introduction

Dans tout système électronique, la mesure joue un rôle très important pour comprendre le fonctionnement et évaluer les performances. Les instruments de mesure permettent d'obtenir des informations sur les grandeurs électriques, mais en réalité, ces mesures ne sont jamais parfaitement exactes.

En pratique, on constate toujours un écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle. Ces écarts, appelés erreurs, peuvent provenir des instruments de mesure eux-mêmes, des conditions dans lesquelles on effectue la mesure, ou encore de la nature des signaux. Parmi ces erreurs, les erreurs systématiques sont particulièrement importantes, car elles se répètent de manière régulière et influencent directement la précision des résultats. C'est pour cela qu'il est essentiel de bien comprendre les bases de l'instrumentation afin de pouvoir les identifier et les analyser correctement [1].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les principaux instruments de mesure ainsi que leurs caractéristiques. Nous aborderons également les différents types de signaux analogiques et numériques. Enfin, nous expliquerons les éléments qui composent la chaîne de mesure. Tout cela permettra de mieux comprendre et analyser les erreurs dans la suite du travail.

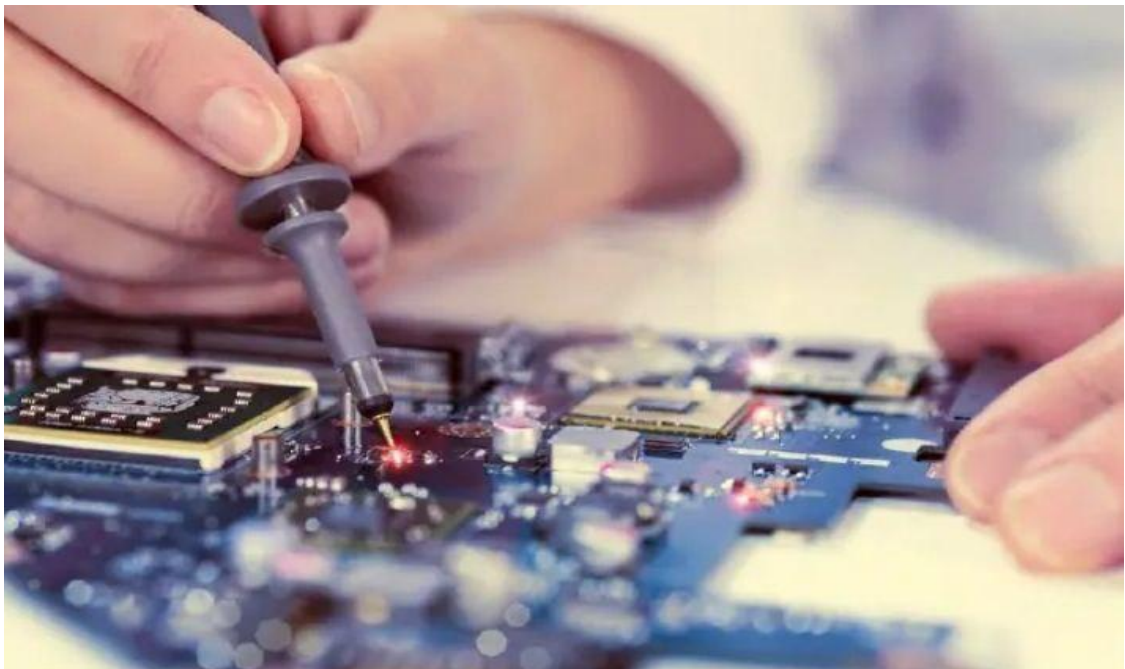


**Figure I.1 :** Illustration d'une opération de mesure sur une carte électronique [4].

## I.2 Rappels sur les instruments de mesure électroniques

Afin de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes de mesure, il est utile de revenir sur quelques notions de base liées aux instruments de mesure électroniques. Cette partie présente les instruments fondamentaux ainsi que les principales grandeurs mesurées dans les systèmes électroniques.

### I.2.1 Les instruments fondamentaux

Il existe dans le monde de l'instrumentation plusieurs appareils utilisés dans les différentes mesures parmi les plus connues les instruments ci-dessous [5] :

- **Voltmètre** : Mesure la tension entre deux points d'un circuit et doit être connecté en parallèle afin de ne pas perturber le circuit. Une mauvaise connexion peut engendrer une erreur de mesure significative.
- **Ampèremètre** : Mesure l'intensité du courant et doit être inséré en série. Une mauvaise manipulation peut non seulement fausser la mesure mais également endommager l'instrument.
- **Ohmmètre** : Permet de mesurer la résistance, généralement hors tension. Toute présence de tension externe peut introduire une erreur systématique dans la mesure.
- **Multimètre** : Regroupe ces différentes fonctions dans un seul appareil. Bien qu'il soit très pratique, son utilisation nécessite une bonne maîtrise afin d'éviter les erreurs liées au mauvais choix de calibre ou de mode de fonctionnement.
- **Wattmètre** : Sert à mesurer la puissance électrique dans un circuit. Il est surtout utilisé en courant alternatif, où la puissance dépend de la tension, du courant et du facteur de puissance. Il doit être correctement branché afin d'éviter toute erreur de mesure.

### I.2.2 Grandeurs mesurées courantes

En électronique, les grandeurs les plus couramment mesurées sont la tension, le courant et la résistance, car elles permettent de comprendre le fonctionnement des circuits :

- **La tension** correspond à la différence de potentiel entre deux points. C'est une grandeur très importante, mais si le voltmètre n'est pas précis ou mal utilisé, cela peut introduire un écart constant dans les résultats.

- **Le courant électrique** représente le déplacement des charges dans un circuit. Sa mesure doit être faite avec précaution, notamment lors de l'insertion de l'ampèremètre, car une mauvaise connexion peut influencer directement la valeur mesurée.
- **La résistance**, quant à elle, traduit l'opposition au passage du courant. Sa mesure peut être affectée par plusieurs facteurs, comme la température ou les caractéristiques propres de l'appareil utilisé.
- **La puissance électrique** est une grandeur dérivée qui représente l'énergie consommée ou fournie par un circuit par unité de temps. Elle dépend de la tension et du courant, et s'exprime généralement par la relation :

$$P = U \times I \times \cos(\varphi) \quad \text{I.1}$$

Sa mesure peut être réalisée directement à l'aide d'un wattmètre ou calculée à partir des grandeurs électriques mesurées.

D'autres grandeurs, telles que la capacité et la fréquence, sont également importantes, surtout dans les systèmes électroniques plus complexes. Leur mesure nécessite souvent des instruments spécifiques, et peut être influencée par le conditionnement du signal. Un mauvais conditionnement peut entraîner des erreurs supplémentaires [1].

### I.2.3 Principe de fonctionnement du multimètre numérique

Le principe de fonctionnement du multimètre numérique repose sur un convertisseur analogique-numérique qui transforme les grandeurs analogiques en valeurs numériques affichées à l'écran. Il est construit autour d'un voltmètre numérique, avec des circuits internes permettant de mesurer le courant et la résistance. Lors de la mesure du courant, celui-ci est converti en tension pour être traité, tandis que pour la résistance, un courant connu est injecté puis la tension obtenue est mesurée. L'utilisateur choisit le type de mesure et le calibre manuellement ou automatiquement selon le modèle.



Figure I.2 : Multimètre numérique [6].

Cependant, ce processus de conversion et de traitement peut être à l'origine d'erreurs systématiques, notamment en raison de la résolution limitée du convertisseur ou d'un mauvais étalonnage. Ainsi, même un instrument numérique peut présenter des écarts par rapport à la valeur réelle [7].

### I.2.4 La précision d'un instrument de mesure

La précision d'un instrument de mesure correspond à sa capacité à fournir une valeur proche de la valeur réelle de la grandeur mesurée. Elle reste un élément très important en métrologie, puisqu'elle influence directement la fiabilité et la qualité des résultats obtenus lors des mesures. Plus l'appareil est précis, plus les résultats sont exploitables et fiables pour l'étude ou l'application.

Dans ce contexte, on peut distinguer plusieurs notions essentielles :

- **La justesse** : elle représente l'absence d'erreurs systématiques. Un instrument est juste lorsque la moyenne des mesures est proche de la valeur réelle. En revanche, lorsqu'il existe un écart constant, on parle de biais de mesure [8].
- **La fidélité** : elle correspond à la capacité d'un instrument à donner les mêmes résultats lors de la répétition des mesures dans les mêmes conditions. Un instrument peut être fidèle mais non juste si toutes les valeurs sont proches entre elles mais éloignées de la valeur réelle.

Pour mieux comprendre la relation entre ces deux notions, on utilise généralement une représentation graphique qui illustre les différents cas possibles.

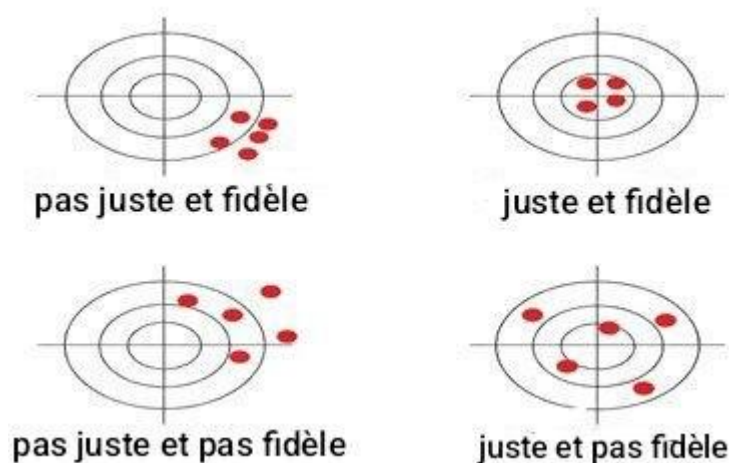


**Figure I.3** : Représentation de la relation entre justesse et fidélité

À travers cette figure, on peut observer plusieurs situations possibles : un instrument peut être à la fois juste et fidèle, juste mais peu fidèle, fidèle mais non juste, ou encore ni juste ni fidèle. Cette représentation permet de mieux comprendre l'origine des erreurs de mesure [9].

- **La sensibilité** : elle correspond à la plus petite variation que l'instrument peut détecter lors d'une mesure. Si la sensibilité est faible, certaines petites variations du signal peuvent ne pas être détectées.

Enfin, l'analyse de ces différentes caractéristiques permet d'évaluer de manière globale les performances d'un instrument de mesure. Elle aide également à identifier les sources d'erreurs afin de les corriger et d'améliorer la qualité des mesures.

### I.3 Types de signaux (Analogiques et Numériques)

Les signaux représentent le support de l'information dans les systèmes électroniques. Leur nature influence directement la qualité des mesures et la présence éventuelle d'erreurs [10].

Les signaux analogiques sont continus et directement liés aux phénomènes physiques, tandis que les signaux numériques sont discrets et codés. Cette différence joue un rôle important dans la propagation et la correction des erreurs.

#### I.3.1 Signaux Analogiques (Analog Signals)

- **Définition** : Un signal analogique est un signal continu qui varie dans le temps et peut prendre une infinité de valeurs continues dans un intervalle donné. Il représente directement une grandeur physique telle que la température, le son ou la lumière. À la différence des signaux discrets, il évolue de manière continue et reflète de façon proportionnelle les variations des phénomènes physiques [10].

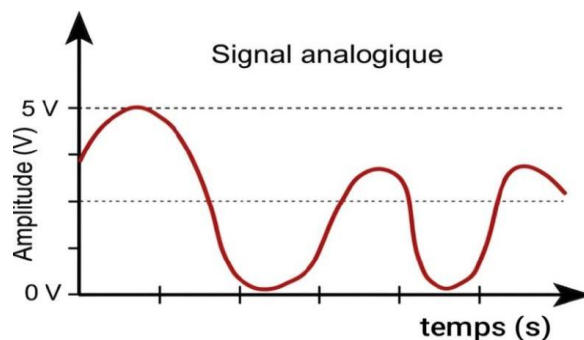


**Figure I.4** : Représentation d'un signal analogique en fonction du temps [11].

- **Caractéristiques principales**

- Continuité : Il est continu dans le temps et en amplitude, sans sauts brusques.
- Infinité de valeurs : Il peut prendre n'importe quelle valeur dans une plage.
- Représentation directe : Il imite directement la grandeur physique qu'il mesure (ex: une onde sonore).
- Sensibilité au bruit : Il est plus sujet aux perturbations (bruit) que les signaux numériques [12].

- **Exemples** : La tension d'une pile, la voix humaine, la température mesurée par un thermomètre à mercure, ou les ondes radio analogiques.

### I.3.2 Signaux numériques (Digital Signals)

- **Définition** : Un signal numérique est une représentation d'informations sous forme de valeurs discrètes et finies (souvent des 0 et des 1) plutôt que continues, le rendant discontinu dans le temps et quantifié en amplitude. Contrairement aux signaux analogiques qui peuvent prendre une infinité de valeurs, les signaux numériques sont codés en bits, permettant un traitement, un stockage et une transmission plus fiables et précis des données, comme le sont les systèmes informatiques.

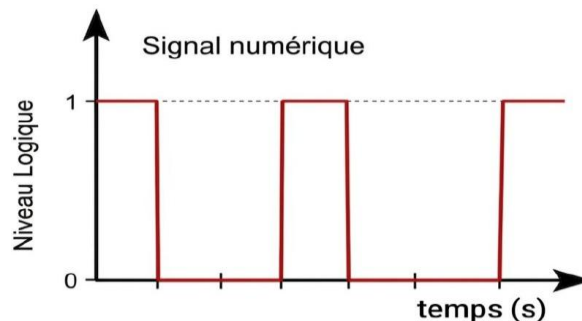


**Figure I.5** : Représentation d'un signal numérique en fonction du temps [11].

- **Caractéristiques principales**

- Discret : Il est discontinu dans le temps, composé de valeurs isolées, contrairement à un signal analogique continu.
- Quantifié : Il ne peut prendre qu'un nombre limité de valeurs (par exemple,  $2^n$  valeurs avec  $n$  bits), ce qui définit sa précision
- Binaire : Souvent basé sur le code binaire (0 ou 1), représentant des états "OFF" (bas) et "ON" (haut).
- Codage : L'information est convertie en une séquence de bits (0s et 1s) pour être traitée par les systèmes informatiques ou embarquées [13].

- **Exemples** : Données d'un ordinateur, fichiers MP3, signaux de télécommunication modernes.

### I.3.3 Différences clés & Conversion

Les signaux analogiques et numériques ont des caractéristiques différentes, mais ils sont souvent utilisés ensemble dans les systèmes électroniques. Pour passer de l'un à l'autre, on utilise des convertisseurs adaptés.

Le convertisseur analogique-numérique (CAN) permet de transformer un signal continu en une valeur numérique exploitable par un système informatique. Cependant, cette transformation n'est pas parfaite, car elle introduit une erreur appelée erreur de quantification. Cette erreur est liée à la précision du convertisseur et peut être considérée comme une erreur systématique [1].

Inversement, le convertisseur numérique-analogique (CNA) permet de reconstruire un signal analogique à partir de données numériques. Toutefois, le signal obtenu reste approximatif, car sa précision dépend du nombre de bits utilisés [14].

#### *Exemple*

- ✓ Lors de l'enregistrement d'un son, le signal capté par un microphone est analogique puis converti en numérique. À l'inverse, lors de la lecture, il est reconverti en signal analogique pour être diffusé par un haut-parleur.

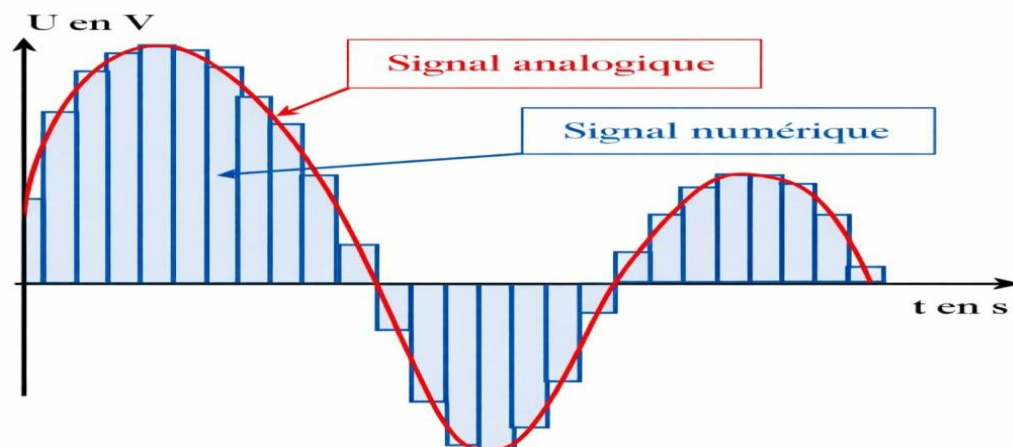


**Figure I.6** : Comparaison entre un signal analogique et un signal numérique [15].

Cette figure illustre la différence entre un signal analogique continu et un signal numérique discret, mettant en évidence la nature lisse du signal analogique et la forme en niveaux du signal numérique [16].

### I.3.4 Avantages typiques

| Type de signal | Points forts principaux                                             |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|
| Analogique     | Représentation naturelle, continu, adapté aux phénomènes physiques. |
| Numérique      | Traitement flexible, correction d'erreur, robustesse au bruit       |

**Tableau I.1** : Comparaison synthétique entre les signaux analogique et numérique [10]

## I.4 Architecture d'une chaîne de mesure électronique

Dans tout système d'instrumentation, l'information issue d'un phénomène physique ne peut pas être utilisée directement. Elle doit passer par une chaîne de traitement structurée permettant sa conversion progressive en une donnée exploitable. Cette chaîne de mesure repose sur cinq blocs essentiels : les capteurs, les conditionneurs, les convertisseurs, les microcontrôleurs et les dispositifs d'affichage. L'ensemble de ces éléments assure l'acquisition, l'adaptation, le traitement et la visualisation de l'information [17].

### I.4.1 Capteurs

Les capteurs constituent le point de départ de toute chaîne de mesure. Leur rôle principal est de transformer une grandeur physique issue de l'environnement (température, pression, lumière, déplacement, etc.) en un signal électrique mesurable.

Ce signal peut être de nature analogique (tension ou courant électrique) ou parfois résistif/capacitif selon le type de capteur utilisé.



**Figure I.7 :** Quelques capteurs utilisés en instrumentation [18].

Cette figure présente quelques exemples de capteurs utilisés dans les systèmes d'instrumentation industrielle, illustrant la diversité des dispositifs de mesure selon les applications.

Le choix d'un capteur dépend de plusieurs critères techniques, notamment :

- La nature de la grandeur à mesurer
- La précision recherchée
- La plage de mesure
- Le temps de réponse
- La sensibilité et la stabilité dans le temps

On distingue généralement deux grandes familles :

- **Capteurs actifs**

Les capteurs actifs produisent directement un signal électrique sans alimentation externe. Ils exploitent des phénomènes physiques permettant une conversion d'énergie. Parmi les effets les plus utilisés, on trouve :

- L'effet thermoélectrique (conversion thermique-électrique),
- L'effet piézoélectrique (pression → tension),

- L'effet photoélectrique,
- L'effet photovoltaïque.

Ces capteurs sont souvent simples à utiliser mais peuvent être sensibles aux perturbations.

- **Capteurs passifs**

Contrairement aux capteurs actifs, les capteurs passifs nécessitent une alimentation externe. Ils ne génèrent pas eux-mêmes de signal mais modifient une grandeur électrique en fonction de la mesure (résistance, capacité ou impédance).

**Exemple**

- ✓ Une thermistance (NTC ou PTC) change sa résistance en fonction de la température, ce qui permet de déduire la valeur mesurée.

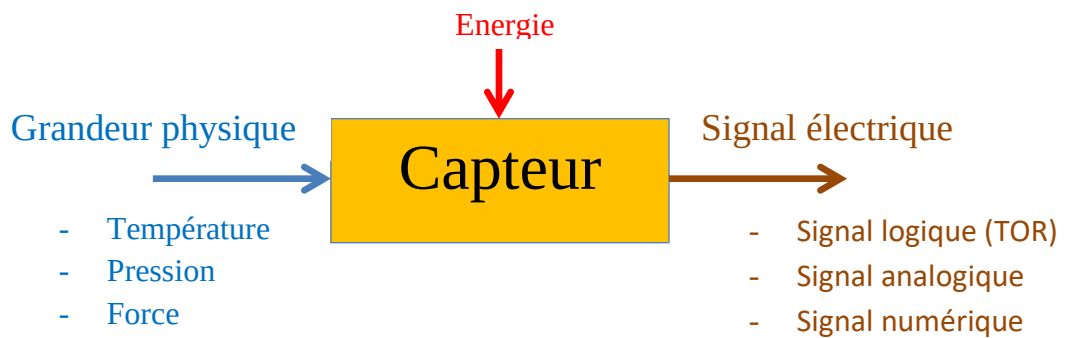


**Figure I.8 :** Principe de fonctionnement d'un capteur

Cette figure illustre le principe général de fonctionnement d'un capteur, en montrant la conversion d'une grandeur physique en un signal électrique exploitable. Ce processus constitue la base de la chaîne de mesure, car il permet d'assurer la liaison entre le monde physique et les systèmes électroniques de traitement [7].

## I.4.2 Conditionneurs

Le conditionneur est le deuxième maillon de la chaîne de mesure. Il représente l'interface entre le capteur et le système d'acquisition de données.

La mise directe des signaux issus du capteur dans les systèmes d'acquisition n'est pas toujours possible. Le conditionnement du signal peut être nécessaire pour le rendre adéquat et

sans danger au système d'acquisition. De plus, plusieurs capteurs ont besoin de compléments externes pour pouvoir effectuer leurs fonctions.

Le conditionneur est un dispositif qui assure la conversion de la grandeur électrique de sortie du capteur en une grandeur électrique exploitable par l'organe de Traitement.



**Figure I.9 :** Principe de fonctionnement d'un conditionneur

Cette illustration montre le principe de fonctionnement d'un conditionneur de signal et le rôle qu'il joue dans le traitement des signaux issus des capteurs [1].

### I.4.3 Convertisseurs

- **Définition**

Les convertisseurs sont des dispositifs électroniques qui permettent de transformer un signal d'une forme à une autre afin de le rendre exploitable dans un système de mesure. Ils assurent l'adaptation des signaux issus des capteurs pour leur traitement, leur transmission ou leur affichage.

- **Rôle des convertisseurs dans les instruments de mesure**

Dans une chaîne de mesure, les convertisseurs jouent un rôle essentiel en adaptant les signaux bruts provenant des capteurs aux exigences des systèmes électroniques. Ils permettent notamment d'améliorer la qualité du signal en réduisant les perturbations (bruit), ainsi qu'en assurant sa compatibilité avec les différents blocs de traitement et de transmission.

- **Types de convertisseurs**

On distingue principalement plusieurs types de convertisseurs utilisés en instrumentation électronique :

- **Convertisseur analogique-numérique (CAN)**

Un convertisseur analogique-numérique CAN est un circuit électronique qui transforme une grandeur analogique continue en une valeur numérique codée sur plusieurs bits. Il constitue

une étape indispensable dans les systèmes de mesure modernes pour permettre le traitement numérique des signaux [19].

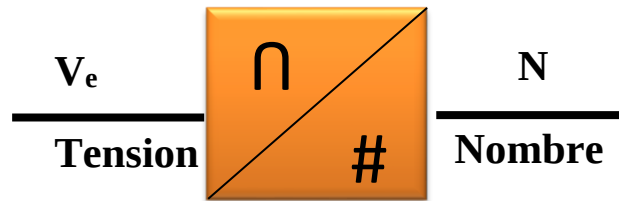


**Figure I.10 :** Symbole normé du convertisseur analogique numérique

Ce schéma représente le symbole du convertisseur analogique-numérique. Le signe  $\cap$  indique que la grandeur d'entrée est de nature analogique, tandis que le signe  $\#$  représente la sortie sous forme numérique, codée et exploitable par un système de traitement.

La relation de quantification peut être exprimée de manière simplifiée par [19] :

$$N = (2^n - 1) \frac{V_e}{V_{ref}} \quad \text{I.2}$$

Où :

- $N$  : valeur numérique
- $V_e$  : tension d'entrée
- $V_{ref}$  : tension de référence
- $n$  : nombre de bits

#### ○ **Convertisseur numérique-analogique**

Le convertisseur numérique-analogique CNA réalise l'opération inverse du CAN. Il transforme une donnée numérique en un signal analogique continu, généralement sous forme de tension ou de courant. Il est utilisé dans les systèmes de commande, de génération de signaux et de restitution de données physiques [19].

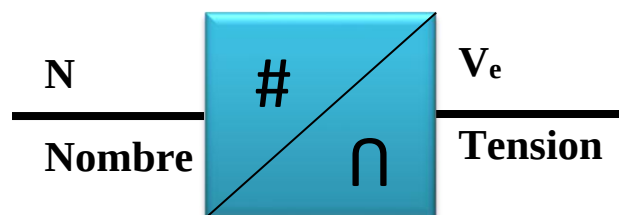


**Figure I.11 :** Symbole normé du convertisseur numérique analogique

La figure suivante illustre le principe de conversion d'une donnée numérique en un signal analogique continu (tension ou courant).

La relation entre la valeur numérique d'entrée et la tension de sortie peut être exprimée comme suit [19] :

$$V_{out} = \frac{N}{2^n - 1} \times V_{ref} \quad \text{I.3}$$

Où :

- $V_{out}$  : tension de sortie analogique
- $N$  : valeur numérique d'entrée
- $n$  : nombre de bits
- $V_{ref}$  : tension de référence

#### **I.4.4 Microcontrôleurs**

Le microcontrôleur est un composant électronique programmable très utilisé dans les systèmes d'instrumentation modernes. Il joue le rôle d'unité de traitement en assurant le contrôle et le traitement des informations issues de la chaîne de mesure.

Dans un système de mesure, il intervient généralement après la conversion analogique-numérique. Il reçoit les données provenant des capteurs sous forme numérique, puis effectue plusieurs opérations comme le traitement des signaux, le calcul, le filtrage ou encore la compensation des erreurs. Il peut également commander d'autres éléments du système, notamment les dispositifs d'affichage ou les interfaces de communication.

Grâce à sa capacité de programmation, le microcontrôleur offre une grande flexibilité d'utilisation et permet d'améliorer la précision ainsi que la fiabilité des instruments électroniques de mesure [20].

#### **I.4.5 Affichages**

L'affichage représente la dernière étape de la chaîne de mesure. C'est à ce niveau que les données traitées sont présentées sous une forme compréhensible pour l'utilisateur. Il joue donc un rôle important, puisqu'il permet d'interpréter facilement les résultats obtenus.

On distingue généralement deux types d'affichage :

- **Affichage analogique** : Il repose sur des dispositifs mécaniques, comme les galvanomètres à aiguille. Ce type d'affichage permet de suivre l'évolution continue du signal, ce qui peut être utile pour observer les variations. Toutefois, il reste moins précis et moins lisible que les systèmes modernes.
- **Affichage numérique** : Les systèmes d'affichage numérique sont largement utilisés dans les systèmes modernes. Ils reposent sur des écrans LCD, LED ou des interfaces homme-machine (IHM). Ils offrent une lecture précise, rapide et facile des valeurs mesurées, tout en assurant une meilleure intégration dans les dispositifs électroniques [21].

#### I.4.6 Tableau récapitulatif

| Bloc             | Rôles principaux                                                                  | Exemples / Types                                   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Capteurs         | Convertir une grandeur physique en signal électrique (actifs ou passifs)          | Actifs (Piézoélectrique) et Passifs (Thermistance) |
| Conditionneurs   | Amplifier, filtrer, adapter, linéariser et sécuriser le signal pour l'acquisition | Amplification, filtrage et protection du signal    |
| Convertisseurs   | Transformer le signal d'une forme à une autre (analogique ↔ numérique)            | CAN (ADC) et CNA (DAC)                             |
| Microcontrôleurs | Unité de traitement, calcul, filtrage et commande du système                      | Composant électronique programmable                |
| Affichages       | Présenter les résultats de mesure de façon compréhensible                         | Analogique (Aiguille) et Numérique (LCD, LED)      |

**Tableau I.2** : Chaîne typique d'un système de mesure [17].

### I.5 Schéma bloc général d'un système d'instrumentation

Le schéma bloc général d'un système d'instrumentation, souvent appelé chaîne de mesure, se compose de plusieurs étapes successives permettant de transformer une grandeur physique (comme la température, la pression, le courant...) en une valeur mesurable et exploitable.

### I.5.1 Structure de la chaîne de mesure

Le flux d'information au sein d'un système d'instrumentation suit un cheminement séquentiel optimisé, permettant de transformer une grandeur physique en une donnée exploitable selon les étapes suivantes [7] :

- **Grandeur physique** : Phénomène d'entrée (température, pression, etc.) constituant la source de l'information à mesurer.
- **Capteur** : Élément primaire assurant la transduction de la grandeur physique en un signal électrique, généralement de faible amplitude.
- **Conditionneur de signal** : Interface d'adaptation réalisant l'amplification, le filtrage et la linéarisation pour garantir la qualité du signal.
- **Convertisseur Analogique-Numérique (CAN)** : Assure le passage vers l'environnement numérique en traduisant le signal en données binaires.
- **Microcontrôleur** : Unité centrale de traitement dédiée aux calculs, au filtrage numérique et à la compensation des erreurs pour affiner la précision.
- **Convertisseur Numérique-Analogique (CNA)** : Restitue un signal analogique à partir des données traitées, essentiel pour le pilotage d'actionneurs ou la commande.
- **Dispositif de présentation** : Assure l'affichage final (numérique ou analogique) ou la transmission des résultats vers un système externe.

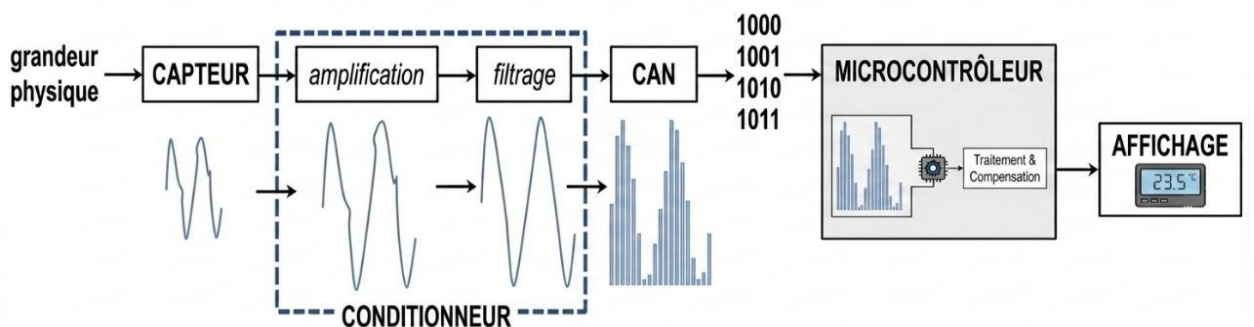


Figure I.12 : Constitution d'une chaîne de mesures [22].

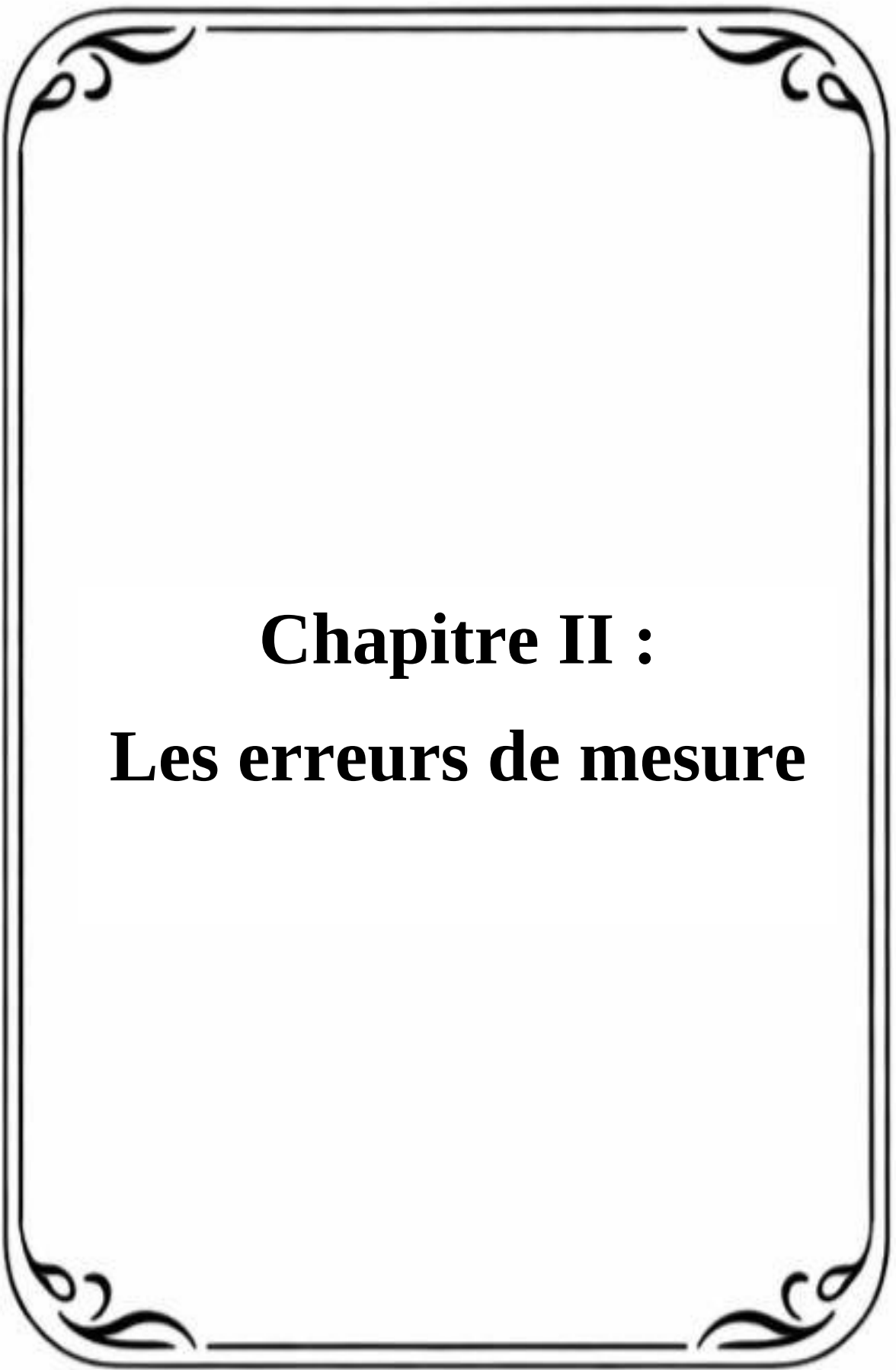
La figure suivante représente le schéma bloc général d'un système d'instrumentation. Elle illustre le cheminement de la chaîne de mesure depuis la grandeur physique jusqu'à l'affichage du résultat, en passant par le capteur, le conditionnement du signal et la conversion analogique-numérique [1]. Bien que ce schéma illustre les blocs fondamentaux, les systèmes d'instrumentation modernes intègrent souvent un microcontrôleur pour le traitement numérique ainsi qu'un CNA pour la restitution des signaux, comme détaillé dans les sections précédentes.

## I.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les notions fondamentales des instruments de mesure électroniques, en abordant les types de signaux, les capteurs ainsi que les principaux blocs d'une chaîne d'instrumentation. Le schéma bloc général a offert une vision globale du processus de mesure, depuis la grandeur physique jusqu'à l'affichage du résultat.

Ainsi, il apparaît que la qualité d'un système de mesure dépend à la fois de la performance de ses composants et de leur interaction. Toutefois, toute chaîne de mesure reste soumise à des imperfections pouvant influencer la précision des résultats [1].

Dans ce contexte, les erreurs de mesure représentent un aspect essentiel en instrumentation. Le chapitre suivant sera donc consacré à leur étude, ainsi qu'à leurs différentes sources et leur impact sur la fiabilité des mesures.



## **Chapitre II :**

# **Les erreurs de mesure**

## II.1 Introduction

Dans le domaine de l'électronique, la mesure dépasse la simple lecture d'un chiffre sur un écran ; c'est une interaction complexe entre un phénomène physique et un instrument. Comme il est théoriquement impossible d'atteindre la valeur « vraie » absolue d'une grandeur, comprendre l'écart entre ce que nous mesurons et la réalité devient la base de la crédibilité de toute recherche scientifique.

Ce chapitre a pour objectif de présenter une étude structurée des erreurs de mesure et de leur gestion. Nous commencerons par distinguer les erreurs systématiques des erreurs aléatoires afin d'en comprendre l'origine et le comportement. Ensuite, nous passerons à l'examen des caractéristiques des instruments, telles que la sensibilité, la précision et la résolution, qui définissent la qualité du matériel utilisé.

Nous consacrerons également une partie importante au calcul de l'incertitude (Type A et B) et à la manière dont ces erreurs se propagent lors des opérations mathématiques. Enfin, nous aborderons les méthodes correctes pour représenter les résultats graphiquement et les rédiger sous une forme scientifique rigoureuse. Maîtriser ces concepts est ce qui nous permettra, par la suite, de transformer une simple lecture en un résultat fiable, prêt pour les étapes de modélisation et de traitement [2].

## II.2 Définitions et nature des erreurs

Les erreurs de mesure représentent la différence entre une valeur mesurée et la valeur de référence, qui reste généralement inconnue en pratique.

En métrologie, l'erreur de mesure s'exprime par la relation

$$\Delta = X - R \quad \text{II.1}$$

Où  $X$  est la valeur mesurée et  $R$  la valeur de référence. Cette erreur peut être positive ou négative et n'est pas toujours directement quantifiable sans référence fiable [8].

Les erreurs de mesure sont inévitables et se classent selon leur comportement en deux catégories principales : les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires [2].

### II.2.1 Erreurs systématiques

Pour une valeur donnée du mesurande, une erreur systématique est constante ou varie lentement par rapport au temps de mesure. Elle introduit un décalage constant (biais) entre la valeur vraie et la valeur mesurée.

Ces erreurs proviennent généralement des défauts de calibration, des imperfections des instruments ou des conditions d'utilisation.

L'existence d'une erreur systématique peut être mise en évidence par la comparaison entre deux séries de mesures effectuées sur le même mesurande à l'aide de méthodes ou d'instruments différents.

Les principales causes d'erreurs systématiques sont :

- Erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence.
- Erreurs liées aux caractéristiques du capteur.
- Erreurs dues aux conditions ou au mode d'utilisation.
- Erreurs liées au traitement des données de mesure.

#### *Exemple*

- ✓ Une erreur de gain dans un capteur ou un décalage (offset) constant peut fausser les mesures de manière régulière [3].

## II.2.2 Les erreurs aléatoires

Les erreurs aléatoires sont des variations imprévisibles dont l'amplitude et le signe sont considérés comme aléatoires. Certaines causes peuvent être connues, mais leurs effets au moment de la mesure restent imprévisibles.

Les principales sources d'erreurs aléatoires sont :

- Limitations et caractéristiques intrinsèques des instruments.
- Présence de signaux parasites et bruit électrique.
- Variations des grandeurs d'influence.

Ces erreurs peuvent être réduites par des méthodes expérimentales appropriées telles que :

- Le blindage et la protection de la chaîne de mesure.
- Les méthodes de mesure différentielle.
- L'utilisation de techniques de filtrage et de détection synchrone.

### Exemple

- ✓ Le bruit thermique dans les circuits électroniques ou les perturbations électromagnétiques peuvent provoquer des variations imprévisibles du signal [23].

## II.2.3 Tableau comparatif

| Caractéristique      | Erreur aléatoire          | Erreur systématique               |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| <b>Prévisibilité</b> | Imprévisible              | Prévisible et constante           |
| <b>Direction</b>     | Aléatoire (excès /défaut) | Constante (toujours le même côté) |
| <b>Cause</b>         | Fluctuations, bruit       | Instrument méthode                |
| <b>Solution</b>      | Répétition, moyenne       | Étalonnage, correction            |
| <b>Impact</b>        | Fidélité (répétabilité)   | Exactitude (biais)                |

**Tableau II.1 :** Comparaison entre l'erreur aléatoire et l'erreur systématique [2]

## II.3 Caractéristiques des instruments de mesure

### II.3.1 Gamme de mesure - Etendue de mesure

- **Gamme de mesure** : C'est l'ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles un instrument de mesure est supposé fournir une mesure correcte.
- **Etendue de mesure** : Elle correspond à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure.

Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée pleine échelle [1].

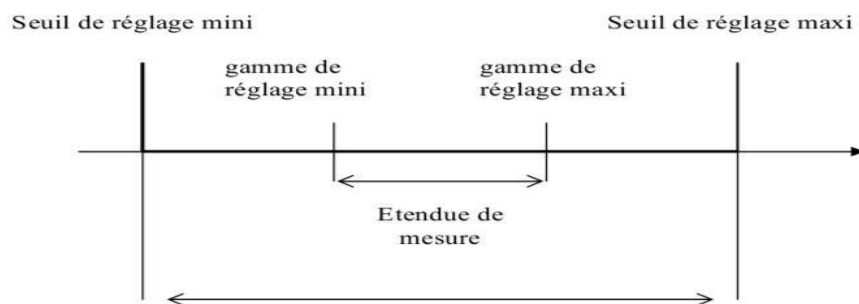


**Figure II.1** : Relation entre la gamme et l'étendue de mesure [24].

### II.3.2 Courbe d'étalonnage

Elle est propre à chaque appareil. Elle permet de transformer la mesure brute en mesure corrigé. Elle est obtenue en soumettant l'instrument à des valeurs connues de la grandeur à mesurer, fournie par un appareil étalon, et en lisant avec précision la mesure brute qu'il donne [25].

### II.3.3 Sensibilité

La sensibilité est l'une des caractéristiques les plus importantes d'un instrument de mesure. Elle définit l'aptitude de l'appareil à détecter les plus petites variations du mesurande. Mathématiquement, la sensibilité  $s$  autour d'une valeur  $X_0$  est définie par la pente de la courbe d'étalonnage :

$$s = \frac{dx}{dX}(X_0) = f'(X_0) \quad \text{II.2}$$

Où  $f'(X_0)$  représente la dérivée de la fonction de transfert au point  $X_0$ .

Lorsque la relation entre la grandeur physique à mesurer (entrée)  $X$  et le signal fourni par l'appareil (sortie)  $x$  est linéaire, la sensibilité reste constante sur toute l'étendue de mesure et correspond alors au gain de la chaîne de mesure. Si ce gain est sans dimension, il peut être exprimé en décibels ( $dB$ ) selon la formule suivante [7] :

$$Gain (dB) = 20 \log (s) \quad \text{II.3}$$

### II.3.4 Classe de précision – Résolution

La classe de précision d'un appareil de mesure correspond à la valeur en % du rapport entre la plus grande erreur possible sur l'étendue de mesure :

$$Classe (\%) = 100 \frac{\text{plus grande erreur possible}}{\text{etendue de mesure}} \quad \text{II.4}$$

Lorsque l'appareil de mesure est un appareil numérique, on définit la résolution par la formule suivante [26] :

$$Résolution = \frac{\text{etendue de mesure}}{\text{nombre de points de la mesure}} \quad \text{II.5}$$

### II.3.5 Rapidité - Temps de réponse

C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à suivre les variations de la grandeur à mesurer. Dans le cas d'un échelon de la grandeur entraînant la croissance de la mesure.

On définit le temps de réponse à 10% : c'est le temps nécessaire pour que la mesure croisse, à partir de sa valeur initiale jusqu'à rester entre 90 % et 110% de sa variation totale.

### II.3.6 Bande passante

La bande passante est la bande de fréquence pour laquelle le gain de l'instrument de mesure est compris entre deux valeurs. Par convention, le signal continu à une fréquence nulle [5].

### II.3.7 Grandeur d'influence et compensation

On appelle grandeur d'influence, toutes les grandeurs physiques autres que la grandeur à mesurer, susceptibles de perturber la mesure.

Généralement, la température est la grandeur d'influence qui le plus souvent rencontré [27].

## II.4 Les incertitudes de mesure

On appelle incertitude de mesure  $\Delta X$ , la limite supérieure de la valeur absolue l'écart entre la valeur mesurée et la valeur exacte de la mesurande. En pratique on ne peut qu'estimer cette incertitude, On distingue deux types d'incertitudes : incertitude absolue  $\Delta X$ , qui s'exprime en même unité que la grandeur mesurée et l'incertitude relative  $\frac{\Delta X}{X}$  qui s'exprime généralement en pourcentage (%).

### II.4.1 Erreur absolue - incertitude absolue

Soient :

- $X$  : la valeur mesurée de la grandeur
- $X_e$  : la valeur théorique exacte de la même grandeur

**L'erreur absolue** : notée  $\delta X$ , définie comme différence entre la valeur mesurée et la valeur réelle de la grandeur à mesurer. Elle est toujours exprimée en unités de la grandeur à mesurer. Elle peut être positive ou négative selon le sens de la différence.

$$\delta X = X - X_e \quad \text{II.6}$$

Comme la valeur exacte de la grandeur à mesurer est inconnue, il faut évaluer une limite supérieure de l'erreur absolue qui n'est autre que **l'incertitude absolue** notée :

$$\Delta X = \sup(|\delta X|) \quad \text{II.7}$$

### II.4.2 Erreur relative - incertitude relative

**L'erreur relative** : elle est égale au rapport de l'erreur absolue et la valeur réelle de la grandeur à mesurer. Elle est sans dimension. Elle peut aussi prendre des valeurs positives ou négatives.

$$\varepsilon_r = \frac{\delta X}{X_e} = \frac{X - X_e}{X_e} \quad \text{II.8}$$

Comme il s'agit d'un nombre sans dimension (pas d'unité), on l'exprime généralement en pourcentage (%) :

$$\varepsilon_r\% = \frac{\delta X}{X_e} \times 100 = \frac{X - X_e}{X_e} \times 100 \quad \text{II.9}$$

Également, si la valeur exacte de la grandeur est inaccessible, on prendra la limite supérieure de l'erreur relative qui n'est autre que **l'incertitude relative** :  $\frac{\Delta X}{X_e}$

On peut l'exprimer en % :  $\frac{\delta X}{X_e} \times 100$  [28].

## II.5 Sources principales d'erreurs

Les sources principales d'erreurs dans les systèmes de mesure, comme les capteurs et l'instrumentation, se divisent effectivement en trois catégories : celles liées au capteur lui-même, à l'électronique associée et à l'environnement. Ces erreurs peuvent être systématiques ou aléatoires, impactant la précision des mesures. Comprendre ces sources permet d'implémenter des corrections adaptées, comme l'étalonnage ou la protection environnementale.

### II.5.1 Erreurs du capteur

Les capteurs peuvent générer des erreurs dues à des défauts intrinsèques tels que le décalage de zéro (offset), l'erreur de gain (erreur d'échelle) ou la non-linéarité. Par exemple, un mauvais étalonnage initial ou une gamme inadaptée au procédé provoque des lectures déformées [29]. Les forces parasites ou les effets liés à l'échantillon amplifient ces problèmes.

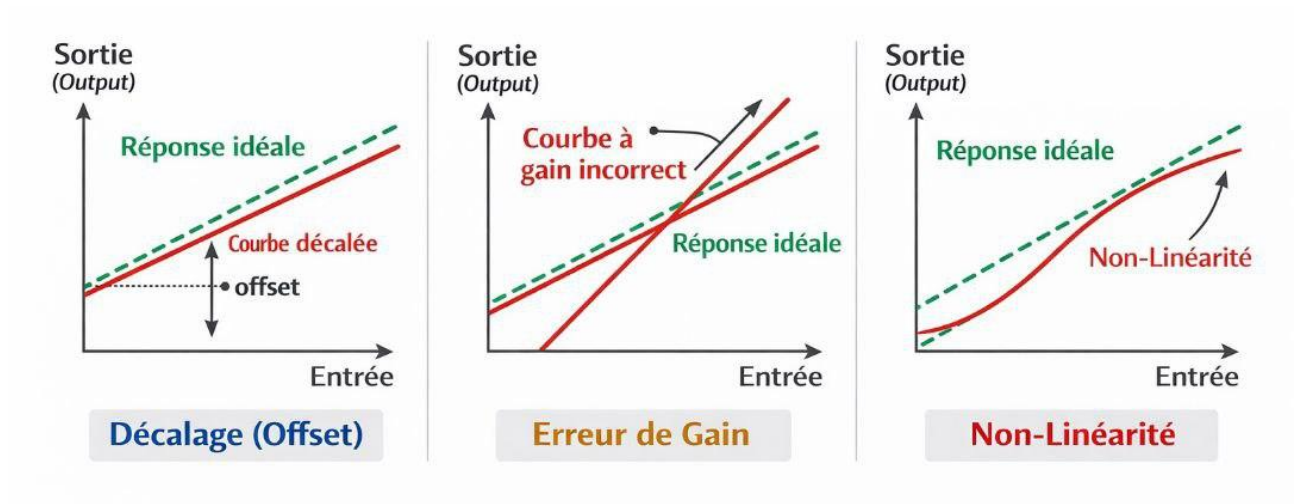


Figure II.2 : Illustration des erreurs typiques d'un capteur

### II.5.2 Erreurs électroniques

L'électronique introduit des perturbations via des bris de câbles, des connecteurs défectueux, des interférences électriques, des variations de température ou des tolérances

d'amplificateurs. Le bruit thermique, les variations de résistance/capacitance et les effets d'amplification inégale entre canaux aggravent les mesures. Ces erreurs se propagent lors de la numérisation et nécessitent une calibration électrique [30].

### II.5.3 Erreurs environnementales

Les facteurs externes comme la température, les vibrations, l'humidité, le bruit électromagnétique ou l'altitude altèrent les caractéristiques du capteur. Ces influences créent des biais systématiques constants, par exemple via la condensation ou des changements de conditions ambiantes. Une protection adéquate et un étalonnage en conditions réelles minimisent ces effets.

## II.6 Formules de propagation d'erreur

Les formules de propagation d'erreur s'appliquent aux instruments électroniques de mesure comme les multimètres, oscilloscopes ou générateurs pour estimer l'incertitude sur des grandeurs calculées (tension, courant, résistance) à partir des incertitudes des mesures directes. Ces incertitudes instrumentales incluent l'erreur de lecture (moitié de la plus petite division), les erreurs systématiques (biais, non-linéarité) et aléatoires (bruit, dérive). La propagation utilise la loi de Gauss-Laplace pour des erreurs indépendantes et gaussiennes.

### II.6.1 Principe général de la propagation des erreurs

Lorsqu'une grandeur mesurée  $Z$  dépend de plusieurs grandeurs indépendantes  $Z = f(x, y, \dots)$

Pour de petites erreurs, l'incertitude absolue sur  $Z$  est donnée par :

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y\right)^2 + \dots} \quad \text{II.10}$$

En électronique, pour

$$P = U \times I, \Delta P = P \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2} \quad \text{II.11}$$

Cette formule de Gauss-Laplace suppose des erreurs indépendantes et petites par rapport aux valeurs mesurées [31].

## II.6.2 Opération de base

La propagation de l'incertitude suit des règles spécifiques qui dépendent de l'opération mathématique. Examinons chacune de ces opérations [32] :

- **Addition /soustraction** : Lorsqu'on additionne ou soustrait des mesures comportant des incertitudes, on additionne les incertitudes absolues en quadrature (racine carrée de la somme des carrés) pour obtenir les écarts types.

$$\Delta(x \pm y) = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad \text{II.12}$$

- **Multiplcation /division** : Pour la multiplication et la division, nous travaillons avec des incertitudes relatives. L'incertitude relative du résultat est égale à la somme en quadrature des incertitudes relatives des données d'entrée.

$$\frac{\Delta(xy)}{xy} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad \text{II.13}$$

- **Puissance** : Lorsqu'on élève une mesure à une puissance  $n$ , l'incertitude relative est multipliée par la valeur absolue de la puissance.

$$\frac{\Delta(x^n)}{x^n} = |n| \frac{\Delta x}{x} \quad \text{II.14}$$

## II.7 Représentation graphique des écarts et incertitude

La représentation graphique des écarts et incertitudes instrumentales se fait principalement via les barres d'erreur (verticales ou horizontales) sur des diagrammes à barres ou des nuages de points, indiquant l'écart-type, l'erreur standard, ou l'intervalle de confiance (souvent  $\pm 2$  ou 3 écarts-types pour 95-99% de confiance), et aussi avec des histogrammes pour visualiser la distribution des mesures (type A) ou des diagrammes de dispersion (comme la droite de Henry) pour vérifier les distributions (type B) et identifier les aberrantes. Ces graphiques permettent de visualiser la répétabilité, la précision et la fiabilité des mesures [33].

### II.7.1 Méthodes graphiques courantes

- **Barres d'erreur** :
  - **Sur diagramme à barres** : Chaque barre (représentant une moyenne) a une ligne verticale (ou horizontale) indiquant sa marge d'erreur.

- **Sur nuage de points** : Des barres d'erreur sont ajoutées sur les axes  $X$  et  $Y$  pour chaque point.
- **Histogrammes**  
Montrent la fréquence des valeurs mesurées, révélant la dispersion (écart-type) et la forme de la distribution (normale, log-normale).
- **Diagrammes de dispersion (ex : Droite de Henry)**  
Utilisés pour vérifier si les données suivent une distribution spécifique (comme la loi normale) et pour identifier des valeurs aberrantes.

## II.7.2 Types d'incertitudes représentées :

On distingue deux types d'incertitudes appelées incertitudes-types car exprimées à l'aide d'un écart-type :

- L'incertitude de type A est une incertitude de type statistique : on répète un certain nombre de fois la mesure de la grandeur cherchée, on donne un résultat qui est la valeur moyenne des valeurs mesurées et une incertitude calculée statistiquement.
- L'incertitude de type B est une incertitude qui n'est pas statistique.

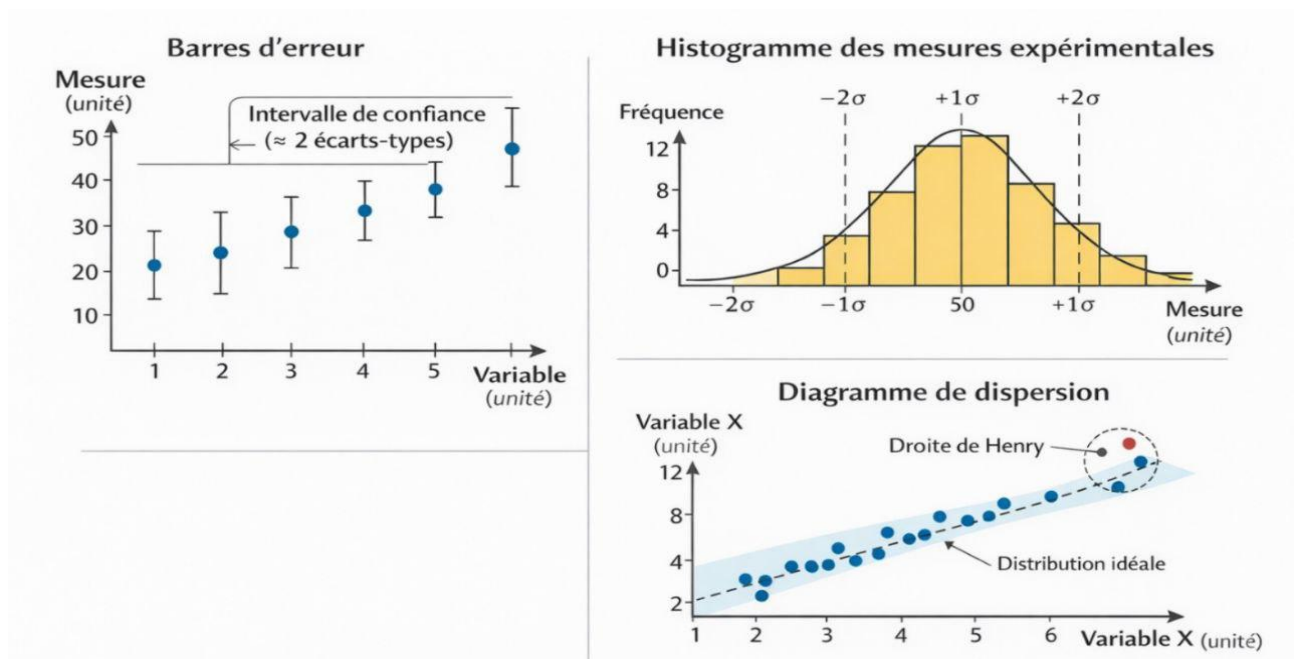


**Figure II.3** : Représentation graphique des écarts et incertitude [34].

Comme illustré dans la Figure II.3, les barres d'erreur permettent de visualiser l'incertitude sur chaque point de mesure tandis que l'histogramme met en évidence la distribution statistique des erreurs de type A. Enfin, le diagramme de dispersion aide à identifier la linéarité du système et les éventuelles valeurs aberrantes.

### II.7.2.1 Évaluation de l'incertitude de type A (statistique)

#### ➤ Pour un grand nombre de mesures

Lorsque l'on fait une étude statistique d'une expérience, on répète  $n$  fois une mesure de la grandeur  $x$ . On considère que la meilleure estimation de la valeur vraie de la grandeur cherchée est la moyenne des valeurs de  $x$  obtenue :

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad \text{II.15}$$

Pour trouver l'incertitude sur cette moyenne, on calcule d'abord l'écart-type de la distribution des  $n$  mesures :

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{II.16}$$

Puis on calcule l'écart-type sur la moyenne qui sera notre incertitude-type. Donc :

$$u_x = u_{\bar{x}} = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad \text{II.17}$$

#### ➤ Pour un petit nombre de mesures

Cependant, ce qui a été vu précédemment n'est valable que pour un certain nombre de mesures. Comme on ne prendra jamais autant de mesures, on utilisera la méthode de Student : elle consiste à appliquer un coefficient à l'écart-type de la moyenne en fonction du nombre de mesures effectuées.

Ce coefficient, noté  $t$ , est adapté à un intervalle de confiance.  $t$  est donné dans le tableau ci-dessous pour un intervalle de confiance de 68% (écart à la moyenne égal à un écart type) ou 95% (écart à la moyenne égal à deux écarts-types) :

| Nombre de mesures $n$ | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Coefficient $t$ 68%   | 1,84 | 1,32 | 1,20 | 1,14 | 1,11 | 1,09 | 1,08 | 1,07 | 1,06 |
| Coefficient $t$ 95%   | 12,7 | 4,30 | 3,18 | 2,78 | 2,57 | 2,45 | 2,37 | 2,31 | 2,26 |

**Tableau II.2 :** Valeurs du coefficient de Student  $t$  pour différents niveaux de confiance

En conclusion, pour exprimer le résultat final d'une mesure de manière rigoureuse, on utilise l'écriture normalisée qui associe la valeur moyenne à son incertitude élargie :

$$u_x = t \cdot \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad \text{II.18}$$

Ce résultat permet de définir l'intervalle de confiance à l'intérieur duquel la valeur vraie du mesurande a une probabilité définie de se trouver [35].

### II.7.2.2 Évaluation de l'incertitude de type B (non statistique)

Pour évaluer celle-ci, plusieurs cas sont à distinguer :

Elle est évaluée par l'expérimentateur en fonction de la graduation minimale de l'appareil ou d'une plage de valeurs considérées comme acceptable. Rigoureusement, l'incertitude type est égale à :

#### **Exemple**

- ✓ On mesure une tension de 4,32 V avec un voltmètre sur le calibre 20 V, la résolution est de 10 mV. La précision donnée par le constructeur indique :  $\Delta c = 0,5\%$  valeur lue+1digit.

L'incertitude-type est donc [36] :

$$u_B = \frac{\frac{0.5 \times 4.32}{100} \times 0.01}{\sqrt{3}} = 0.02 \text{ V} \quad \text{II.19}$$

### II.7.3 Expression d'un résultat de mesure

Pour présenter le résultat d'une mesure, on juxtapose la valeur mesurée (une moyenne de celle-ci si une étude statistique a été faite), son incertitude absolue, une puissance de 10 (notation scientifique) et une unité. On écrira donc :

$$\text{valeur mesurée} = (x \pm U_x) \times 10^n \text{unité} \quad \text{II.20}$$

Où  $x$  représente la valeur moyenne et  $U_x$  l'incertitude absolue.

#### **Exemple**

- ✓ On mesure la résistance d'un conducteur ohmique avec un ohmmètre. On obtient

$R = 201,3\Omega$ . Avec une incertitude de  $0,5\Omega$ . On écrira donc :

$$R = (201.3 \pm 0.5)\Omega \Leftrightarrow 200.8 < R < 201.8 \quad \text{II.21}$$

### II.7.4 Incertitude relative d'une mesure

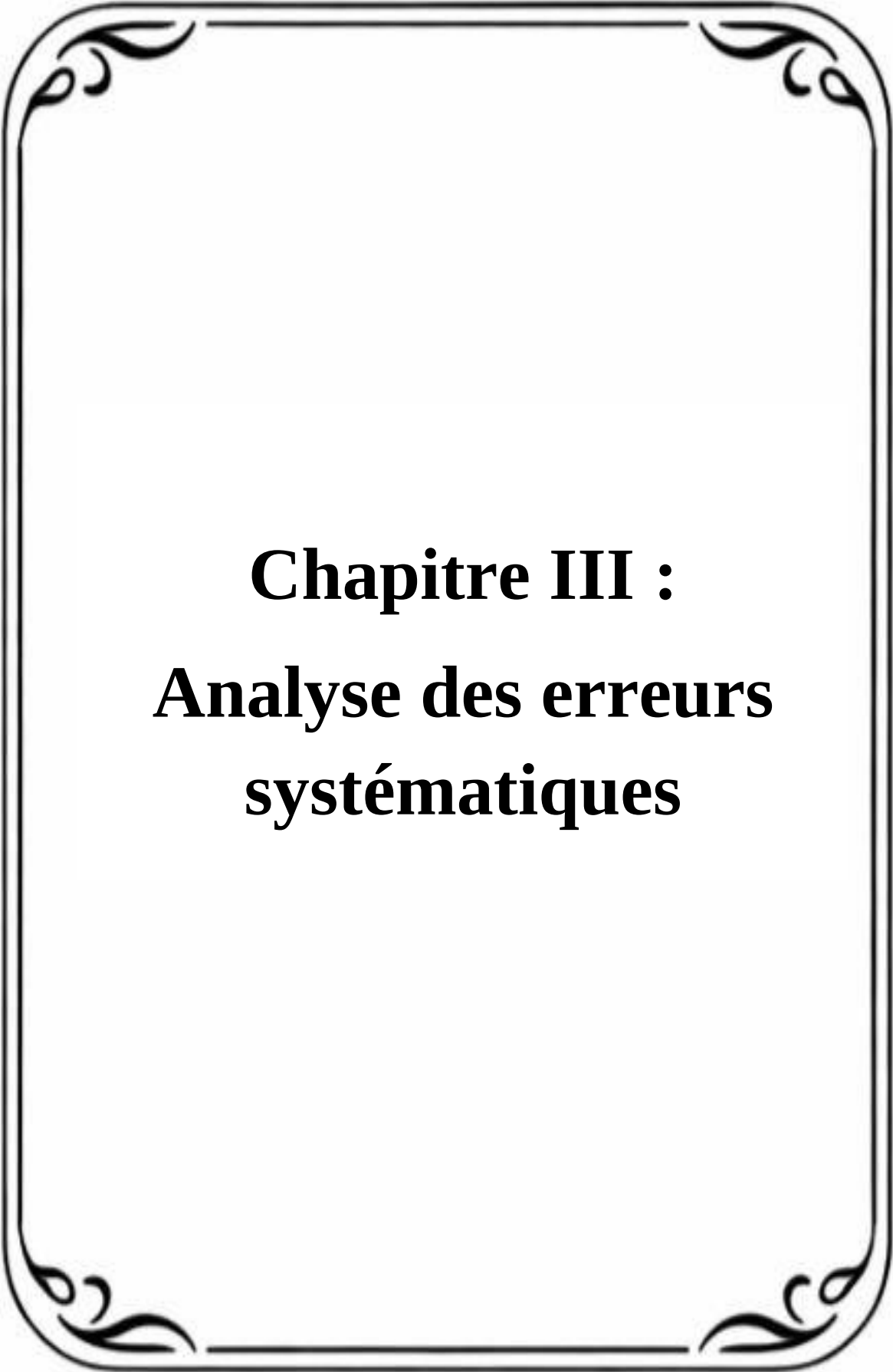
Pour avoir une idée de la qualité d'une mesure, on peut calculer son incertitude relative en pourcentage :

$$\text{Incertitude relative} = \frac{U_x}{\bar{x}} \times 100 \quad \text{II.22}$$

Plus l'incertitude relative est faible, plus la mesure est considérée comme précise [37].

## **II.8 Conclusion :**

En résumé, on peut dire que les limites d'erreur sont bien plus qu'une nécessité technique. Il s'agit d'un concept fondamental qui définit les limites de nos connaissances et de nos capacités technologiques. Leur compréhension et leur application correcte sont cruciales pour le progrès de la science et de la technologie. Dans un monde qui s'appuie de plus en plus sur des données précises et des mesures fiables, les limites d'erreur continueront de jouer un rôle clé à l'avenir. Ils nous rappellent que chaque mesure est soumise à un certain degré d'incertitude, tout en nous poussant à repousser continuellement les limites de ce qui peut être mesuré. La recherche de précision, associée à la conscience des limites de nos mesures, continuera d'être un moteur d'innovation et de découverte dans tous les domaines de la science et de la technologie [38].



# **Chapitre III :**

## **Analyse des erreurs systématiques**

### III.1 Introduction

L'analyse des erreurs systématiques est un processus méthodologique visant à identifier, quantifier et corriger les biais constants ou prévisibles dans les mesures ou les données, causés par des problèmes persistants tels que l'étalonnage, la méthode ou l'environnement, contrairement aux erreurs aléatoires. Elle consiste à détecter, décrire et expliquer ces erreurs pour améliorer la précision et la fiabilité des résultats, en utilisant des outils d'analyse comme l'étalonnage des instruments ou la standardisation des procédures [39].

Une erreur systématique résulte souvent d'une mauvaise connaissance ou utilisation du capteur et se détecte en comparant les valeurs moyennes obtenues par différents capteurs. Les causes fréquentes incluent un étalonnage incorrect ou non effectué, un emploi inapproprié, des modifications du mesurande ou des erreurs dans le conditionneur. Ces erreurs sont des écarts fixes qui peuvent être corrigés si leur amplitude et direction sont connues.

La complexité des dispositifs, les variations de température et de pression, ainsi que les paramètres de conception mécanique influent sur la précision. Une analyse rigoureuse et des améliorations innovantes sont donc essentielles pour obtenir des mesures plus précises. La détection se fait en comparant les mesures avec une référence certifiée ou une procédure standard. Si un biais significatif est identifié, les résultats peuvent être corrigés et l'incertitude associée intégrée dans le budget global, sans majorer inutilement l'incertitude pour un biais présumé non mesuré [40].

## III.2 Origine des erreurs systématiques dans les instruments électroniques de mesure

### III.2.1 Causes principales d'erreurs systématiques

- **Erreurs instrumentales**
  - **Calibration défectueuse** : Zéro mal réglé, étalonnage incorrect.
  - **Imprécisions de fabrication** : Tolérances des composants (résistances, condensateurs).
  - **Vices de conception** : Effets parasites (température, humidité) non compensés, bruit.
  - **Dérive** : Changements lents des caractéristiques de l'appareil avec le temps [1].
- **Erreurs Méthodologiques**
  - **Perturbation de la mesure** : Le branchement d'un appareil modifie le circuit (ex: résistance d'un ampèremètre).
  - **Choix de la méthode** : Montage amont/aval pour mesurer résistance ou puissance.
  - **Hypothèses simplificatrices** : Modélisation excessive d'un système complexe [30].
- **Erreurs Environnementales**
  - **Facteurs externes** : Variations de température, pression, humidité, ou interférences électromagnétiques.
- **Erreurs liées à l'Opérateur**
  - **Lecture/Observation** : Erreur de parallaxe, estimation de fraction de division, erreurs de saisie.
  - **Mauvais réglages** : Configuration incorrecte des appareils.
- **Erreurs dues aux Composants**
  - **Effets thermiques** : Tensions thermoélectriques aux jonctions.
  - **Non-linéarités** : Comportement non idéal des composants (ex : diodes) [41].

#### *Exemples concrets*

- ✓ Un multimètre affichant 10,1 V pour 10,0 V, même après étalonnage, est sujet à une erreur systématique.

- ✓ Une résistance dont la valeur nominale est de  $100\ \Omega$ , mais qui mesure systématiquement  $103\ \Omega$  à cause de sa tolérance de fabrication.

#### Pour minimiser ces erreurs

- Bon calibrage des instruments
- Méthode de mesure rigoureuse
- Composants de qualité
- Maîtrise de l'environnement de mesure [41]

### III.2.2 Manifestation des erreurs systématiques

Ces erreurs se traduisent généralement par :

- **Décalage constant** : Une mesure de résistance est toujours 10% plus élevée que la valeur réelle, un voltmètre indique 0.1V quand il n'y a rien.
- **Composants physiques** : Signes visuels comme des traces de brûlure, des condensateurs gonflés ou des soudures défectueuses (mauvais contacts).
- **Problèmes d'alimentation** : Instabilité de la tension, chutes de tension, alimentation qui coupe ou redémarre.
- **Instabilité thermique** : Composants qui surchauffent, affectant les performances du circuit [42].

### III.2.3 Méthodes d'analyse des erreurs systématiques

- **Identification des sources**
  - **Instruments** : Étalonnage défectueux, manque de zéro.
  - **Méthodes** : Simplifications théoriques, conditions expérimentales non respectées.
  - **Personnelles** : Parallaxe, mauvaise habitude de lecture.
- **Techniques de détection et correction**
  - **Étalonnage/Calibration** : Comparer l'instrument avec un étalon de référence.
  - **Méthode de substitution (ou d'échange)** : Remplacer l'objet mesuré par une référence connue pour déterminer le biais.
  - **Méthode de compensation (ou retournement)** : Effectuer deux mesures en inversant un paramètre (ex : polarité, sens de l'instrument) pour annuler l'erreur.
  - **Analyse graphique** : Tracer la droite de régression et vérifier l'ordonnée à l'origine [43].

### III.2.4 Type des erreurs

- **Erreur de capteur**

- **Non-linéarité** : L'erreur de non-linéarité d'un capteur est l'écart maximal entre sa courbe de réponse réelle et une ligne droite idéale, exprimée en pourcentage de la pleine échelle (% PE). Elle indique à quel point la sortie du capteur dévie d'une relation proportionnelle directe avec la grandeur mesurée.
- **L'hystérésis** : est le décalage de mesure constaté selon que la pression est appliquée en croissant ou en décroissant, illustrant l'influence de l'historique des sollicitations sur le capteur. Concrètement, c'est la différence de valeur affichée pour un même point de mesure (ex : 50 kPa) lors d'un cycle de montée et de descente.
- **Dérive de sensibilité** : L'erreur de sensibilité est une modification de la pente de la courbe de réponse du capteur, provoquant une erreur qui s'accroît proportionnellement à la valeur de la grandeur mesurée. Souvent causée par la température ou le vieillissement, elle se distingue du décalage de zéro car elle affecte directement le gain (facteur d'échelle) et non la valeur de base [29].

- **Erreur de conversion**

- **Quantification** : l'incertitude générée lors de la conversion d'un signal analogique en numérique, limitée par la résolution finie (nombre de bits) du convertisseur. Elle résulte principalement des écarts de phase entre le signal d'entrée et la base de temps, ainsi que du bruit et des non-linéarités internes du système.
- **Offset** : L'erreur d'offset, due aux offsets des ampli-ops et comparateurs qui réalisent le convertisseur, est un décalage entre caractéristique idéale et caractéristique réelle. Elle est définie par l'écart existant sur le mot nul (tous les bits à 0).
- **L'erreur de gain** : due à des erreurs de gain des amplificateurs ou des erreurs sur les résistances des réseaux R-2R par exemple, est liée à la différence entre la pente de la caractéristique idéale et de la caractéristique réelle. Elle est définie par rapport à la pleine échelle (tous les bits à 1) [44].

- **Erreur de traitement**

- **Arrondis numériques** : L'arrondissement consiste à simplifier un nombre en réduisant ses chiffres significatifs pour obtenir une valeur approchée plus facile à

utiliser. Cette méthode sacrifie une part de précision pour privilégier la lisibilité, en arrondissant soit au plus proche, par excès ou par défaut.

- **Approximation algorithmique**

L'erreur d'approximation, divisée en absolue (écart réel) et relative (écart proportionnel), est cruciale pour valider la fiabilité des modèles en science des données. Sa maîtrise permet de minimiser les biais et d'affiner la précision des algorithmes prédictifs [45].

- **Erreur d'étalonnage**

Erreur positive due au fait que l'instrument utilisé pour une mesure directe de distances présente un écart par rapport à l'étalon de référence.

- **Référence de tension** : Une erreur d'étalonnage de référence de tension correspond à la différence entre la tension de sortie réelle d'un composant (comme l'AD584 ou le MCP1541) et sa valeur théorique, problème souvent causé par la dérive thermique ou le vieillissement. Celle-ci peut nécessiter un réajustement à l'aide d'un potentiomètre ou, si l'erreur provient d'un défaut interne, le remplacement de la référence.



**Figure III.1** : Modules de référence de tension utilisés pour l'étalonnage : AD584 et MCP1541

- **Résistance étalon incorrect** : L'utilisation d'une résistance étalon incorrecte fausse la référence de base, provoquant un biais systématique sur le zéro ou la pente des mesures. Pour garantir la fiabilité de l'appareil, il est indispensable de vérifier la précision et la traçabilité de l'étalon utilisé.
- **Erreur thermique** : L'erreur thermique, ou dérive en température, désigne la variation indésirable des caractéristiques électriques d'un composant (résistance, tension, courant) due aux changements de température ambiante. Elle affecte la précision des mesures. Elle est causée par la dilatation des matériaux, l'effet Joule, ou la modification de la conductivité [46].

### III.3 Erreurs dues aux composants électroniques

#### III.3.1 Tolérance des résistances et condensateur

Les composants électroniques ne sont jamais parfaits. Une résistance de 10 k $\Omega$  avec une tolérance de  $\pm 1$  % peut en réalité varier entre 9,9 k $\Omega$  et 10,1 k $\Omega$ . Cette variation, bien que faible, peut engendrer une erreur notable dans un pont de mesure ou un amplificateur différentiel. Pour un amplificateur de gain  $G = \frac{R_2}{R_1}$ , une erreur de 1 % sur chaque résistance peut entraîner une erreur relative de gain de près de 2 % [47].

#### III.3.2 Dérive des amplificateurs opérationnels

Les amplificateurs opérationnels (AOP) sont sensibles aux variations de température et à l'alimentation.

Deux paramètres importants contribuent aux erreurs

- **Offset de tension d'entrée ( $V_o$ )** : tension résiduelle lorsque l'entrée est à zéro.
- **Dérive de l'offset avec la température** : variation de l'offset pour chaque degré Celsius.

##### *Exemple*

- ✓ Une AOP avec un offset de 1 mV et une dérive de 10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  peut produire une erreur de 0,5 mV pour une variation de 50  $^\circ\text{C}$  non négligeable pour une mesure millivoltique [44].

### III.4 Erreurs liées aux capteurs

#### III.4.1 Non-linéarité

- Sortie réelle légèrement courbée par rapport à l'idéal.
- Exemple : capteur de pression s'écarte de la droite idéale à haute pression.

#### III.4.2 Hystérésis et dérive

- Hystérésis : valeur mesurée différente selon montée ou descente de la grandeur.
- Dérive : vieillissement lent du capteur entraînant décalage progressif [39].

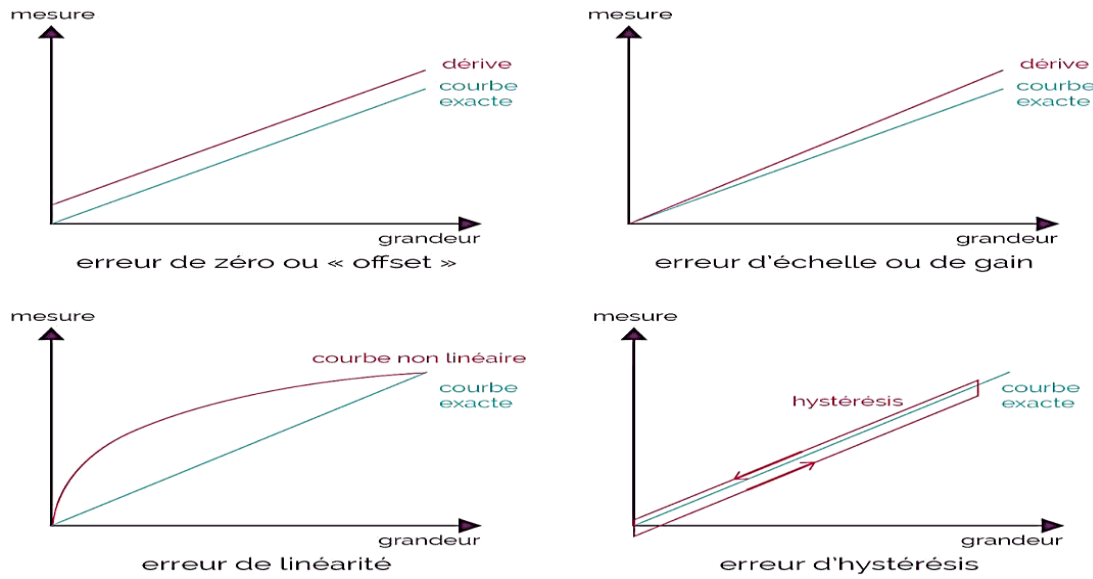


Figure III.2 : Caractérisation des erreurs de mesure des capteurs [48].

## III.5 Erreurs de conversion analogique-numérique

### III.5.1 Erreurs liées aux défauts de la référence

Il en ressort de cette formule qu'en dehors des défauts intrinsèques des convertisseurs, seule une variation intempestive de  $V_{ref}$ .

Affecte la valeur de  $q$  par la formule :

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{\frac{2^n V_e}{V_{ref}^2} \Delta V_{ref}}{\frac{2^n V_e}{V_{ref}}} = \frac{\Delta V_{ref}}{V_{ref}} \quad \text{III.1}$$

Où :

- $q$  : le pas de quantification (Quantum)
- $V_{ref}$  : la tension de référence du convertisseur
- $n$  : le nombre de bits (résolution) du convertisseur
- $V_e$  : la tension analogique d'entrée

Or cette variation de  $V_{ref}$  doit introduire une erreur de moins de  $\frac{1}{2}$  quantum à pleine échelle, ce qui se traduit par [49] :

$$\frac{\Delta V_{ref}}{V_{ref}} \leq \frac{1}{2} \frac{V_{ref}}{V_{ref}} \Leftrightarrow \frac{\Delta V_{ref}}{V_{ref}} \leq \frac{1}{2^{n+1}} \quad \text{III.2}$$

Mesure des convertisseurs repose sur la formule :

$$q = 2^n \frac{V_e}{V_{ref}} \quad \text{III.3}$$

Cette relation met en évidence l'influence directe de la variation de la tension de référence  $V_{ref}$  sur l'erreur relative de conversion. En effet, toute fluctuation de cette tension se répercute immédiatement sur la précision du signal de sortie.

Par conséquent, plus le nombre de bits  $n$  augmente, plus la tolérance admissible sur  $V_{ref}$  devient faible, ce qui impose l'utilisation de sources de référence très stables et précises [50].

Le tableau suivant illustre la tolérance relative de la tension de référence en fonction du nombre de bits.

| Nombre de bits | 4 bits  | 8 bits | 10 bits | 12 bits | 16 bits | 20 bits  | 24 bits | 32 bits  |
|----------------|---------|--------|---------|---------|---------|----------|---------|----------|
| Tolérance      | 3,125 % | 2 %    | 488 ppm | 122 ppm | 7,6 ppm | 0,47 ppm | 3 ppb   | 0,11 ppb |

**Tableau III.1 :** Influence du nombre de bits sur la tolérance relative de la tension de référence

### III.5.2 Erreurs liées au signal à convertir

L'autre source d'erreur est la variation de  $V_e$  dans le temps. La conversion n'étant pas instantanée, le signal doit rester stable pendant la mesure. Le signal  $V_e$  ne doit pas évoluer de plus d'un demi-quantum pendant la phase de conversion, ce qui se traduit par une pente maximum pour le signal  $V_e$  [51] :

$$\frac{\Delta V_e}{\Delta t} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{ref}}{2^n \cdot T_e} \quad \text{III.4}$$

Où :

- $\frac{\Delta V_e}{\Delta t}$  : la pente maximale autorisée du signal d'entrée
- $T_e$  : la période de conversion
- $2^n$  : le nombre de niveaux de quantification

On applique donc impérativement un filtrage sur le signal  $V_e$  pour s'assurer qu'il n'est pas possible de se retrouver avec des pentes supérieures à celles qu'impose le convertisseur et qui sont en général plus restrictives que celles fixées par les règles de repliement spectral, dont la fréquence de coupure est définie pour respecter le théorème de Shannon :

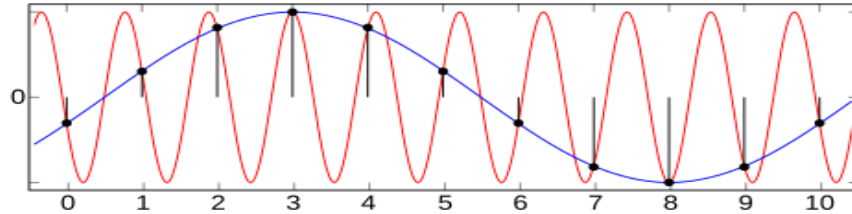


**Figure III.3** : Repliement du spectre d'un signal sinusoïdal de fréquence  $f = 0,9$

Ce graphique démontre le repliement du spectre d'un signal sinusoïdal de fréquence  $f = 0,9$ , confondu avec un signal de fréquence  $f = 0,1$  lors d'un échantillonnage de période  $T = 1,0$  [52].

$$F_{\max} < \frac{F_e}{2} \quad \text{III.5}$$

L'utilisation de filtres induit des pertes supplémentaires d'information de signal puisque l'amplitude ( $A$ ) de l'harmonique le plus proche du signal sinusoïdal à la fréquence maximale ( $F_{\max}$ ) doit respecter la règle :

$$A \cdot 2\pi \cdot F_{\max} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{ref}}{2^n \cdot T_e} \quad \text{III.6}$$

Les convertisseurs CAN introduisent des erreurs liées à la quantification, au bruit, et à la non-linéarité différentielle.

Chaque niveau numérique représente une plage de tension  $\Delta V$ , appelée pas de quantification :

$$\Delta V = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad \text{III.7}$$

Où  $n$  est le nombre de bits et  $V_{ref}$  la tension de référence.

### Exemple

✓ Pour un CAN de 10 bits avec  $V_{ref} = 5V$ ,

$$\Delta V = \frac{5}{1024} = 4,88 \text{ mV} \quad \text{III.8}$$

Caractéristiques de transfert idéales pour le CAN et CNA Pour les CAN, la caractéristique de transfert idéal est une courbe en escalier qui lie l'entrée (analogique) au mot binaire de sortie. On peut écrire la relation entre entrée et sortie sous forme de l'équation suivante :

$$V = V_{ref} \left( \frac{b_{n-1}}{2} + \dots + \frac{b_0}{2^n} \right) \quad \text{III.9}$$

Où :

- $b_{n-1}$  : le bit de poids fort
- $b_0$  : le bit de poids faible

Pour un CAN avec des tensions de référence respectivement 0V et où n est le nombre de bits du convertisseur, le poids fort et le bit de poids faible. Il faut bien comprendre que la sortie du convertisseur est bien le mot binaire formé par les n bits, de poids fort à poids faible mais en représente l'équivalent en tension. Pour le CNA, l'équation est la même, sauf qu'ici la tension  $V_{out}$  est réellement la sortie du convertisseur et le mot binaire en est l'entrée.

La résolution, pour le CAN, est la plus petite variation de tension en entrée qui engendre une modification du mot de sortie, sur le bit de poids faible. Pour le CNA, c'est la variation de la tension de sortie quand le mot entré change de bit de poids faible.

On voit sur les équations précédentes, que la résolution est donnée par le rapport :

$$q = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad \text{III.10}$$

Avant d'aborder le paragraphe sur les erreurs des convertisseurs qui sont liées aux imperfections des composants qui les réalisent, il faut mentionner l'erreur de quantification qui ne concerne que les CAN : cette erreur est systématique, non lié à quelque imperfection mais inhérente au principe même de conversion qui fait passer d'un continuum de tension en entrée (une infinité de valeurs possibles) à un ensemble fini de valeurs numériques ( $2^n$  valeurs possibles). L'erreur de quantification représente l'écart entre la tension d'entrée et la tension correspondant au mot binaire sortie du convertisseur selon l'équation :

$$V = V_{ref} \left( \frac{b_{n-1}}{2} + \dots + \frac{b_0}{2^n} \right) \quad \text{III.11}$$

Elle est souvent notée et elle est exprimée par :

$$V_e = V_{ref} \left( \frac{b_{n-1}}{2} + \dots + \frac{b_0}{2^n} \right) + \epsilon = \frac{V_{ref}}{2^n} (b_{n-1} 2^{n-1} + \dots + b_0) + \epsilon = Nq + \epsilon \quad \text{III.12}$$

Où les paramètres sont les mêmes que définis précédemment, avec  $\varepsilon$  représentant l'erreur de quantification [53].

Les CAN sont construits de manière à ce que cette erreur systématique obéisse à la caractéristique ci-dessous :

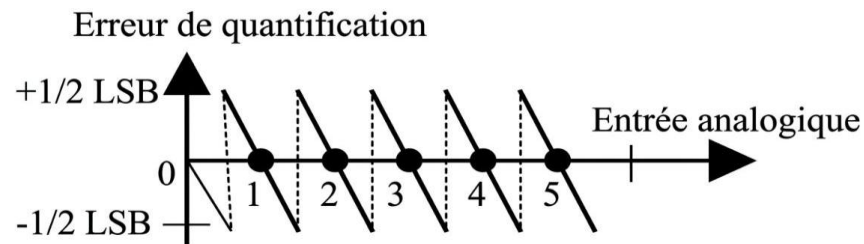


**Figure III.4 :** L'erreur de quantification dans les CAN [54].

LSB désigne le bit de poids faible (Least Significant Bit) : comme l'erreur systématique est aléatoire et comprise entre  $+1/2 \text{ LSB}$  et  $-1/2 \text{ LSB}$ , on peut s'attendre à ce que sa valeur moyenne soit nulle [44].

### III.6 Erreurs de référence et d'étalonnage

Un étalonnage incorrect entraîne un décalage systématique des mesures. Si la référence utilisée (par exemple, une tension de 4,95 V au lieu de 5,00 V) est erronée, toutes les mesures seront faussées proportionnellement.

Les instruments doivent donc être régulièrement étalonnés à l'aide de standards traçables à des références nationales ou internationales (comme le BIPM – Bureau International des Poids et Mesures) [55].

Simulation d'un étalonnage en 5 points de référence : On tire aléatoirement une valeur dans la variance longue qui s'applique sur tout le domaine et qui peut présenter un effet de gain :

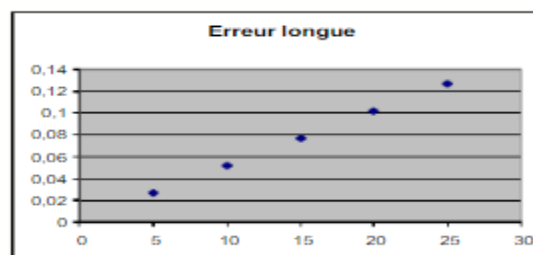


**Figure III.5 :** Illustration de l'erreur longue lors du processus d'étalonnage [56].

On tire ensuite en chaque point une valeur dans la variance courte du processus d'étalonnage.

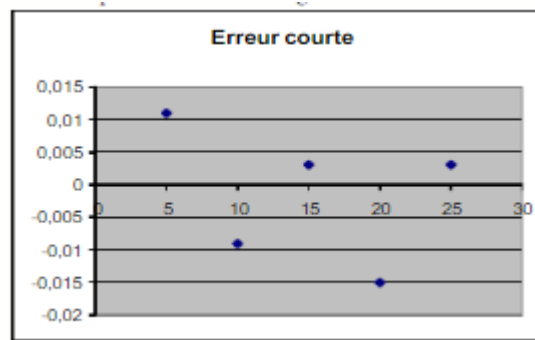


**Figure III.6 :** Représentation de l'erreur courte observée sur chaque point de mesure [56].

L'étalonnage qu'on aurait ainsi obtenu est la somme des deux courbes : Cette simulation tient donc compte du nombre de points de référence choisis et du nombre de répétitions de mesures effectuées à chaque point.

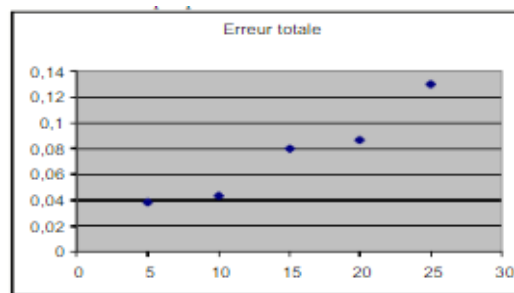


**Figure III.7 :** Erreur totale résultant de la combinaison des erreurs longue et courte [56].

Ainsi, comparant les erreurs observées lors de l'étalonnage d'un instrument réel avec celles par simulation, il est possible de savoir si oui ou non l'instrument en cours d'étalonnage a des erreurs [57].

### III.7 Effets thermiques et environnementaux

Une erreur thermique est la variation d'une grandeur mesurée due à un changement de température.

$$\text{Erreur} = f(T) \quad \text{III.13}$$

Où T : température

### III.8 Causes principales

➤ **Variation des composants**

- Résistances → changent avec la température
- Condensateurs → dérive de capacité
- Semi-conducteurs → très sensibles à la température

➤ **Effet Joule**

- Échauffement dû au courant
- Modification des caractéristiques interne

➤ **Effet Seebeck (thermoélectrique)**

- Apparition de tensions parasites
- Jonctions de métaux différents

➤ **Environnement**

- Température ambiante
- Rayonnement thermique
- Ventilation / refroidissement

### III.9 Types d'erreurs thermiques

➤ **Dérive thermique (Drift)**

Variation lente avec la température.

➤ **Offset thermique**

Décalage de la mesure.

➤ **Gain thermique**

Variation du coefficient d'amplification.

**Exemple**

- ✓ Une résistance :  $R(T) = R_0 (1 + \alpha T)$
- $\alpha$  = coefficient thermique
  - Si  $T$  augmente →  $R$  change → erreur

### Cas des capteurs

✓ Capteur de température

- La tension de sortie varie non seulement avec la mesure, mais aussi avec la température ambiante

Erreur sur la mesure réelle

### Effets en instrumentation

- Mauvaise précision
- Instabilité
- Dérive dans le temps

Bruit supplémentaire

Les erreurs thermiques peuvent être modélisées par des coefficients de température. Pour une résistance :

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad \text{III.14}$$

Où  $\alpha$  est le coefficient de température. Une faible variation de température peut produire des écarts significatifs dans les mesures précises. De même, les champs électromagnétiques, l'humidité ou les vibrations peuvent influencer les signaux analogiques, d'où la nécessité de blindages et de filtres [30].

- L'erreur thermique et le coefficient de température (**TCR**)

La résistance d'un composant varie inévitablement avec la température, un phénomène quantifié par le **TCR** (Température Coefficient of Résistance). Cette dérive est modélisée par la relation linéaire suivante [58] :

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] = R_0[1 + \alpha \times \Delta T] \quad \text{III.15}$$

- **Le Coefficient  $\alpha$**  : Exprimé en **ppm/°C** ou en **K<sup>-1</sup>**, il définit la sensibilité thermique du matériau. Par exemple : le platine (Pt100) possède un  $\alpha \approx 3.85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  [59].

- **Comportements** : On distingue les **CTP** (la résistance augmente avec la chaleur  $\alpha > 0$ ) et les **CTN** (la résistance diminue,  $\alpha < 0$ ).
- **Impact** : Cette variation génère une erreur proportionnelle à l'écart de température  $T\Delta$ , rendant la compensation thermique indispensable pour les mesures de haute précision.

### III.10 Modélisation globale d'une erreur systématique

On peut exprimer la sortie réelle d'un instrument par la relation :

$$Y_{réel} = aX + b + \varepsilon \quad \text{III.16}$$

Où :

- $Y_{réel}$  : la valeur mesurée en sortie de l'instrument (affectée par les erreurs)
- $a$  : facteur de gain (erreur de sensibilité)
- $b$  : décalage (erreur d'offset)
- $\varepsilon$  : terme résiduel représentant le bruit ou les erreurs aléatoires non modélisables

La compensation consiste à estimer  $a$  et  $b$ , puis à corriger les mesures selon [60] :

$$X_{corrige'} = \frac{Y_{réel} - b}{a} \quad \text{III.17}$$

Où les paramètres sont les mêmes que définis précédemment, avec  $X_{corrige'}$  représentant la valeur obtenue après application de l'algorithme de compensation.

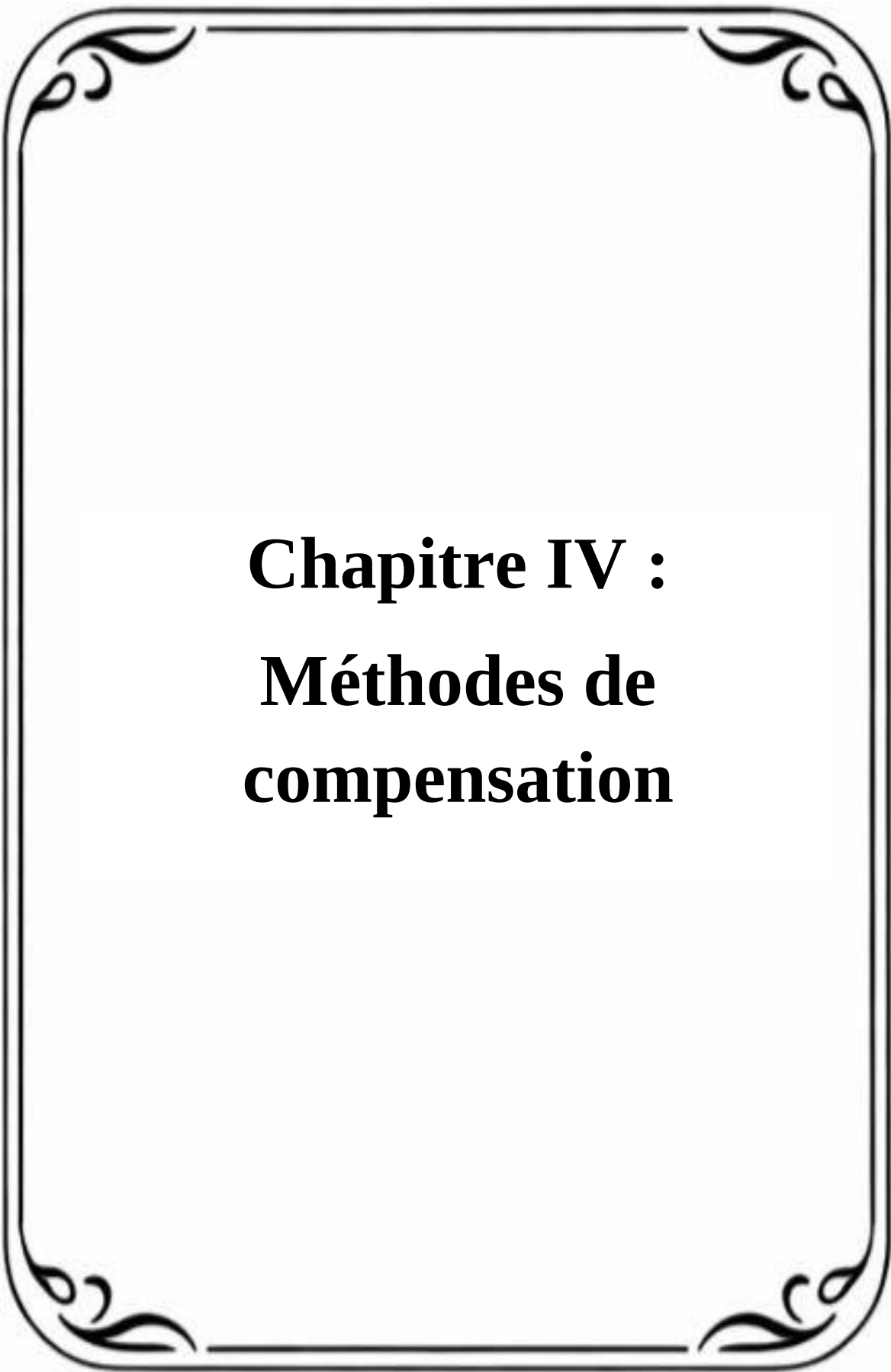
Cette modélisation constitue la base algorithmique qui sera implémentée dans la suite de notre étude, afin d'assurer une correction précise et automatique des mesures [61].

### III.11 Conclusion

L'examen approfondi des erreurs systématiques mené au cours de ce chapitre permet d'affirmer que ces déviations, loin d'être des perturbations aléatoires et imprévisibles, constituent des phénomènes déterministes dont l'origine est intrinsèquement liée aux lois physiques régissant la chaîne de mesure. En comprenant que chaque écart – qu'il s'agisse d'une dérive thermique, d'un effet de charge ou d'une non-linéarité – répond à une logique causale identifiable, nous changeons de paradigme : l'erreur n'est plus une fatalité subie, mais une variable modélisable [62].

Cette capacité à traduire des imperfections physiques en modèles mathématiques rigoureux représente l'étape clé de notre étude, car elle transforme un biais de mesure en une donnée exploitable. Dès lors, la maîtrise de la justesse d'un système ne repose plus uniquement sur la qualité de sa fabrication, mais sur notre aptitude à quantifier ces modèles pour anticiper les corrections nécessaires.

Cette conclusion jette ainsi les bases indispensables du chapitre suivant, qui s'attachera à convertir ces analyses théoriques en solutions concrètes. Nous y explorerons comment l'étalonnage et les techniques de compensation, qu'elles soient intégrées au niveau du matériel par des dispositifs de régulation ou au niveau logiciel par des algorithmes de traitement numérique, permettent de neutraliser ces erreurs pour tendre vers une précision optimale [63].



# **Chapitre IV : Méthodes de compensation**

## IV.1 Introduction

Dans les systèmes de mesure, la fiabilité des résultats est essentielle, notamment dans le domaine industriel où elle conditionne la qualité de la production, la sécurité des produits et la conformité réglementaire. Pourtant, tous les instruments de mesure dérivent naturellement au fil du temps et peuvent être influencés par différentes sources d'erreurs telles que les perturbations externes, les variations de température ou encore les imperfections des capteurs et des circuits électroniques. Ces erreurs entraînent une diminution de la précision et de la fiabilité des mesures [64].

C'est là qu'interviennent l'étalonnage et les méthodes de compensation. L'étalonnage est une opération métrologique qui permet d'identifier les écarts des instruments de mesure, tandis que les méthodes de compensation, matérielles ou logicielles, visent à corriger ou réduire l'effet de ces perturbations. Ces techniques jouent un rôle essentiel dans les systèmes d'instrumentation modernes, car elles permettent d'obtenir des mesures plus précises et stables [65].

Dans ce chapitre, nous présenterons le principe des méthodes de compensation ainsi que les différentes approches utilisées pour réduire les erreurs dans la chaîne de mesure. L'objectif est également de montrer comment ces méthodes contribuent à améliorer les performances globales des systèmes d'instrumentation, un aspect crucial dans tous les domaines où la précision des mesures est essentielle [66].

## IV.2 Principe d'étalonnage et de correction

### IV.2.1 L'étalonnage

L'étalonnage, ou calibration, est le processus de vérification et d'ajustement des sorties d'un instrument de mesure par rapport à un étalon de référence. Vous utilisez l'étalonnage pour vous assurer que vos instruments produisent des résultats qui reflètent la réalité le plus fidèlement possible, améliorant ainsi l'exactitude [67].

L'étalonnage d'un instrument consiste à appliquer une valeur connue en entrée du système de mesure afin de vérifier que la sortie correspond bien à la valeur attendue. La valeur d'entrée est fournie par une grandeur étalon. En entrant différentes valeurs connues, on peut obtenir en sortie la courbe d'étalonnage  $y = f(x)$  de l'instrument qui permet de relier la valeur lue en sortie notée  $y$  à la vraie valeur de la grandeur physique à mesurer notée  $x$ .

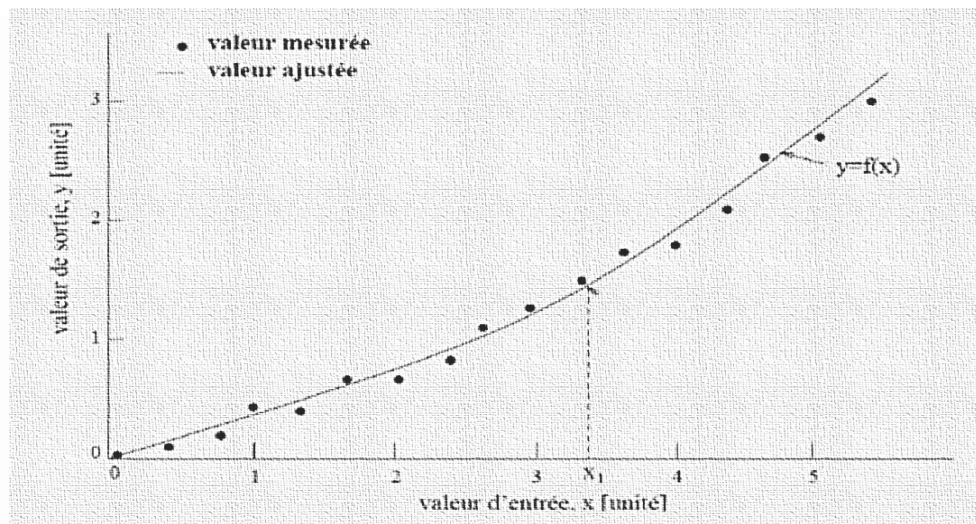


**Figure IV.1 :** Représentation graphique des valeurs mesurées et ajustées [68].

C'est particulièrement utile lorsque la réponse de l'instrument est non linéaire. Ce type d'étalonnage est généralement effectué par le fabricant de l'appareil de mesure.

L'opération d'étalonnage permet aussi de déduire la justesse de l'instrument. La justesse est l'aptitude de l'instrument à fournir la vraie valeur de la grandeur physique. En entrant une valeur connue, on peut mesurer l'erreur due à l'instrument et définir la justesse par [69] :

$$e = \frac{|\text{valeur mesurée} - \text{valeur vraie}|}{|\text{valeur vraie}|} \times 100 \quad \text{IV.1}$$

L'étalonnage peut être simple ou multiple suivant que la valeur de sortie dépend d'une ou de plusieurs grandeurs physiques d'entrée [67 - 69].

### IV.2.2 La correction

Les résultats obtenus lors de l'étalonnage permettent également de corriger les mesures. En effet, après avoir déterminé l'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle, il est possible d'ajuster les mesures pour obtenir des résultats plus précis. Cette correction peut être réalisée de manière logicielle, en modifiant les valeurs dans le programme de traitement des données, ou matérielle [58], en utilisant des circuits de compensation tels que les ponts de Wheatstone ou les compensateurs [59]. Ainsi, l'étalonnage constitue la première étape, tandis que la correction permet d'améliorer la fiabilité et la justesse des mesures [70 -71].

### IV.3 Méthodes matérielles de compensation

Les méthodes de compensation matérielle reposent sur la modification directe des circuits électroniques pour corriger certaines erreurs systématiques, comme les erreurs d'offset ou de gain, sans utiliser de traitement numérique.

#### ➤ Compensation matérielle

- Composants à faible dérive thermique
- Capteurs de température

#### ➤ Compensation logicielle

- Correction via microcontrôleur
- Table de calibration
- Algorithmes DSP

#### ➤ Stabilisation thermique

- Dissipateurs thermiques
- Ventilation

### Exemple en microcontrôleur

- ✓ Dans un convertisseur analogique-numérique (ADC), la variation de  $V_{ref}$  fonction de la température fausse les résultats de conversion. Pour y remédier, l'utilisation d'une référence de tension stable est indispensable [72]. Cette rigueur matérielle est complétée

par l'usage de boîtiers isolés et de circuits de compensation afin d'optimiser le signal avant l'étape de calibration logicielle [73].

### IV.3.1 Pont De Wheatstone

Le Pont de Wheatstone est l'un des montages électroniques les plus utilisés pour mesurer avec précision une résistance inconnue. Il est composé de quatre résistances ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_x$ ) disposées en forme de losange avec une source de tension  $V_{in}$  entre A et B, et une tension de mesure  $V_{out}$  entre C et D.

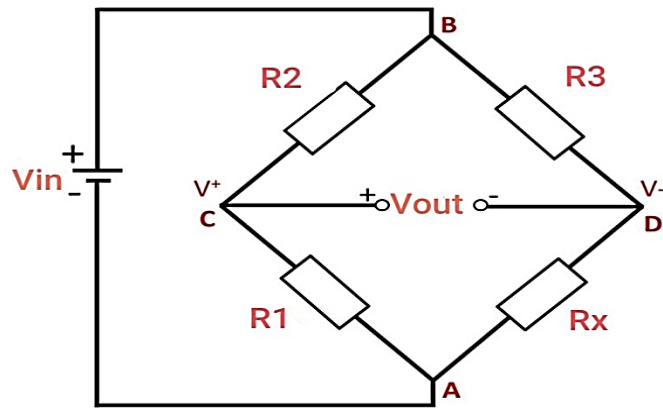


**Figure IV.2 :** Schéma du Pont de Wheatstone [74].

L'équation d'équilibre est 
$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_x} \quad \text{IV.2}$$

Où  $V_{out} = 0$ , annulant les erreurs systématiques dues aux variations de température ou d'alimentation car elles affectent uniformément tous les bras. Dans les jauges de contrainte, le quarter-bridge utilise

$$R_x = R + \Delta R, \text{ avec } V_{out} \approx V_{in} \cdot \frac{\Delta R}{2R} \quad \text{IV.3}$$

Pour  $\Delta R \ll R$ , tandis que le full-bridge (bras opposés) amplifie à

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{\Delta R}{2R} \quad \text{IV.4}$$

et compense automatiquement les erreurs mécaniques et thermiques via push-pull [75].

### IV.3.2 Compensateur

Le compensateur injecte un signal électrique opposé à l'erreur systématique via des AOP (Amplificateur Opérationnel) en amplificateur différentiel.

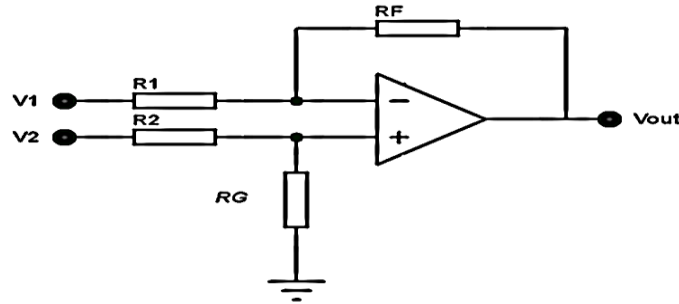


**Figure IV.3 :** Exemple de schéma d'un amplificateur différentiel à amplificateur opérationnel

Où

$$V_{out} = \frac{(R_F + R_1)R_g}{(R_g + R_2)R_1} V_2 - \frac{R_F}{R_1} V_1 \quad \text{IV.5}$$

Si  $R_1 = R_2$  et  $R_F = R_g$  :

$$V_{out} = \frac{R_F}{R_1} (V_2 - V_1) \quad \text{IV.6}$$

Avec  $V_{comp} = -\text{Verreur}$  via potentiomètre ou source de référence. Pour l'offset dans les transducteurs, une résistance dummy (résistance fictive) est ajoutée dans le bras de référence pour simuler les conditions réelles, augmentant le CMRR (Common Mode Rejection Ratio) à  $>120$  dB. Dans les amplificateurs d'instrumentation comme AD620, l'auto-zéro via condensateurs commutable compense le bruit  $1/f$ , avec gain de compensation  $K = -\frac{R_F}{R_g}$  ajusté manuellement pour les erreurs fixes des thermocouples ou capteurs de pression [76].

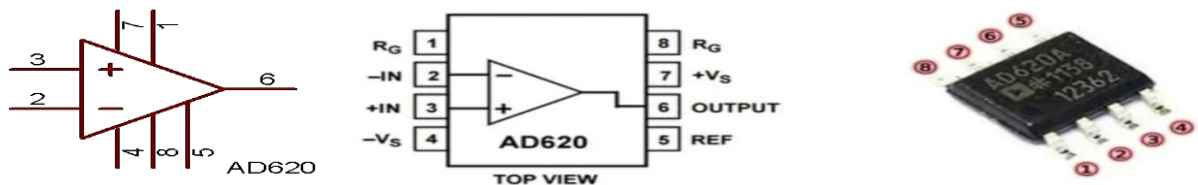


**Figure IV.4 :** Montage et vue externe de l'AD620 [77].

Après avoir présenté les méthodes de compensation via les amplificateurs différentiels et, nous allons maintenant aborder une autre approche, utilisant des filtres pour réduire les erreurs systématiques et le bruit dans les instruments de mesure.

### IV.3.3 Filtres

Les filtres analogiques sont des circuits électroniques utilisés dans les systèmes de mesure pour améliorer la qualité du signal. Ils permettent de séparer le signal utile des composantes indésirables telles que le bruit et les interférences électromagnétiques (IEM).

Le fonctionnement des filtres est généralement décrit par une fonction de transfert  $H(s)$ , qui caractérise la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie en fonction de la fréquence.

Les filtres analogiques peuvent être classés selon les fréquences qu'ils laissent passer :

- **Le passe-bas RC passif**

Ce type de filtre laisse passer les basses fréquences et atténue les hautes fréquences.

Il est souvent utilisé dans les systèmes de mesure pour réduire le bruit haute fréquence et limiter l'influence des interférences électromagnétiques.

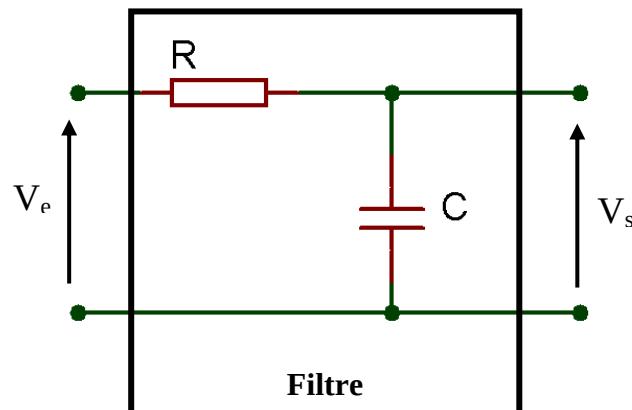


**Figure IV.5 :** Schéma d'un filtre passe-bas RC

$$H(s) = \frac{1}{1+sRC} \quad \text{IV.7}$$

La fréquence de coupure de ce filtre est donnée par :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{IV.8}$$

Au-delà de cette fréquence, l'atténuation du signal est d'environ  $-20$  dB par décade.

- **Filtre actif Sallen-Key (2<sup>ème</sup> ordre)**

Les filtres actifs utilisent des amplificateurs opérationnels afin d'obtenir une meilleure sélectivité et un contrôle plus précis de la fréquence de coupure.

Le filtre passe-bas actif de type Sallen-Key est largement utilisé dans les circuits électroniques de mesure pour améliorer la qualité du signal et réduire l'influence du bruit.

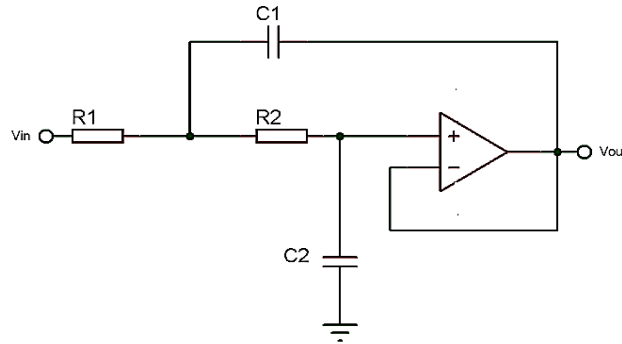


**Figure IV.6 :** Schéma d'un filtre actif Sallen-Key

La fonction de transfert d'un filtre Sallen-Key de second ordre peut s'écrire sous la forme :

$$H(s) = \frac{\omega_o^2}{s^2 + \frac{\omega_o}{Q}s + \omega_o^2} \quad \text{IV.9}$$

Où :

- $\omega_o$  : La pulsation propre du filtre
- $Q$  : Le facteur de qualité qui détermine la sélectivité du filtre

L'utilisation des filtres analogiques dans les systèmes de mesure est une méthode matérielle efficace pour réduire le bruit et les perturbations, et ainsi améliorer la précision des instruments électroniques.

Quant aux filtres numériques, ils représentent une autre façon de réduire le bruit et de corriger les erreurs, mais ils seront abordés plus tard dans le cadre des méthodes logicielles de compensation [78].

#### IV.4 Méthodes logicielles de compensation

Les méthodes logicielles de compensation des erreurs systématiques constituent une approche numérique efficace pour corriger les biais dans les instruments électroniques de mesure, en traitant les données post-acquisition sans modifier le matériel. Elles s'appuient sur des algorithmes, des modèles statistiques et l'intelligence artificielle, particulièrement adaptées aux microcontrôleurs comme Arduino et aux environnements de simulation tels que

MATLAB/Simulink. Ces techniques réduisent les erreurs liées à la température, au vieillissement ou aux non-linéarités des capteurs. Contrairement aux méthodes matérielles, elles permettent une mise à jour dynamique et une adaptation en temps réel, essentielle pour les systèmes embarqués modernes.

#### IV.4.1 Correction algorithmique

La correction algorithmique est une méthode logicielle utilisée pour réduire ou éliminer les erreurs systématiques dans les systèmes de mesure. Cette approche utilise des algorithmes et des formules mathématiques simples pour corriger les valeurs mesurées.

Le principe consiste à appliquer une relation mathématique permettant de compenser l'erreur identifiée lors de la phase d'étalonnage. Par exemple, si l'instrument présente un offset constant, la valeur corrigée peut être obtenue en soustrayant cette erreur de la valeur mesurée.

$$V_{\text{corrigée}} = V_{\text{mesurée}} - \Delta e \quad \text{IV.10}$$

Dans cette relation,  $V_{\text{mesurée}}$  représente la valeur fournie par l'instrument de mesure, tandis que  $\Delta e$  correspond à l'erreur systématique déterminée lors de l'étalonnage. Après l'application de cette correction, on obtient la valeur  $V_{\text{corrigée}}$ , qui est plus proche de la valeur réelle.

Dans plusieurs instruments modernes, comme les voltmètres numériques, cette correction est réalisée automatiquement grâce à un algorithme intégré dans le firmware (système interne) de l'appareil. Dès que la mesure est effectuée, le système applique la correction en temps réel avant d'afficher le résultat final.

#### Remarque

- ✓ Le firmware est un programme intégré dans un appareil électronique qui contrôle son fonctionnement et permet le traitement des données mesurées.

Cette méthode présente plusieurs avantages. Elle permet d'améliorer la précision des mesures sans modifier le matériel, ce qui réduit le coût et la complexité du système. Elle est particulièrement efficace dans les chaînes de mesure où les sources d'erreurs sont connues, stables et facilement modélisables. Ainsi, la correction algorithmique constitue une solution pratique et flexible pour améliorer la fiabilité des instruments de mesure [79].

### IV.4.2 Régression linéaire

La régression linéaire permet de corriger les mesures en établissant un lien entre ce que l'instrument indique et la valeur réelle. Elle utilise une droite

$$y = ax + b \quad \text{IV.11}$$

Dans cette équation,  $x$  représente la valeur mesurée par l'instrument, tandis que  $y$  correspond à la valeur réelle ou corrigée. Les coefficients  $a$  et  $b$  représentent respectivement la pente de la droite et l'offset. Ils s'obtiennent par minimisation des moindres carrés, qui consiste à trouver la droite qui minimise l'erreur entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées. Cette méthode permet d'obtenir les estimations suivantes [80] :

$$\hat{a} = \frac{n \sum(xy) - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, \quad \hat{b} = \bar{y} - \hat{a} \bar{x} \quad \text{IV.12}$$

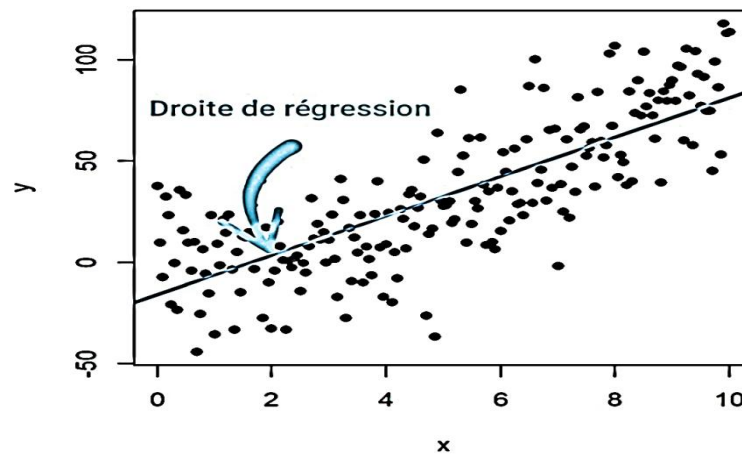


**Figure IV.7 :** Représentation graphique d'une régression linéaire [81]

Cette figure illustre comment les points expérimentaux sont ajustés par une droite de régression pour estimer la valeur correcte des mesures.

### IV.4.3 : Intelligence artificielle (IA)

L'intelligence artificielle (IA) représente une approche moderne et très efficace pour améliorer la précision des systèmes de mesure, surtout quand les méthodes traditionnelles arrivent à leurs limites face à des erreurs complexes. Par exemple, contrairement aux techniques classiques de correction qui reposent souvent sur des formules fixes, l'IA utilise des algorithmes intelligents pour analyser de grandes quantités de données expérimentales, modéliser les erreurs

de façon automatique et les compenser en temps réel, ce qui la rend beaucoup plus adaptable aux conditions variables.

#### IV.4.3.1 : Applications du Machine Learning en instrumentation électronique

Dans le domaine de l'instrumentation électronique, les techniques de Machine Learning (ML), comme les réseaux de neurones ou les arbres de décision, sont particulièrement adaptées pour corriger les erreurs systématiques. Le principe de base est simple : on entraîne un modèle mathématique sur un ensemble de données d'étalonnage, où l'on couple les grandeurs mesurées (sortie du capteur) avec les valeurs réelles de référence (obtenues par un étalon précis). Ce processus d'apprentissage supervisé permet au modèle d'identifier des patterns cachés dans les données, même ceux qui sont non linéaires ou influencés par des facteurs comme la température ambiante ou le vieillissement du matériel.

Afin d'illustrer ce principe, la figure suivante présente le processus d'apprentissage du Machine Learning.

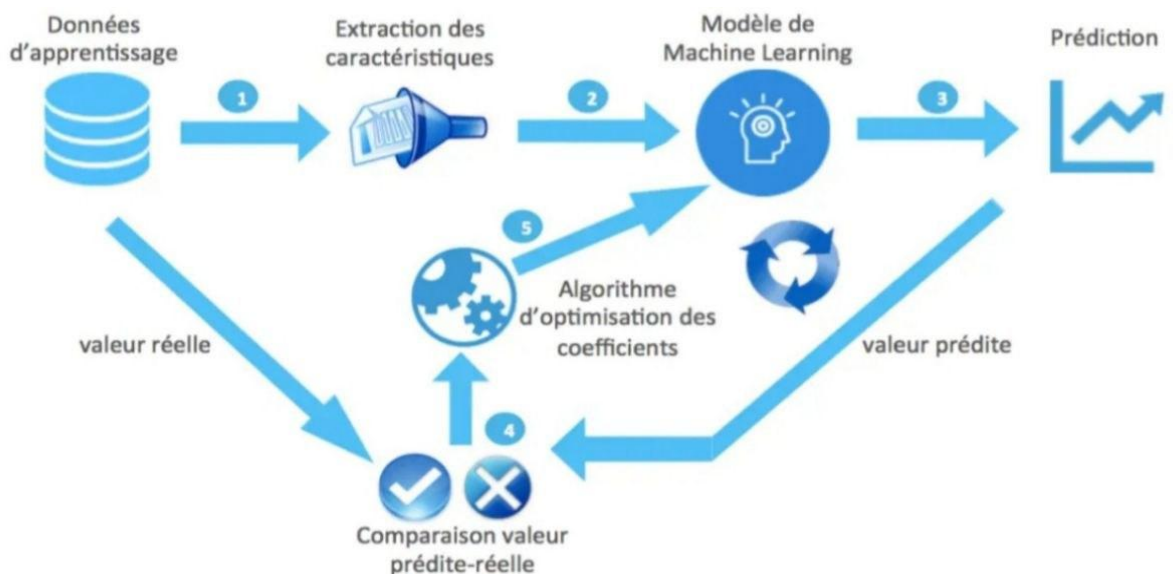


**Figure IV.8 :** Processus d'apprentissage du Machine Learning appliqué à la correction des erreurs de mesure

#### IV.4.3.2 : Avantages pour les prédictions et corrections en temps réel

Une fois le modèle bien entraîné, il peut prédire l'erreur potentielle pour n'importe quelle nouvelle mesure et calculer instantanément une valeur corrigée avec une précision bien supérieure. Cela est idéal pour les cas où les erreurs sont trop complexes pour être modélisées analytiquement, comme les distorsions non linéaires ou les interférences électromagnétiques qui

défient les équations classiques. Par exemple, avec un capteur de température comme le LM35, qui produit une tension proportionnelle à la température (10 mV/°C), un modèle ML peut apprendre à compenser les offsets dus au bruit ou aux variations de gain, réduisant l'écart moyen entre mesure et réalité de plusieurs degrés à moins d'un dixième de degré dans bien des expériences.

Afin d'illustrer l'efficacité de la méthode de correction, la figure suivante présente une comparaison des mesures avant et après application du Machine Learning.

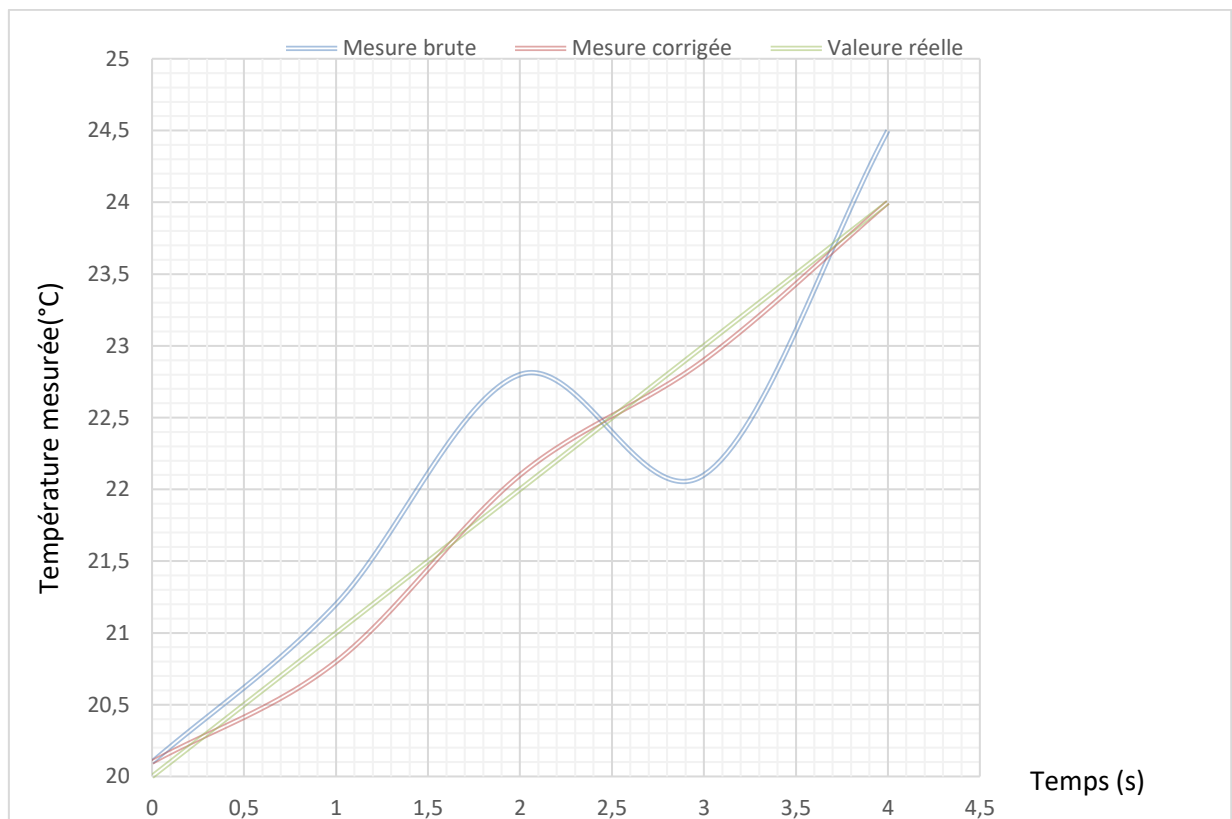


**Figure IV.9 :** Comparaison des mesures avant et après correction par Machine Learning

On observe que les mesures corrigées sont nettement plus proches des valeurs réelles, ce qui confirme l'efficacité du Machine Learning dans la réduction des erreurs de mesure.

En résumé, intégrer l'IA dans les systèmes de mesure n'est pas une révolution qui remplace tout, mais une solution innovante qui complète parfaitement les approches matérielles (comme les circuits de compensation analogiques) et les méthodes analytiques classiques telles que la régression linéaire. Son vrai atout réside dans sa capacité d'adaptation dynamique aux changements du système, comme l'usure des composants ou les environnements imprévus, ce qui ouvre la voie à des instruments plus robustes et intelligents dans l'industrie et la recherche [82].

## IV.5 : Comparaison entre les méthodes matérielles et logicielles de compensation

| Critère                        | Méthodes matérielles                                              | Méthodes logicielles                                            |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Principe</b>                | Basées sur la modification directe du circuit électronique.       | Basées sur le traitement numérique du signal.                   |
| <b>Mise en œuvre</b>           | Nécessitent des composants électroniques (circuits, capteurs...)  | Nécessitent une programmation (Arduino, MATLAB, algorithmes...) |
| <b>Coût</b>                    | Élevé initialement en raison des composants et de la fabrication. | Faible ; souvent gratuit avec des outils open source.           |
| <b>Précision de correction</b> | Bonne pour les erreurs simples et linéaires.                      | Excellente pour les erreurs complexes et non linéaires.         |
| <b>Flexibilité</b>             | Limitée (fixe après fabrication)                                  | Élevée (modifiable facilement)                                  |
| <b>Maintenance</b>             | Difficile                                                         | Facile grâce aux mises à jour logicielles.                      |
| <b>Vitesse de réponse</b>      | Très rapide (temps réel analogique)                               | Dépend du processeur.                                           |
| <b>Exemples</b>                | Circuits d'étalonnage, filtres analogiques,                       | Régression linéaire, réseaux de neurones.                       |
| <b>Avantages principaux</b>    | Simple, fiable, pas besoin de processeur.                         | Flexible, précise, capable d'apprendre.                         |
| <b>Inconvénients</b>           | Peu flexible, difficile pour les erreurs complexes.               | Nécessite des données d'entraînement, processeur puissant.      |

**Tableau IV.1 :** Comparaison des méthodes de compensation matérielles et logicielles

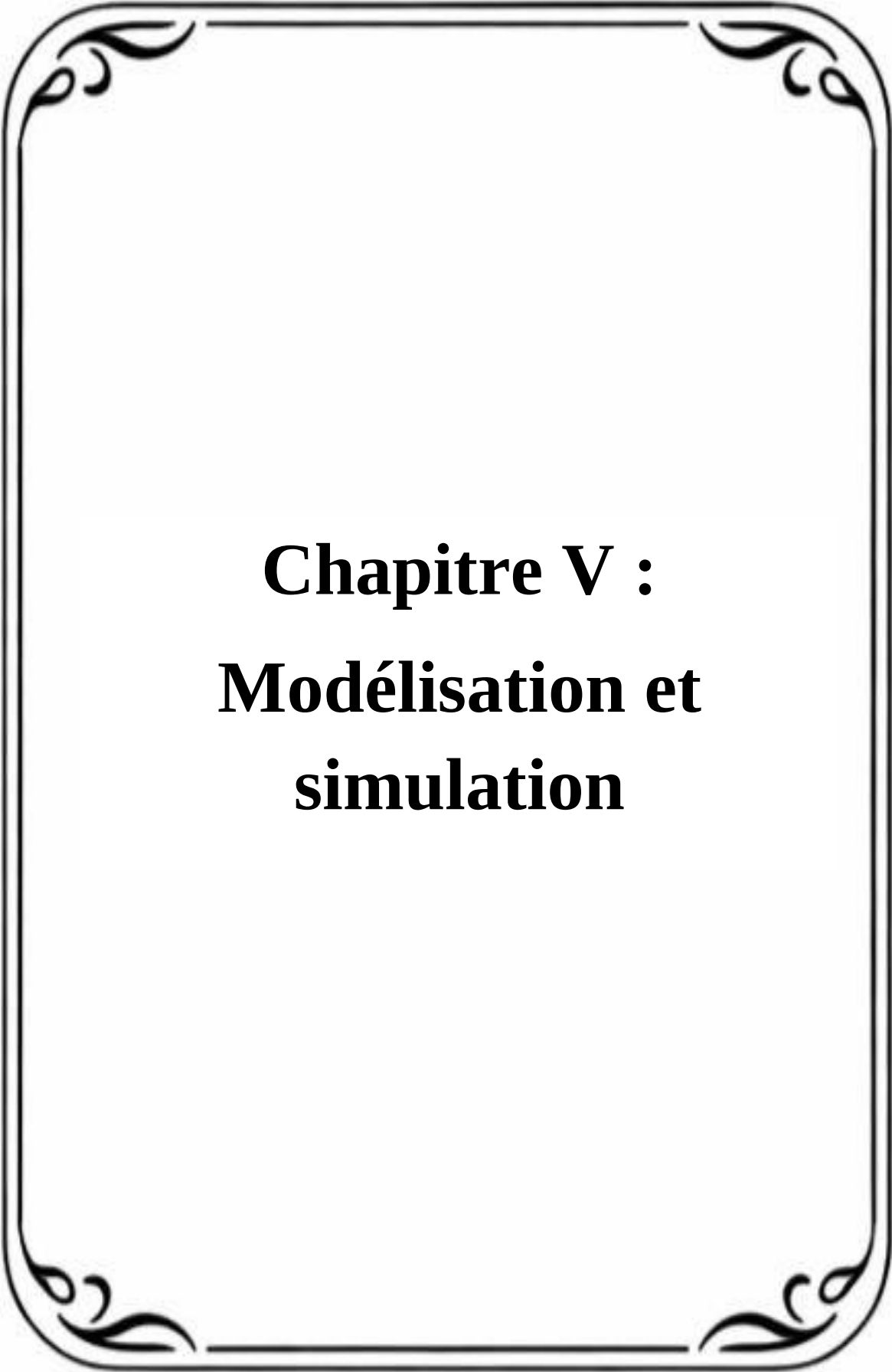
[73 - 83]

Ainsi, les méthodes matérielles offrent une correction directe et stable, tandis que les méthodes logicielles permettent une plus grande flexibilité et une optimisation continue des performances du système.

## IV.6 : Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter les principales méthodes de compensation utilisées dans les systèmes de mesure pour améliorer leur précision et leur fiabilité. On a d'abord vu les bases de l'étalonnage et de la correction, puis les approches matérielles comme les circuits de compensation, avant de parler des méthodes logicielles, notamment la régression linéaire et le rôle clé de l'intelligence artificielle qui change vraiment la donne. En combinant toutes ces techniques, on arrive à réduire efficacement les erreurs systématiques et à optimiser les performances des systèmes électroniques modernes, rendant les appareils plus robustes au quotidien.

Ces méthodes sont aujourd'hui essentielles pour évoluer vers des systèmes de mesure intelligents et plus fiables, comme on le voit dans beaucoup de projets industriels et de recherches. Pour valider ces approches, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à la simulation sous MATLAB/Simulink, afin de quantifier l'amélioration de la précision obtenue [84].



# **Chapitre V :**

## **Modélisation et simulation**

## V.1 Introduction

Après avoir présenté les différentes sources d'erreurs systématiques ainsi que les méthodes de compensation dans les chapitres précédents, ce chapitre a pour objectif de passer à une étape essentielle du travail, qui est la validation pratique. En effet, il ne suffit pas de décrire les erreurs de manière théorique, mais il est nécessaire de les modéliser et d'observer concrètement leur influence sur les mesures.

Dans ce cadre, l'outil de simulation MATLAB a été employé pour illustrer le fonctionnement d'un système de mesure réel, introduire des erreurs systématiques et ensuite mettre en œuvre des techniques de compensation. L'atout de cette méthode réside dans sa capacité à illustrer de manière précise la différence entre la valeur réelle et la valeur mesurée, tout en démontrant comment il est possible de minimiser cet écart [85].

Pour assurer l'exhaustivité et la clarté de cette recherche, nous avons adopté une approche graduelle : débiter avec un modèle basique, puis intégrer des situations plus authentiques pour finalement examiner les résultats obtenus [86].

## V.2 Modélisation mathématique des erreurs systématiques

La modélisation consiste à établir une relation analytique entre la valeur de référence d'une grandeur physique et la valeur fournie par l'instrument de mesure. Afin de permettre une analyse plus précise et structurée des erreurs systématiques, une approche modulaire a été adoptée, consistant à décomposer l'erreur globale en quatre modèles distincts mais complémentaires [87].

### V.2.1 Modèle de l'erreur d'offset (décalage)

L'erreur d'offset correspond à une déviation constante qui s'ajoute au signal de mesure, indépendamment de l'amplitude de l'entrée. Dans les systèmes électroniques, cette erreur est principalement due aux tensions de décalage résiduelles des amplificateurs opérationnels ainsi qu'aux courants de polarisation.

Mathématiquement, elle peut être modélisée par une simple relation additive [88] :

$$V_{out} = V_{in} + V_{offset} \quad V.1$$

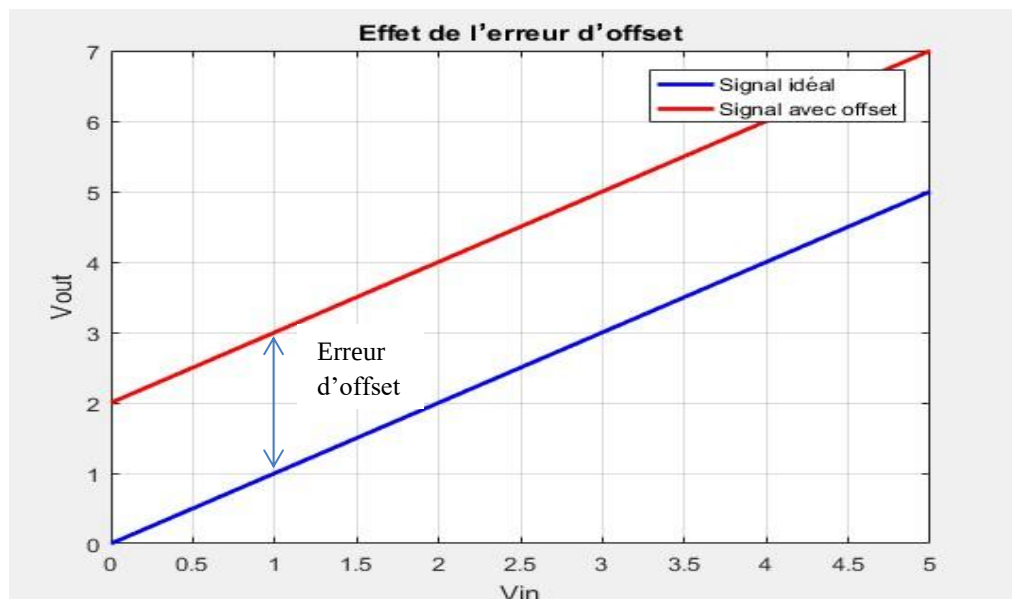


**Figure V.1 :** Relation entre  $V_{in}$  et  $V_{out}$  illustration l'effet de l'erreur d'offset

Ce graphe représente l'effet de l'erreur d'offset, qui se traduit par un décalage constant entre le signal idéal et le signal mesuré, sans modification de la pente.

L'importance de ce modèle réside dans sa capacité à représenter le décalage du "zéro" de l'instrument de mesure. En simulation, il permet notamment de vérifier la capacité de l'algorithme à recalibrer le point de référence du système.

### V.2.2 Modèle de l'erreur de gain

Contrairement à l'erreur d'offset, l'erreur de gain est de nature multiplicative. Elle se traduit par une modification de la pente de la droite de transfert de l'instrument de mesure. Elle est généralement due aux tolérances des composants, notamment les résistances définissant le gain des étages d'amplification.

Si le gain réel s'écarte du gain théorique d'un facteur, le modèle peut s'écrire [53 - 89] :

$$V_{\text{out}} = (1 + \varepsilon_g) V_{\text{in}} \quad \text{V.2}$$

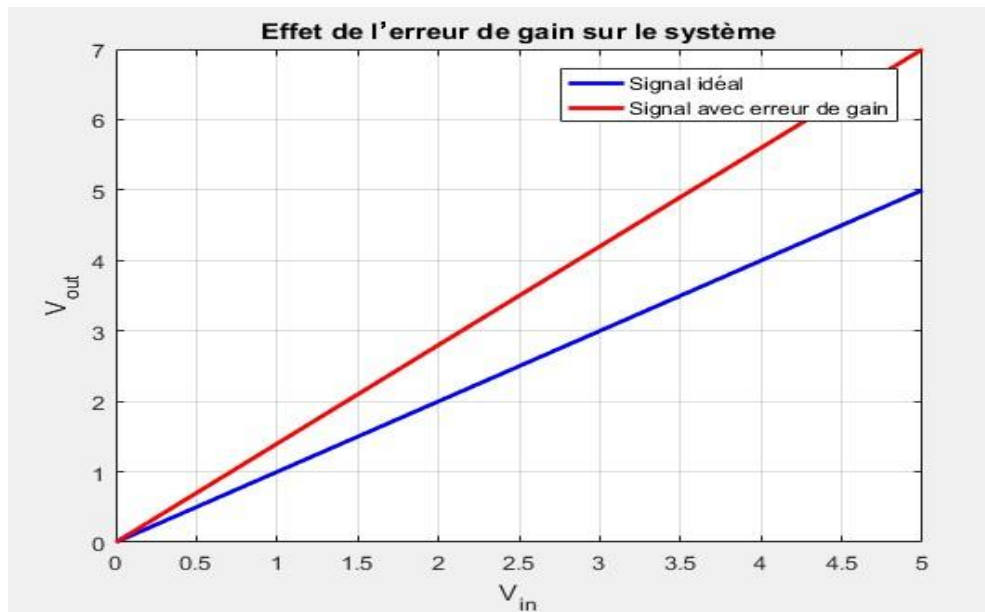


**Figure V.2 :** Effet de l'erreur de gain sur la caractéristique entrée-sortie du système de mesure

Ce graphe montre l'effet de l'erreur de gain sur la relation entrée-sortie du système. Contrairement à l'offset, cette erreur ne provoque pas de décalage, mais modifie uniquement la pente de la caractéristique.

Ainsi, le signal reste linéaire mais amplifié ou atténué par rapport au signal idéal. Ce type d'erreur est généralement lié aux tolérances des composants électroniques et influence directement la sensibilité du système.

Ce modèle est important car il permet de représenter une erreur proportionnelle à la grandeur mesurée. Il constitue également un outil essentiel pour évaluer la linéarité du système après compensation logicielle.

### V.2.3 Modèle de l'erreur de Non-linéarité

Dans les systèmes de mesure réels, la relation entre l'entrée et la sortie n'est jamais parfaitement linéaire. Afin de représenter ce comportement, on introduit un modèle polynomial permettant de simuler la courbure de la caractéristique de transfert, généralement due aux effets de saturation des composants électroniques ou aux limitations intrinsèques des capteurs.

Le modèle de non-linéarité est exprimé par [75] :

$$V_{\text{out}} = aV_{\text{in}}^2 + bV_{\text{in}} + c \quad \text{V.3}$$

Où :

- $a$  : représente le coefficient de non-linéarité
- $b$  : le gain linéaire du système
- $c$  : correspond à l'offset

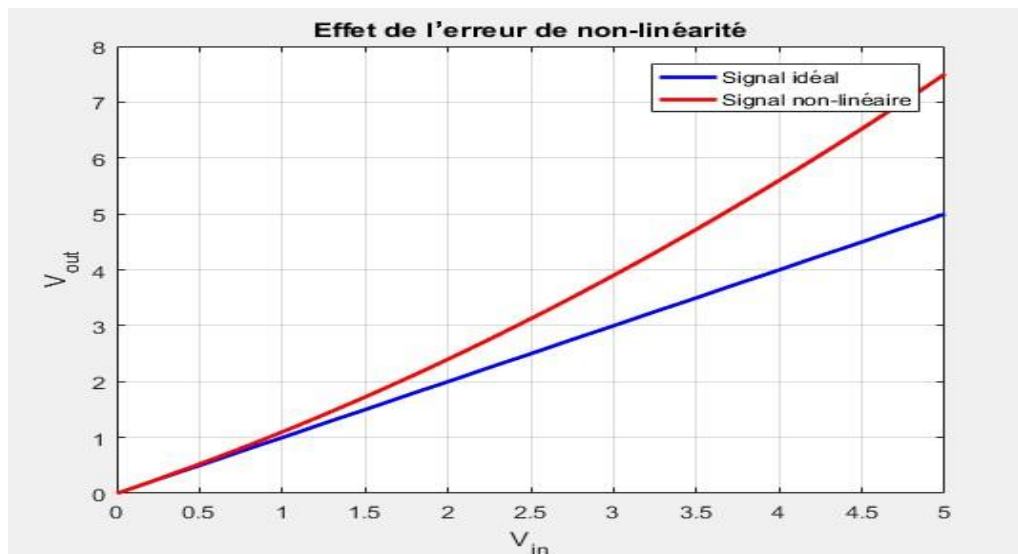


**Figure V.3 :** Effet de l'erreur de non-linéarité sur la caractéristique entrée-sortie du système de mesure

Ce graphe met en évidence la déformation de la réponse du système due à l'erreur de non-linéarité. On remarque que la sortie ne suit plus une évolution strictement proportionnelle à l'entrée, ce qui traduit une altération de la caractéristique de transfert du capteur.

L'intégration de ce modèle permet de montrer que la méthode de compensation développée est capable de corriger des erreurs complexes, améliorant ainsi la fidélité de l'instrument sur toute sa plage de mesure.

### V.2.4 Modèle de la dérive thermique (thermal drift)

L'erreur systématique peut dépendre de la température ambiante. Afin de simuler ce phénomène étudié au Chapitre III, nous modélisons la variation de l'offset en fonction de l'écart de température  $\Delta T$  par rapport à une température de référence  $T_0$ .

En introduisant le coefficient de dérive thermique  $a$ , la composante de dérive est donnée par [53] :

$$V_{\text{drift}}(T) = a (T - T_0) \quad \text{V.4}$$

La sortie du système devient alors :

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} + V_{\text{drift}}(T) \quad \text{V.5}$$

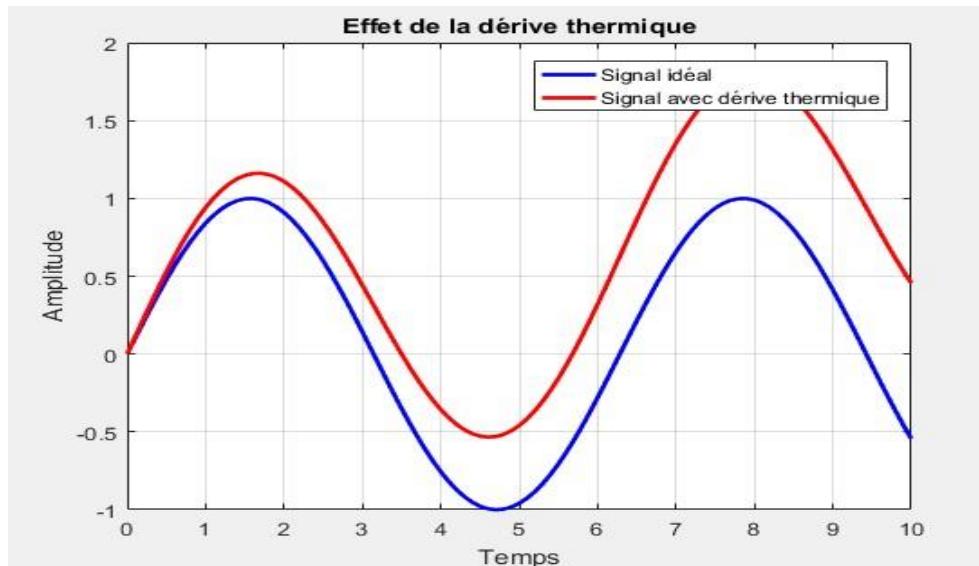


**Figure V.4 :** Évolution du signal en présence d'une dérive thermique en fonction du temps

Ce graphe met en évidence l'effet de la dérive thermique sur le signal de sortie. On observe un écart progressif entre le signal idéal et le signal mesuré, traduisant une variation de la réponse du système sous l'influence de la température.

Ce modèle est essentiel pour évaluer la stabilité de l'instrument dans des environnements industriels variables. Il permet de simuler un instrument dont la réponse dérive progressivement avec l'élévation de la température.

### V.2.5 Synthèse des modèles d'erreurs systématiques

Les modèles présentés précédemment permettent de décrire de manière progressive et complémentaire les principales sources d'erreurs systématiques affectant les instruments de mesure.

L'erreur d'offset introduit un décalage constant, tandis que l'erreur de gain modifie la sensibilité du système. Le modèle de non-linéarité permet de représenter les déformations de la caractéristique de transfert, alors que la dérive thermique prend en compte l'influence des conditions environnementales, notamment la température.

La combinaison de ces modèles permet d'obtenir une représentation globale plus réaliste du comportement de l'instrument [90]. Elle constitue une base essentielle pour le développement et la validation des méthodes de compensation, notamment à travers des simulations sous MATLAB.

Ainsi, cette approche de modélisation offre un cadre robuste pour analyser, prédire et corriger les erreurs systématiques, en vue d'améliorer la précision et la fiabilité des systèmes de mesure.

## V.3 Simulation et compensation des erreurs systématiques sous MATLAB/Simulink

Pour valider concrètement l'efficacité des méthodes de compensation étudiées, nous avons choisi de passer par une phase de simulation numérique. L'environnement MATLAB/Simulink s'est imposé pour cette étape, grâce à sa puissance de calcul et sa grande flexibilité dans la modélisation des systèmes de mesure.

Notre démarche se résume à simuler une chaîne de mesure complète en suivant deux étapes clés :

- **La modélisation de la perturbation** : où le signal idéal est volontairement altéré par l'injection d'erreurs systématiques (Offset, Gain, Non-linéarité et Dérive thermique).
- **L'implémentation de la compensation** : où notre algorithme intervient pour corriger ces déviations et estimer la valeur initiale avec la plus haute précision possible.

L'organigramme suivant (Figure V.5) synthétise cette approche méthodologique :

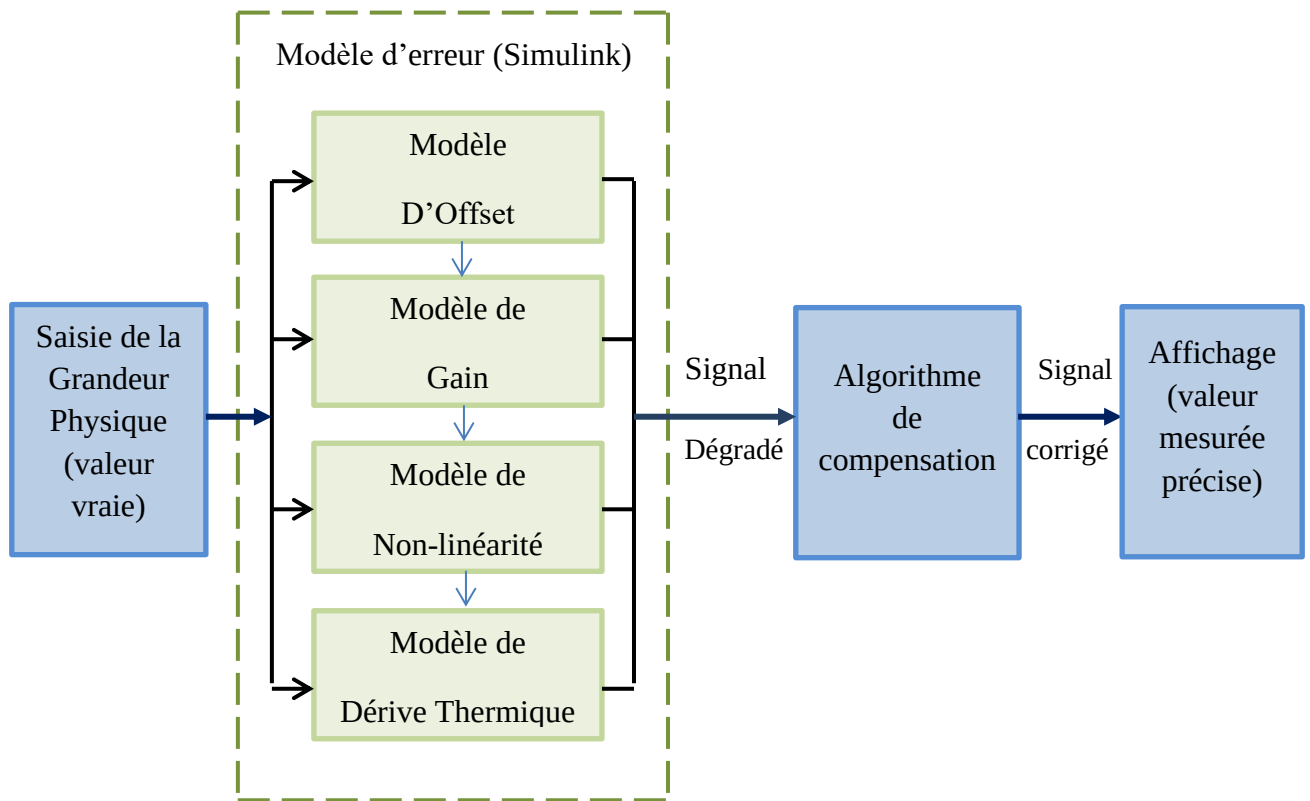


**Figure V.5 :** Organigramme du processus de simulation et de compensation des erreurs systématiques

Après avoir défini la structure globale de notre approche, l'étape suivante a consisté à donner vie à cet organigramme au sein de l'environnement MATLAB/Simulink. Nous avons privilégié cet outil car il permet de manipuler les signaux de façon très intuitive et modulaire. En nous appuyant sur les bibliothèques de Simulink, nous avons réussi à bâtir un simulateur qui reflète fidèlement la réalité d'un instrument de mesure, tout en nous laissant la liberté de doser précisément les perturbations injectées. C'est, à nos yeux, un passage obligé pour mettre à l'épreuve la fiabilité de notre méthode avant d'envisager une mise en œuvre concrète.

### V.3.1 Architecture du schéma bloc

Le simulateur développé est structuré autour de trois blocs principaux interconnectés en série :

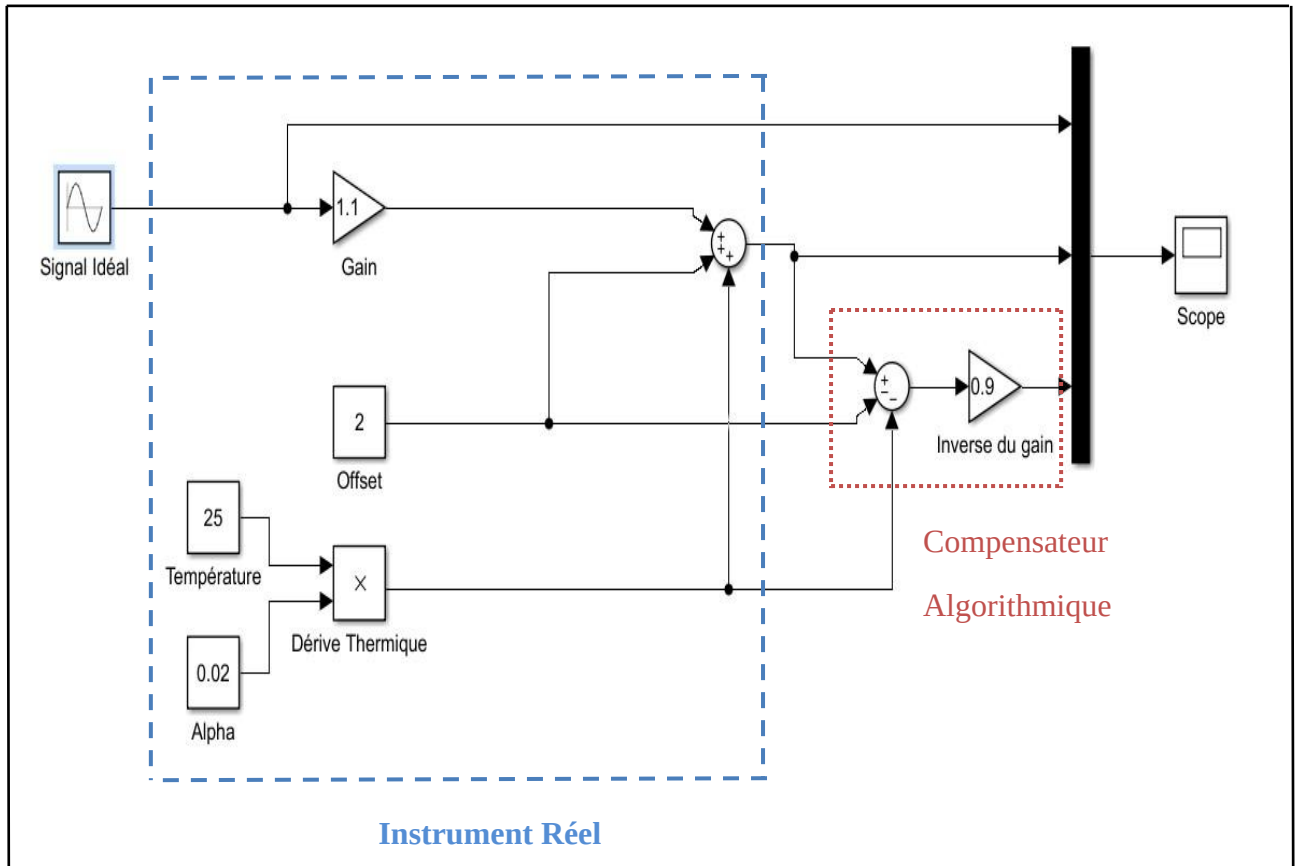


**Figure V.6 :** Architecture globale du simulateur de compensation sous Simulink

- **Générateur de signal :** Il produit un signal sinusoïdal de tension représentant la valeur idéale (ou de référence) du signal d'entrée.
- **Sous-système de perturbation :** Ce bloc intègre les différents modèles d'erreurs systématiques définis précédemment (offset, gain, non-linéarité et dérive thermique). Il permet de transformer le signal idéal en un signal réel dégradé.
- **Bloc de compensation algorithmique :** Ce bloc constitue le cœur du système. L'algorithme implémenté (basé sur une régression linéaire ou une table de correspondance) analyse le signal perturbé et applique les corrections nécessaires afin d'estimer la valeur initiale.

### V.3.2 Implémentation sous MATLAB/Simulink

Après avoir défini l'organisation fonctionnelle du système, nous détaillons ici sa mise en œuvre technique. L'implémentation a été réalisée selon une approche modulaire en utilisant les bibliothèques standards de Simulink.

#### V.3.2.1 Description des blocs utilisés

Pour construire notre simulateur, nous avons utilisé les blocs clés suivants :

- **Sine Wave** : Utilisé comme générateur pour fournir la tension d'entrée sinusoïdale de référence.
- **Constant & Gain** : Ces blocs permettent d'introduire les erreurs systématiques (Offset et Gain) ainsi que les coefficients de dérive.
- **Product** : Utilisé pour modéliser la dérive thermique en multipliant le coefficient  $\alpha$  par la température.
- **Sommateur (Add)** : Permet de combiner le signal idéal avec les différentes perturbations pour obtenir le signal réel dégradé.
- **Bloc de compensation** : Un sous-système qui applique les corrections inverses pour restaurer le signal original.
- **Scope** : Un outil de visualisation essentiel pour comparer en temps réel les signaux idéal, perturbé et compensé.

#### V.3.2.2 Paramètres de simulation

Afin de valider le modèle dans des conditions proches de la réalité, les paramètres numériques suivants ont été adoptés dans notre simulation :

| Paramètre                       | Symbole          | Valeur    |
|---------------------------------|------------------|-----------|
| Amplitude du signal idéal       | $A$              | 10 V      |
| Fréquence du signal             | $f$              | 50 Hz     |
| Erreur d'Offset                 | $V_{\text{Off}}$ | 2 V       |
| Erreur de Gain                  | $G$              | 1.1 V     |
| Coefficient de dérive thermique | $\alpha$         | 0.02 V/°C |
| Température de référence        | $T$              | 25 °C     |

**Tableau V.1** : Paramètres de configuration des blocs de simulation

### V.3.3 Résultats de simulation et interprétation

Afin d'évaluer les performances du système proposé, plusieurs simulations ont été réalisées sous MATLAB/Simulink en appliquant les différents modèles d'erreurs systématiques sur un signal d'entrée de type Sine Wave.

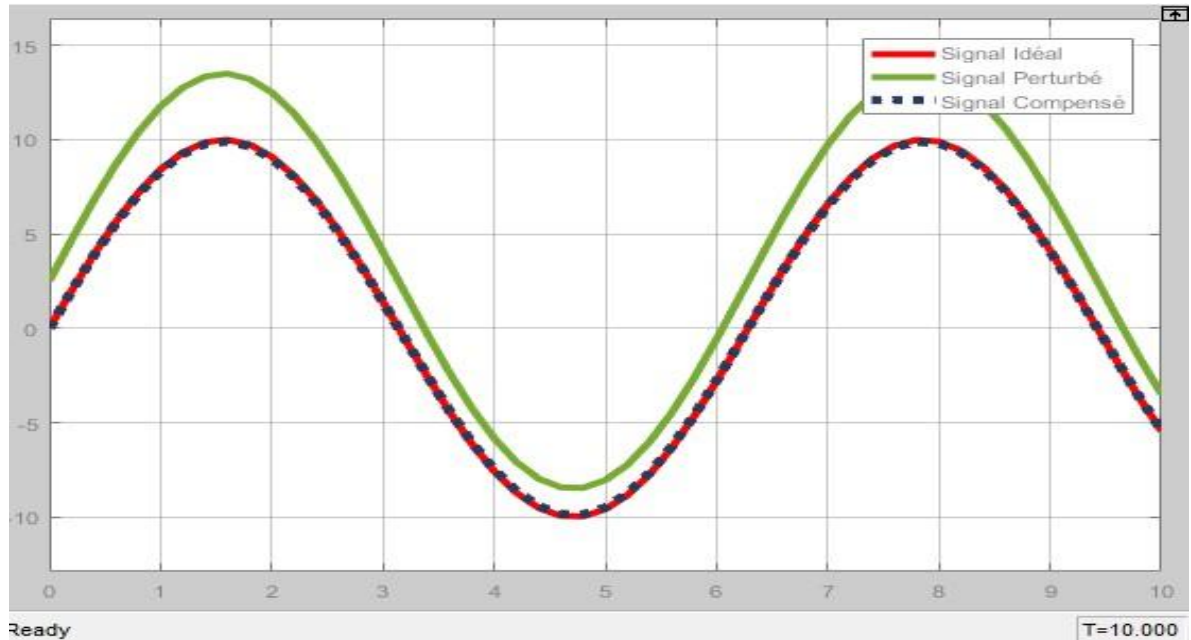


**Figure V.7 :** Comparaison des signaux avant et après compensation

#### Interprétation des résultats :

La figure V.7 illustre les résultats de la simulation temporelle du système. On peut observer trois signaux distincts :

- Le signal rouge (Signal Idéal) : représente la grandeur physique de référence sans aucune perturbation.
- Le signal vert (Signal Perturbé) : représente la sortie brute de l'instrument. On remarque clairement l'impact des erreurs systématiques : un décalage vertical (Offset) dû à la polarisation et à la dérive thermique, ainsi qu'une amplification due à l'erreur de gain.
- Le signal bleu pointillé (Signal Compensé) : représente le signal après traitement par le bloc de compensation.

La superposition parfaite du signal bleu sur le signal rouge démontre l'efficacité de l'algorithme de correction. Malgré la complexité des perturbations cumulées, le compensateur a

réussi à annuler les erreurs de gain et d'offset, ramenant ainsi l'erreur de mesure à une valeur négligeable.

Une analyse quantitative permet de confirmer ces observations : avant compensation, l'erreur maximale observée est d'environ 2,5 V, tandis qu'après compensation, elle devient inférieure à 0,01 V.

V.4 Synthèse des performances de l’algorithme de compensation des erreurs systématiques

| Paramètre de mesure | Valeur sans compensation | Valeur après compensation |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|
| Erreur d’Offset     | 2 V                      | $\approx 0.01V$           |
| Erreur de Gain      | 1.1                      | $\approx 1.001$           |
| Erreur de Dérive    | +0.5                     | Négligeable               |

Tableau V.2 : Comparaison des performances avant et après compensation

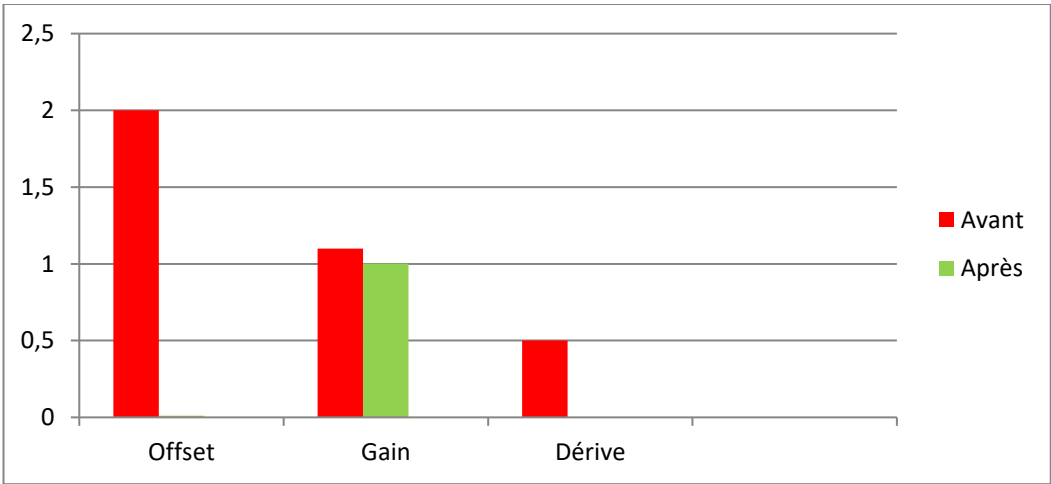


Figure V.8 : Comparaison des erreurs systématiques avant et après la compensation algorithmique

L'analyse quantitative des résultats, résumée dans le Tableau V.2 et illustrée par l'histogramme de la Figure V.X, confirme l'efficacité de l'algorithme développé. On observe une réduction drastique de l'erreur d'offset (passant de 2 V à une valeur quasi nulle) ainsi qu'une correction précise du gain. Cette représentation graphique met en évidence la suppression quasi totale des erreurs systématiques après compensation. Cette performance démontre que l'approche logicielle peut compenser avec succès les dérives thermiques et les imperfections des composants

électroniques, garantissant ainsi une précision de mesure optimale même dans des conditions environnementales variables.

**Note sur la non-linéarité :**

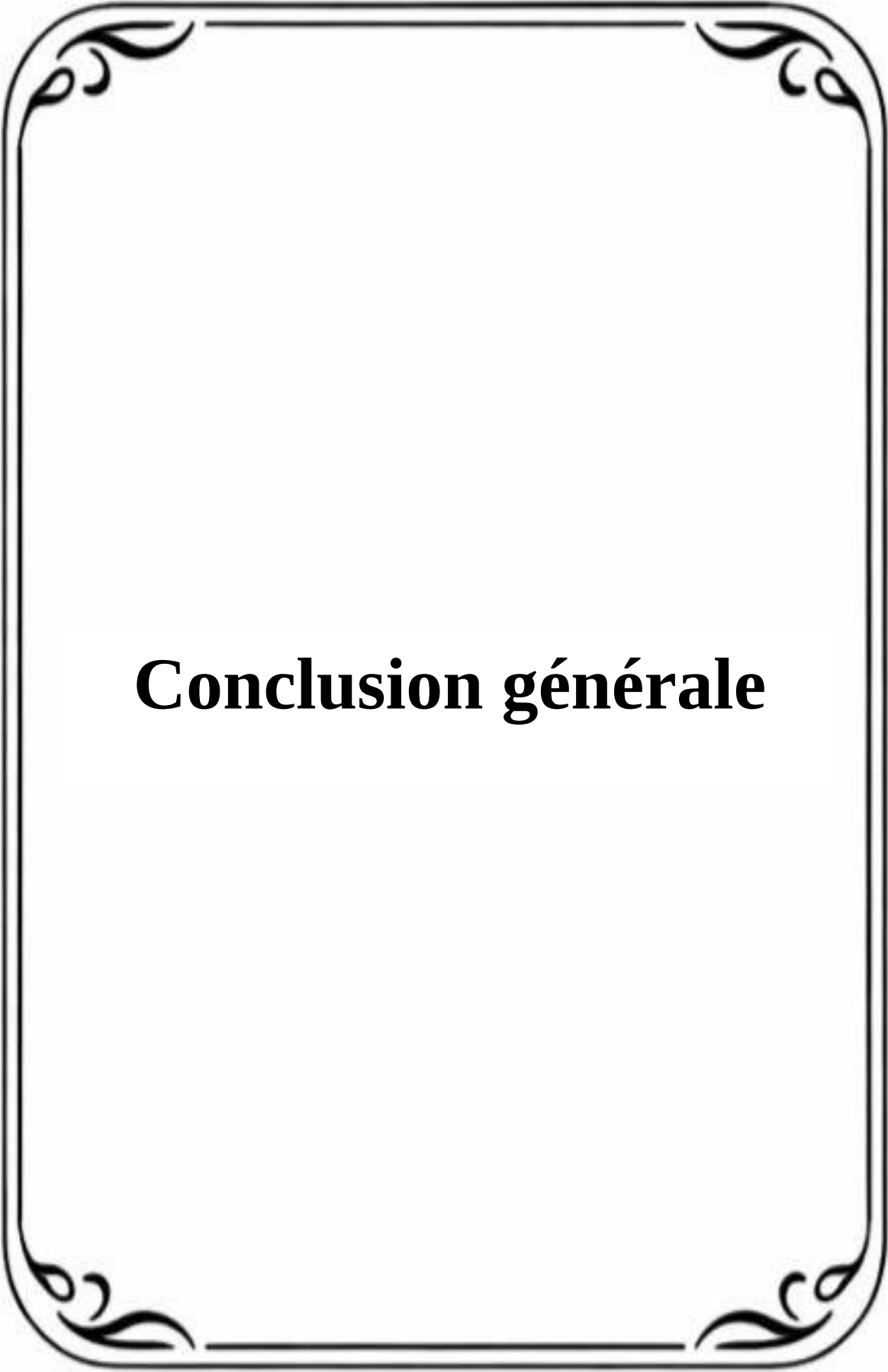
- ✓ Bien que la non-linéarité soit un paramètre important des erreurs systématiques, elle n'a pas été intégrée dans cette simulation finale. Ce choix se justifie par le fait que l'instrument de mesure modélisé est supposé fonctionner dans sa plage de linéarité optimale. L'objectif principal ici était de valider la structure de base du compensateur pour les erreurs les plus dominantes (Gain et Offset). L'extension de cet algorithme pour inclure des corrections non-linéaires via des tables de correspondance (Lookup Tables) constitue une perspective d'amélioration pour des travaux futurs.

## V.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la validation de notre approche par simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus confirment de manière probante que l'algorithme de compensation développé permet d'éliminer efficacement les erreurs systématiques, notamment le décalage (Offset) et l'erreur de gain, tout en tenant compte des variations de la dérive thermique.

La superposition quasi-parfaite des signaux idéal et compensé témoigne de la robustesse et de la précision de notre modèle de correction. Cette étape de validation numérique constitue une preuve de concept essentielle, démontrant que le traitement algorithmique peut pallier les imperfections physiques des composants électroniques.

Enfin, ce travail ouvre des perspectives concrètes pour une implémentation réelle sur des instruments de mesure matériels (Hardware), afin d'optimiser leur exactitude et de garantir une fiabilité accrue dans les systèmes de mesure industriels.



# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

Au terme de ce travail de fin d'études consacré à l'analyse et à la compensation des erreurs systématiques dans les instruments de mesure électroniques, nous avons étudié les principales causes de ces erreurs ainsi que leur influence sur la précision et la fiabilité des mesures. Cette étude nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes de mesure électroniques et l'importance des paramètres métrologiques intervenant dans la chaîne de mesure, tels que la sensibilité, la résolution et la précision. Nous avons également distingué les différents types d'erreurs de mesure, en mettant particulièrement l'accent sur les erreurs systématiques en raison de leur effet direct sur la justesse des résultats.

Notre travail s'est ensuite concentré sur l'analyse des phénomènes responsables de ces erreurs, notamment les dérives thermiques, les erreurs de calibration, les erreurs de zéro, les erreurs d'échelle ainsi que certaines imperfections liées aux composants électroniques. Cette analyse nous a permis de constater que les erreurs systématiques peuvent réduire de manière importante les performances des instruments lorsqu'elles ne sont pas correctement prises en compte. Afin de limiter leur influence, plusieurs méthodes de compensation ont été étudiées, qu'elles soient matérielles ou logicielles. Les techniques présentées montrent qu'il est possible d'améliorer considérablement la précision des mesures grâce à des méthodes de correction adaptées.

La partie consacrée à la modélisation et à la simulation sous MATLAB/Simulink a permis de mettre en pratique les notions théoriques étudiées durant ce mémoire. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité des méthodes de compensation utilisées et leur capacité à réduire l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs réelles. Cette étape a également permis de mieux visualiser le comportement des erreurs systématiques dans différentes conditions de fonctionnement.

Enfin, à travers ce travail, nous avons pu constater que la compensation des erreurs systématiques représente une étape essentielle dans l'amélioration de la qualité métrologique des systèmes électroniques modernes. Comme perspective, il serait intéressant d'approfondir cette étude en utilisant des techniques plus avancées basées sur l'intelligence artificielle et les systèmes intelligents afin de développer des instruments de mesure plus précis et capables de s'adapter automatiquement aux variations des conditions de fonctionnement.

## Bibliographie

- [1] A. S. Morris and R. Langari, Measurement and Instrumentation : Theory and Application. Academic Press, 2020.
- [2] J. R. Taylor, An Introduction to Error Analysis : The Study of Uncertainties in Physical Measurements. University Science Books, 1997.
- [3] K. Harrar and M. Bouhedda, "Polynomial regression and digital filtering techniques for sensor non-linearity compensation," Algerian Journal of Signals and Systems, vol. 5, no. 2, 2020.
- [4] tilialucida, "Arrière-plan technologique en gros plan sur un testeur vérifiant la carte mère," Shutterstock, Image ID : 244199509.
- [5] R. A. Witte, Electronic Test Instruments : Analog and Digital Measurements, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice Hall, 2002.
- [6] Stéphane. "Les 10 outils indispensables pour l'électronique." Astuces Pratiques.
- [7] J. P. Bentley, Principles of Measurement Systems, 4th ed. Harlow, U.K : Pearson Education, 2005.
- [8] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), JCGM 100 : 2008, 2008.
- [9] AFNOR, Métrologie dans l'entreprise : Outil de la qualité, 2nd ed. Paris, France : AFNOR, 1996.
- [10] H. Baher, Analog and Digital Signal Processing, 2nd ed. Chichester, U.K : Wiley, 2001.
- [11] M. Glénat and D. Chareyron, "Principe du passage de l'analogique au numérique," CultureSciences Physique, Jun. 29, 2012.
- [12] M. G. Say, Electrical Engineer's Reference Book, 15th ed. Newnes, 2003.
- [13] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, 2nd ed. California, USA : California Technical Publishing, 1999.
- [14] B. M. Oliver and J. M. Cage, Electronic Measurements and Instrumentation. New York, NY, USA : McGraw-Hill, 1975.

- [15] "Type d'information en fonction des signaux visualisés," Cours de Spécialité Sciences de l'Ingénieur, Scenari-Community.
- [16] A. V. Oppenheim and A. S. Willsky, Signals and Systems, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice Hall, 1996.
- [17] G. Asch, Les capteurs en instrumentation industrielle, 8th ed. Paris, France : Dunod, 2017.
- [18] Z. Rachchad, "Les Capteurs en Instrumentation industrielle," Cabinet NPM.
- [19] D. G. Knierim, Data Conversion Handbook. Newnes, 2005.
- [20] M. Bates, Interfacing Microcontrollers in C, 2nd ed. Oxford, U.K : Newnes, 2011.
- [21] N. V. Kirianaki, S. Y. Yurish, N. O. Shpak, and V. P. Deynega, Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensors. Chichester, U.K : Wiley, 2002.
- [22] H. Dridi, "Capteurs et chaînes de mesure," Scribd, Oct. 09, 2021. Original title : "03. Chaîne de Mesure".
- [23] H. W. Ott, Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, 2nd ed. New York, NY, USA : Wiley-Interscience, 1988.
- [24] K. Mohammedia, "Les erreurs de mesure," Support de cours : Mesure électrique, Chapitre 11, Université d'Annaba.
- [25] J. Hoffmann, Métrologie des grandeurs physiques. Paris, France : Lavoisier, 2013.
- [26] P. Daponte, Digital Instrumentation. New York, NY, USA : John Wiley & Sons, 2012.
- [27] L. Mari, The measure of things : and the influence of environmental quantities, Measurement, vol. 46, no. 8, pp. 2890–2895, 2013.
- [28] M. Priel, Incertitudes de mesure. Paris, France : Techniques de l'Ingénieur, 2013.
- [29] N. Mansouri, Capteurs et Instrumentation, Support de cours, USTHB, Alger, Algérie, 2019.
- [30] D. Robert, Mesures électroniques : Principes et méthodes. Paris, France : Ellipses, 2006.
- [31] H. Castiau, L'incertitude de mesure : Guide pratique. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005.

- [32] J. P. Maalouf, Maîtrise des incertitudes de mesure, 2nd ed. Paris, France : AFNOR Éditions, 2017.
- [33] J. L. Bucher, Le grand livre de la métrologie, 2nd ed. Paris, France : AFNOR Éditions, 2012.
- [34] A. Kassambara, "GGPLOT Barres d'Erreur : Visualisation des Données à l'Aide de GGPlot2," Datanovia.
- [35] A. Mekid, Métrologie et Maintenance des Instruments de Mesure, Support de cours, Université de Constantine 1, Algérie, 2020.
- [36] C. Koumeir, Métrologie : concepts et mise en œuvre, IUT de Nantes, France, 2018.
- [37] M. Priel, Expression des incertitudes de mesure. Paris, France : Techniques de l'Ingénieur, 2014.
- [38] J. C. Gariel, Fondamentaux de la mesure. Paris, France : Dunod, 2017.
- [39] M. Bouhedda, Cours d'instrumentation industrielle, Support de cours, Université de Médéa, Algérie, 2018.
- [40] J. M. Favennec, La mesure de niveau. Paris, France : Éditions de l'Usine Nouvelle, 2011.
- [41] K. Harrar, Techniques de compensation des erreurs dans les systèmes de mesure, Thèse de doctorat, Université de Médéa, Algérie, 2021.
- [42] M. D. and S. P., Chapitre 2 : Notions de métrologie – Origines de l'incertitude, Cours de métrologie, UTC, France, 2016.
- [43] M. Grout, Instrumentation industrielle : Spécifications, choix, mise en service, 3rd ed. Paris, France : Dunod, 2015.
- [44] M. Girard, Précis d'électronique : Amplificateurs, filtres, CAN et CNA. Paris, France : McGraw-Hill, 1992.
- [45] J. P. Demailly, Analyse numérique et équations différentielles, 4th ed. Les Ulis, France : EDP Sciences, 2016.
- [46] P. Mayé, Aide-mémoire : Composants électroniques, 5th ed. Paris, France : Dunod, 2015.

- [47] P. Agati, Liaisons, transmissions et instruments de mesure. Paris, France : Ellipses, 2013.
- [48] E. Nathan, "Acquérir l'information - la mesure par un capteur," 2026.
- [49] S. Safi, Systèmes d'acquisition et de traitement de données, Support de cours, Université de Boumerdès, Algérie, 2019.
- [50] G. Asch, Acquisition de données : Du capteur à l'ordinateur. Paris, France : Dunod, 2011.
- [51] M. Merzougui, Traitement Analogique et Numérique du Signal, Support de cours, Université de Tlemcen, Algérie, 2020.
- [52] F. Cottet, Traitement des signaux et acquisition de données, 4th ed. Paris, France : Dunod, 2015.
- [53] H. Fanet, Instrumentation et mesures : De la physique du capteur au signal numérique. Paris, France : Dunod, 2011.
- [54] W. Kester, The Data Conversion Handbook. Norwood, MA, USA : Analog Devices and Newnes, 2005.
- [55] J. P. R. W. T. J. and M. D., Chaînes d'étalonnage – Étalons métrologiques fondamentaux et systèmes de mesure, Techniques de l'Ingénieur, 2023.
- [56] J.M. Pou, La signature des processus d'étalonnage : Les étalonnages vus sous l'angle statistique. Cournon-d'Auvergne, France : Éditions Deltamu.
- [57] L. Gharbi Ernez, Instrumentation et Mesures : Erreurs et Incertitudes, Support de cours, ENP, Alger, Algérie, 2021.
- [58] Tektronix, "How to Measure Temperature Coefficient of Resistance (TCR)," Application Note, 2020.
- [59] D. Ottello, Les RTD – Calcul température Pt100, 2023.
- [60] M. S. Boucherit, Mesures et Instrumentation, Support de cours, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie, 2022.
- [61] B. Bouali, Mesures électriques et électroniques, Support de cours, Université de Tlemcen, Algérie, 2021.

- [62] J. Hladik, Systèmes d'unités physiques : Grandeurs et dimensions. Paris, France : Masson, 1993.
- [63] M. T. Benchouia, Instrumentation et mesures industrielles, Support de cours, Université de Biskra, Algérie, 2019.
- [64] H. Ben Yakhlef, Conception et mise en place de l'instrumentation nécessaire à la mesure de la pression différentielle haute précision dans un venturi, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Canada, 2018.
- [65] LNE, Étalonnage d'instruments de mesure. Paris, France : Laboratoire National de Métrologie et d'Essais, 2025.
- [66] P. Poulichet, Cours de conditionnement du signal du capteur, ESIEE Paris, France, 2018.
- [67] M. Priel, Maîtrise des processus de mesure, 2nd ed. Paris, France : AFNOR Éditions, 2015.
- [68] M. El Kahlaoui, "Métrologie, Chapitre I : Notions de base," Cours magistral, Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech (FSSM), Université Cadi Ayyad, nov. 2012.
- [69] S. Sadi, Métrologie appliquée aux systèmes de mesure, Support de cours, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2021.
- [70] M. Khrouf, Cours de métrologie – Chapitre I, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université de Mostaganem, Algérie, 2020.
- [71] Polytechnique Montréal, Le pont de Wheatstone, Cours de Wheatstone Bridge, Montréal, Canada, 2009.
- [72] É. Dutertre, Conversions analogique–numérique et numérique–analogique, Notes de cours, École des Mines de Saint-Étienne, France, 2014.
- [73] A. Azoui, Conception et Technologie des Systèmes Électroniques, Support de cours, Université de Batna 2, Algérie, 2021.
- [74] M. Stoffel, "Microsystèmes pour la génération et la caractérisation de fluides complexes," Ph.D. dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes (INSA Rennes), France, 2013.
- [75] G. Asch, Les capteurs en instrumentation industrielle, 8th ed. Paris, France : Dunod, 2017.

- [76] Analog Devices, AD620 Instrumentation Amplifier Datasheet. Norwood, MA, USA, 2007.
- [77] Marshall, "AD620 Amplifier Datasheet, Pinout, Circuits, User Guide", Easybom Blog, Jan. 21, 2022.
- [78] A. Azoui, Électronique de précision pour l'instrumentation, Support de cours, Université de Batna 2, Algérie, 2021.
- [79] E. Schroefer, Traitement numérique des signaux de mesure, 2nd ed. Paris, France : Dunod, 2010.
- [80] J. Goupy, Statistique pour l'expérience, 2nd ed. Paris, France : Dunod, 2014.
- [81] A. O. Diakite, "R pour l'économétrie, La régression linéaire simple".
- [82] F. L. He, Apprentissage machine pour les systèmes embarqués. Londres, Royaume-Uni : ISTE Editions, 2020.
- [83] J. M. Niola, Instrumentation et capteurs : de la théorie à la pratique. Paris, France : Ellipses, 2019.
- [84] M. Sidi Salah, "Étude comparative entre les moyens de compensation de l'énergie réactive," Mémoire d'ingénieur, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2017.
- [85] O. Beucher, Signal Processing with MATLAB, 2nd ed. Munich, Allemagne : Oldenbourg Verlag, 2010.
- [86] M. Durand and M. Grangeat, Enseigner la Physique du Solide : un exemple d'initiation à la modélisation en Physique. HAL Open Science, 2023.
- [87] ENSFEA, Modélisation des erreurs de mesures. École Nationale Supérieure de Formation de l'Enseignement Agricole, France, 2016.
- [88] R. Pallàs-Areny and J. G. Webster, Sensors and Signal Conditioning, 2nd ed. New York, NY, 2001.
- [89] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors : Physics, Designs, and Applications, 5th ed. New York, NY, USA : Springer, 2016.
- [90] A. Bendifallah, Caractéristiques métrologiques des capteurs et instruments de mesure, Université de Batna 2, Algérie, 2020.