

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira
Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electronique
Spécialité : Instrumentation

Thème

Étalonnage, vérification et qualification des instruments de mesure et équipements de laboratoire

Préparé par :

MAAZOUZI Abderahim

OUCHEFOUNE Youcef

Dirigé par :

Mme. IDJDARENE (U. Bejaia)

Mme. TERKI (Eurl CI)

Examiné par :

M. TAFININE (U. Bejaia)

M. SADJI (U.Bejaia)

Année universitaire : 2023/2024

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la force, la volonté de donner le meilleur de nous-mêmes et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Nous remercions sincèrement notre promotrice, Mme. IDJDARENE Souad pour sa supervision, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciement vont aux membres de jury, Mr. SADJI Mustapha et Mr. TAFININE Farid, pour l'intérêt qu'ils ont portés à notre travail en acceptant de l'évaluer.

Nous remercions vivement l'entreprise CELSIUS INGENIERIE de nous avoir accueilli pour effectuer notre stage pratique qui nous a été vraiment utile et instructif pour la réalisation de notre projet, à sa tête Mr. OUCHEFOUNE Brahim, qui a été une source de motivation inestimable. Un grand merci pour tous vos efforts et votre patience.

Nous tenons à remercier aussi Mme TERKI Kenza responsable de laboratoire d'étalonnage de la société CELSIUS INGENIERIE pour sa patience, son dévouement et son aide précieux pour l'accomplissement de notre travail.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nous voudrions remercier notre famille pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leurs encouragements tout au long de nos études. Leur amour et leur confiance en nous ont été des sources d'inspiration et de persévérance.

Enfin, nous n'omettrons jamais d'exprimer toute notre gratitude à tous les membres du département d'électronique de l'Université de Bejaia, qu'ils soient enseignants ou cadres administratifs, qui, de près ou de loin, n'ont épargné aucun effort pour que notre formation et nos travaux se terminent dans de bonnes conditions.

Merci à tous pour votre aide précieuse et votre soutien.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à plusieurs personnes dont le soutien, l'amour et l'encouragement ont été essentiels tout au long de ce parcours académique.

À mes parents, TAHAR et NOUARA, pour leur amour inconditionnel, leur patience infinie et leurs sacrifices. Votre soutien indéfectible et votre confiance en moi ont été ma principale source de motivation.

À mes frères et sœurs, NASIM, AZIZ, NAIM, KARIMA, FOUZEYA, NASSIMA, pour leur soutien constant, leur compréhension et leurs encouragements chaleureux.

Merci d'avoir toujours été là pour moi.

À ma partenaire, THILELI, pour sa patience, son amour et son soutien moral tout au long de cette période exigeante. Ta présence à mes côtés a rendu cette aventure beaucoup plus supportable et significative.

À mes amis proches, AHMED, YUCEF, ILYAS, KOUSSEILA, ROSA, BIBA, SONEYA, KAHINA, CHAHINEZ et Toute l'équipe du jardin pour leur amitié inestimable et leurs encouragements.

Merci d'avoir partagé avec moi des moments de joie et de m'avoir soutenu dans les moments difficiles.

Et enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Votre soutien et votre aide ont été précieux.

Avec toute ma gratitude.

RAHIM

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma maman chérie KHALISSA qui était là pour moi avant même que je voie ce monde ; à mon cher papa BRAHIM qui as tant sacrifier pour que je devienne un homme ; à ma petite sœur adorée LYSA et au chouchou de ma petite famille ISLAM. Que dieu vous garde pour moi mes amours.

Je tiens aussi à dédier ce travail a toutes les personnes qui ont était là pour moi ; surtout durant les périodes difficiles de ma vie, en particulier : coach YACINE, ACHOUR, NABIL, les deux ABDERAHIM et AHMED.

YOUCEF

Table Des Matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Abréviations

Avant-propos

Introduction Générale 1

Chapitre I : Généralités sur la Métrologie

I.1. Introduction..... 2

I.2. Métrologie..... 2

I.2.1. Définition 2

I.2.2. Objectif de la Métrologie 2

I.2.3. Types de la métrologie..... 3

I.2.3.1. Métrologie légale..... 3

I.2.3.2 Métrologie Industrielle..... 3

I.2.3.3 Métrologie Scientifique..... 4

I.2.4. Secteurs d'activité d'un métrologue..... 4

I.2.4.1. Industrie manufacturière 4

I.2.4.2. Énergie 4

I.2.4.3. Santé 4

I.2.4.4. Environnement 4

I.2.4.5. Chimie et pharmaceutique..... 5

I.2.4.6. Aérospatiale et défense..... 5

I.2.4.7. Agroalimentaire..... 5

I.2.4.8. Télécommunications 5

I.2.5. Qualités métrologiques des instruments de mesures..... 5

I.2.5.1. Etendue de mesure.....	5
I.2.5.2. Sensibilité d'un instrument de mesure.....	5
I.2.5.3. Justesse d'un instrument de mesure.....	6
I.2.5.4. Fidélité d'un instrument de mesure	6
I.2.5.5. Précision d'un instrument de mesure	6
I.2.5.6. Constante d'un instrument de mesure	6
I.2.6. Métrologie en instrumentation.....	6
I.2.7. Fondements de la métrologie en instrumentation.....	7
I.2.7.1. Concept de mesure	7
I.2.7.2. Traçabilité des mesures	7
I.2.7.3. Étalonnage	7
I.2.7.4. Incertitude de mesure	7
I.2.7.5. Bonnes pratiques de mesure.....	7
I.2.7.6. Validation des méthodes de mesure.....	8
I.3. Etalonnage	8
I.3.1. Aspects essentiels de l'étalonnage.....	9
I.3.1.1. Qualité des mesures	9
I.3.1.2. Fiabilité des mesures	9
I.4. Vérification.....	9
I.4.1. Différence entre l'étalonnage et la vérification	10
I.4.2. Les avantages et les inconvénients de l'étalonnage et de la vérification	11
I.5. Qualification.....	12
I.5.1. Méthodologie	13
I.5.1.1. Planification	13
I.5.1.2. Installation (IQ - Installation Qualification)	13
I.5.1.3. Opération (OQ - Operational Qualification)	13

I.5.1.4. Performance (PQ - Performance Qualification)	14
I.5.1.5. Documentation	14
I.6. Normes ISO pertinentes.....	14
I.7. Principaux défis dans le domaine de la métrologie.....	15
I.8. Conclusion	15

Chapitre II : Méthodologies et procédures d'étalonnage, de vérification et de qualification

II.1. Introduction.....	16
II.2. Etalonnage des instruments de mesure.....	16
II.2.1. Processus d'étalonnage : étapes et protocoles	16
II.2.1.1. Préparation initiale de l'instrument	16
II.2.1.2. Obtention des données de référence	16
II.2.1.3. Réglage ou ajustement de l'instrument	17
II.2.1.4. Réalisation des mesures et comparaison avec les données de référence	17
II.2.1.5. Analyse des résultats et ajustements finaux	17
II.2.1.6. Génération du rapport d'étalonnage	17
II.2.2. Méthodes d'étalonnage	17
II.2.2.1. Etalonnage par comparaison directe	18
II.2.2.2. Etalonnage par substitution	18
II.2.2.3. Etalonnage par ajustement	19
II.2.3. Sélection des normes de référence	19
II.2.3.1. Compatibilité avec l'instrument à étalonner	19
II.2.3.2. Traçabilité aux normes nationales ou internationales	19
II.2.3.3. Disponibilité des normes de référence	20
II.2.4. Gestion des données d'étalonnage	20
II.2.4.1. Documentation des résultats	20

II.2.4.2. Mise en place de systèmes de gestion de la qualité	20
II.3. Vérification de la précision des instruments.....	20
II.3.1. Évaluation des procédures internes de vérification	21
II.3.2. Utilisation des guides de métrologie spécifiques	21
II.3.3. Études comparatives entre différentes méthodes de vérification	21
II.4. Protocoles de vérification pour la maintenance quotidienne.....	21
II.4.1. Consultation des manuels d'entretien des instruments	22
II.4.2. Suivi des recommandations des fabricants pour la maintenance préventive	22
II.4.3. Respect des normes de sécurité en milieu industriel	22
II.5. Qualification des équipements de mesure.....	23
II.5.1. Utilisation des directives de qualification des équipements (GAMP)	23
II.5.2. Conformité aux normes de validation pharmaceutique (GMP)	23
II.5.3. Références à la littérature sur la qualification des équipements	24
II.6. Validation de la performance dans des conditions opérationnelles.....	24
II.6.1. Utilisation de protocoles de validation internes	24
II.6.2. Conformité aux normes sectorielles	25
II.6.3. Analyse d'études de cas sur la validation des équipements	25
II.7. Bonnes pratiques en matière d'étalonnage et de qualification.....	25
II.7.1. Utilisation des guides de bonnes pratiques en métrologie	26
II.7.2. Conformité aux normes sectorielles (ex. GLP pour les laboratoires)	26
II.7.3. Références aux publications sur les meilleures pratiques en assurance qualité	26
II.8. Conclusion	27

Chapitre III : Applications pratiques

III.1. Introduction.....	28
III.2. Etalonnage des capteurs de température.....	28
III.2.1. Etalonnage d'une Sonde RTD (Resistance Temperature Detector)	28
III.2.1.1. Préparation et matériels utilisés	28
III.2.1.2. Procédure d'étalonnage	32
III.2.2. Etalonnage d'une CTN (Thermistance à Coefficient de Température Négatif)	36
III.2.2.1. Préparation et matériels utilisés	37
III.2.2.2. Procédure d'étalonnage	38
III.2.3. Etalonnage d'un thermocouple	40
III.2.3.1. Préparation et matériels utilisés	40
III.2.3.2. Procédure d'étalonnage	41
III.3. Etalonnage de pression.....	43
III.3.1. Etalonnage d'un manomètre métallique	43
III.3.1.1. Description d'un manomètre métallique	43
III.3.1.2. Moyens mis en œuvre	43
III.3.1.2.1. Etalon de référence	43
III.3.1.2.2. Environnement	44
III.3.1.2.3. Conditions opératoires	44
III.3.1.3. Analyse du processus de mesure	45
III.3.1.3.1. Méthode des "5 M" - recherche des causes d'erreurs	45
III.3.1.3.2. Moyens	45
III.3.1.3.3. Méthode	46
III.3.1.3.4. Matière	46
III.3.1.3.5. Milieu	47

III.3.1.3.6. Main-d'œuvre : opérateur	47
III.3.1.3.7. Synthèse	47
III.3.1.4. Réduction des erreurs	49
III.3.1.5. Evaluation des incertitudes-types	49
III.3.1.5.1. Méthodes d'évaluation	49
III.3.1.5.2. Regroupement de grandeurs d'influence, cas de la répétabilité	50
III.3.1.5.3. L'évaluation des incertitudes-types	50
III.3.1.5.3.1. Considération sur le choix des lois de distribution	50
III.3.1.5.3.2. Application	50
III.3.1.6. Calcul de l'incertitude-type composée	52
III.3.2. Etalonnage d'un transmetteur de pression	53
III.3.2.1. Description d'un transmetteur de pression	53
III.3.2.2. Moyens mis en œuvre	53
III.3.2.2.1. Equipements	53
III.3.2.2.2. Inspection visuelle et connexion entre les dispositifs	54
III.3.2.3. Procédure d'étalonnage	54
III.4. Vérification et étalonnage d'une balance analytique.....	60
III.4.1. Utilisation des balances pour le contrôle de la qualité	60
III.4.2. Vérification d'une balance analytique	61
III.4.2.1. Critères d'acceptation de la balance	62
III.4.2.2. Classes de précision des balances et échelons de vérification (OIML R76-1)	63
III.4.3. Déroulement des tests (mode opératoire de la vérification)	64
III.4.3.1. Test de linéarité/justesse	64
III.4.3.2. Test de répétabilité	65
III.4.3.3. Test d'excentricité	66
III.4.4. Estimation des erreurs maximales de la balance (EMT)	68

III.5. Conclusion	69
Conclusion Générale	70
Bibliographie	71

Listes des Figures

Figure.1 : Logo de l'entreprise.

Figure I.1 : Poids étalons.

Figure I.2 : Les étapes de l'étalonnage et de la vérification.

Figure III.1 : sonde RTD de type PT100.

Figure III.2 : **(a)** Four d'étalonnage ($-50^{\circ}\text{C}+T_a$ à 140°C) et **(b)** Four d'étalonnage ($T_a+5^{\circ}\text{C}$ à 750°C).

Figure III.3 : Sonde de température PT100.

Figure III.4 : Multimètre Additel 222A.

Figure III.5 : Connexion entre les dispositifs.

Figure III.6: Courbe de correction de résistance en fonction de la résistance lue.

Figure III.7: Sonde de température CTN.

Figure III.8 : Multimètre AGILENT.

Figure III.9 : Courbe d'étalonnage de la sonde CTN.

Figure III.10 : **(a)** thermocouple type K et **(b)** thermocouple type T.

Figure III.11 : Manomètre métallique avec étendu de mesure (0-10bar).

Figure III.12 : Manomètre numérique.

Figure III.13 : Méthode des 5M.

Figure III.14 : Position des deux manomètres.

Figure III.15 : Grandeurs d'influence pour la méthode des 5M.

Figure III.16: Transmetteur de pression.

Figure III.17 : Pompe de pression.

Figure III.18 : Courbe de pression relative en fonction du courant.

Figure III.19 : Balance analytique.

Figure III.20 : Poids étalons.

Figure III.21: plateau de la balance analytique à qualifier.

Listes des Tableaux

Tableau III.1 : Résultats de mesure après étalonnage PT100.

Tableau III.2 : Calcul des résidus.

Tableau III.3 : Méthode d'essais en tolérance selon ASTM 1137.

Tableau III.4 : Méthode d'essais en tolérance selon IEC 60751.

Tableau III.5 : Résistance de la CTN en fonction de la température de référence.

Tableau III.6: Résultats de la mesure de la sonde de température CTN.

Tableau III.7 : Résultats de mesure pour le thermocouple de type K.

Tableau III.8 : Résultats de mesure pour le thermocouple de type T.

Tableau III.9 : Résultats de mesure après étalonnage du manomètre métallique en 3 cycles.

Tableau III.10 : Résultats de cycle 1.

Tableau III.11 : Résultats de cycle 2.

Tableau III.12 : Résultats de cycle 3.

Tableau III.13 : Résultats de la moyenne des 3 cycles pour chaque valeur de référence en (mA).

Tableau III.14 : Les valeurs de pression relative obtenue selon la valeur du courant.

Tableau III.15 : Résultats de la moyenne des 3 cycles pour chaque valeur de référence en (bar).

Tableau III.16 : Caractéristiques de la balance.

Tableau III.17 : EMT en vérification primitive.

Tableau III.18 : EMT de la balance.

Tableau III.19 : Résultats après test de linéarité.

Tableau III.20 : Résultats après test de répétabilité.

Tableau III.21 : Résultats après test d'excentricité.

Tableau III.22 : Erreur de calibrage de la balance.

Tableau III.23 : EMT balance.

Abréviations

B

BPL : bonnes pratiques de laboratoire.

BPC : de bonnes pratiques cliniques.

C

CTN : Coefficient de Température Négatif.

E

EMT : Erreur maximale tolérée.

EPI : Equipement de protection individuelle.

EMTC : Erreur maximale tolérée calibrage.

F

FDA: Food and Drug Administration.

G

GAMP: Good Automated Manufacturing Practice.

GMP: Good Manufacturing Practice.

GLP: Glucagon like peptide.

I

ISO: International organization for standardization.

IQ :Installation Qualification.

O

OQ :Operational Qualification.

P

PQ:Performance Qualification.

R

RTD: Resistance Temperature Detector.

S

SI : Système international.

Avant-Propos

Présentation de l'entreprise

CELSIUS INGERNIERIE est une entreprise unipersonnelle à responsabilité limitée EURL, spécialisée dans la qualification, la maintenance et l'étalonnage des équipements.

Le laboratoire d'étalonnage de CELSIUS INGENIERIE a été créé depuis 2011 pour répondre à une demande croissante de ses clients pour assurer l'étalonnage des instruments de mesure dont les grandeurs suivantes :

- Température
- Humidité
- Pression
- Vitesse de l'air
- Pesage
- Dimensionnel
- Electrique

Depuis sa création en 2011, CELSIUS INGENIERIE se positionne comme étant une société de service et d'expertise aux services de l'industrie et des laboratoires pharmaceutiques.

Le nombre d'effectifs du laboratoire d'étalonnage est 11 personnes.

Le siège de l'entreprise, qui abrite le laboratoire métrologie, se situe à Bejaia à l'adresse suivante : FORUM de l'université, Tazaboudjt, Bejaia 06000, ALGERIE.

Le logo de l'entreprise est représenté dans la figure suivante :



Figure.1 : Logo de l'entreprise.

Introduction Générale

Introduction Générale

La métrologie en tant que science de la mesure, joue un rôle primordial dans divers domaines d'activité humaine. Depuis les premières civilisations, l'homme a cherché à quantifier et à attribuer des valeurs précises aux phénomènes observables, que ce soit pour peser des marchandises, mesurer des distances ou évaluer le temps. Avec l'avènement des technologies modernes, cette quête de précision et de fiabilité a pris une importance accrue, notamment dans les secteurs industriels, scientifiques et médicaux.

Le processus d'étalonnage, de vérification et de qualification des instruments de mesure et des équipements de laboratoire est au cœur de cette discipline. Ces pratiques assurent non seulement la précision des mesures mais aussi la conformité aux normes internationales, garantissant ainsi la qualité et la sécurité des produits et des services. L'étalonnage permet de comparer les mesures obtenues par un instrument avec un étalon de référence, corrigeant ainsi les écarts et assurant des résultats fiables. La vérification, quant à elle, consiste à évaluer la conformité d'un instrument par rapport à des spécifications établies, sans nécessairement effectuer des ajustements. La qualification, enfin, vise à s'assurer que les équipements de laboratoire répondent aux exigences opérationnelles spécifiques avant leur mise en service.

L'objectif est de fournir une compréhension approfondie de ces processus critiques et de leur importance pour assurer la fiabilité des mesures et la qualité des produits et des services.

Ce mémoire se structure en trois grandes parties :

La première partie aborde les généralités sur la métrologie et son importance dans l'instrumentation, définissant les concepts clés et leur rôle dans l'assurance qualité des mesures et examinant également les normes ISO pertinentes et les défis rencontrés dans la mise en œuvre de ces pratiques.

La deuxième partie détaille les méthodologies et les procédures d'étalonnage, de vérification et de qualification, en se concentrant sur les meilleures pratiques.

Enfin, la troisième partie se penche sur des études de certains cas concrets en termes d'étalonnage et de qualification.

Nous clôturerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur la Métrologie

I.1. Introduction

L'homme depuis sa création a toujours cherché à mesurer et attribuer des grandeurs à toutes sortes de choses. En premier, il a commencé à évaluer le poids et les distances. Donc, La métrologie existe depuis l'aube des civilisations comme science de la mesure. Elle vise à garantir la fiabilité et la précision des mesures effectuées dans différents domaines.

Dans ce chapitre, nous allons aborder la métrologie et son importance dans le domaine de l'instrumentation. Nous allons définir les concepts essentiels tels que l'étalonnage, la vérification et la qualification, en mettant en avant leur rôle crucial dans l'assurance de la qualité des mesures. Nous examinerons brièvement les normes ISO pertinentes et identifierons les principaux défis dans ce domaine.

I.2. Métrologie

I.2.1. Définition

La Métrologie dans sa définition littérale, vient du grec metron « la mesure » et logos « la science » [1]. Elle englobe les connaissances nécessaires pour attribuer une signification précise au résultat d'une mesure, dans des conditions de mesure spécifiques. En examinant tous les éléments du processus de mesure, elle se focalise particulièrement sur l'analyse des sources d'erreurs.

I.2.2. Objectif de la Métrologie

La présence de la fonction métrologie joue un rôle très important dans plusieurs domaines. Parmi ses objectifs on trouve :

- Gestion et maîtrise des processus et des équipements de mesure.
- Vérification et évaluation de la conformité des produits aux spécifications techniques et réglementaires.
- Contrôle de la qualité des produits.
- Garantie de la confiance dans les résultats des mesures.
- Assurance de la protection de la santé et de la sécurité des citoyens.
- Assurance de la préservation et la protection de l'environnement.

I.2.3. Types de la métrologie

I.2.3.1. Métrologie légale

La métrologie légale représente l'ensemble des règles, normes et exigences légales qui assurent une mesure juste et précise dans le domaine du commerce et de l'industrie. Exactement, elle garantit que lorsqu'on parle d'un litre de lait, il s'agit bien d'un litre, et que lorsqu'on évoque un kilogramme de pommes, il correspond réellement à un kilogramme. En assurant le respect des règles dans les transactions commerciales.



Figure I.1 : Poids étalons [2].

I.2.3.2 Métrologie Industrielle

La métrologie industrielle est un pilier essentiel de l'industrie. Elle joue un rôle vital dans l'industrie en tant qu'expert en qualité, assurant que tous les équipements sont correctement calibrés dans les processus de production, respectent ainsi les normes et spécifications requises. Sans cette discipline, nous serons confrontés à des produits défectueux ayant un impact majeur sur notre vie quotidienne. En d'autres termes, elle est cruciale pour garantir que les produits que nous respectons répondent aux normes et fonctionnent comme prévu.

I.2.3.3 Métrologie Scientifique

La métrologie scientifique est un domaine essentiel de la recherche qui se concentre sur l'étude et l'amélioration des unités du Système International (SI). Son objectif principal est de développer des systèmes de mesure précis et fiables pour répondre aux besoins de la société et aux avancées technologiques. Elle joue un rôle crucial dans la recherche scientifique, l'innovation technologique et la diffusion des connaissances. En établissant des normes de mesure uniformes, elle assure la cohérence des résultats obtenus dans différents laboratoires.

I.2.4. Secteurs d'activité d'un métrologue**I.2.4.1. Industrie manufacturière**

En investissant dans la métrologie, les entreprises peuvent améliorer leur efficacité opérationnelle et réduire les risques de non-conformité, ce qui se traduit par des avantages à long terme pour leur activité.

En utilisant des techniques de mesure précises et des instruments spécialisés, les entreprises peuvent s'assurer que leurs produits respectent les spécifications et normes requises. Cela permet non seulement de garantir la satisfaction des clients, mais aussi de maintenir la réputation de l'entreprise et de se conformer aux exigences réglementaires en vigueur.

I.2.4.2. Énergie

La mesure et le contrôle de la production, de la distribution et de la consommation d'énergie sont des pratiques essentielles pour garantir l'efficacité des installations énergétiques. En effet, ces processus permettent de surveiller de près la quantité d'énergie produite, distribuée et consommée, afin d'optimiser les performances des systèmes énergétiques. Grâce à ces mesures, il est possible d'identifier les éventuels gaspillages et de mettre en place des actions correctives pour améliorer l'efficacité énergétique globale. Et donc, la mise en œuvre de ces mesures de contrôle contribue à une utilisation plus responsable et durable des ressources énergétiques.

I.2.4.3. Santé

Le domaine de la santé bénéficie également de la métrologie, notamment dans le domaine médical où elle est cruciale pour assurer la précision des équipements de diagnostic et de traitement [3].

I.2.4.4. Environnement

La métrologie environnementale est essentielle pour surveiller la qualité de l'air, de l'eau et du sol, en mesurant les niveaux de pollution et en évaluant les impacts environnementaux des activités humaines [4].

I.2.4.5. Chimie et pharmaceutique

Dans l'industrie chimique et pharmaceutique, la métrologie est utilisée pour garantir la précision des analyses chimiques et pharmaceutiques, ainsi que pour assurer la conformité des produits aux normes de qualité et de sécurité [5].

I.2.4.6. Aérospatiale et défense

Dans le domaine de l'aérospatiale et de la défense, la métrologie est appliquée pour garantir la précision des systèmes de navigation, des instruments de mesure et des équipements de contrôle utilisés dans l'aviation et les applications militaires [6].

I.2.4.7. Agroalimentaire

L'agroalimentaire bénéficie également de la métrologie pour contrôler la qualité et la sécurité des aliments, en assurant la conformité aux normes de traçabilité et de sécurité alimentaire [7].

I.2.4.8. Télécommunications

Enfin, dans le secteur des télécommunications, la métrologie est appliquée pour mesurer et contrôler les signaux et les transmissions de données, garantissant ainsi la qualité et la fiabilité des réseaux de communication [8].

I.2.5. Qualités métrologiques des instruments de mesures

En sélectionnant des instruments dotés de qualités métrologiques adéquates, les entreprises peuvent garantir des mesures fiables et précises, essentielles pour le contrôle de la qualité, la conformité réglementaire et l'optimisation de l'efficacité opérationnelle. Parmi ces qualités on trouve :

I.2.5.1. Etendue de mesure

C'est l'ensemble des valeurs d'une grandeur à mesurer pour lesquelles l'instrument donne une valeur avec une erreur inférieure ou égale à l'erreur maximale tolérée.

I.2.5.2. Sensibilité d'un instrument de mesure

La capacité d'un instrument à détecter de petites variations dans la grandeur mesurée. Un instrument sensible est capable de détecter des changements infimes. Elle est donnée par la relation suivante :

$$S = \frac{\Delta x}{\Delta y} \tag{I.1}$$

Où :

- Δy est la variation du signal de sortie (lecture de l'instrument).
- Δx est la variation de la grandeur mesurée (entrée).

I.2.5.3. Justesse d'un instrument de mesure

Qualité d'un instrument de mesure à donner des indications égales à la valeur vraie de la grandeur mesurée.

I.2.5.4. Fidélité d'un instrument de mesure

Aptitude d'un instrument de mesure à donner toujours la même indication pour une même valeur de la grandeur mesurée.

I.2.5.5. Précision d'un instrument de mesure

Qualité globale caractérisant l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications proches de la valeur de la grandeur à mesure.

I.2.5.6. Constante d'un instrument de mesure

Valeur fixe utilisée pour convertir les lectures de l'instrument en mesures précises de la grandeur physique réelle qu'il est censé mesurer.

I.2.6. Métrologie en instrumentation

La métrologie en instrumentation constitue un domaine spécialisé qui englobe la science des mesures et des instruments de mesure. Dans l'industrie, les instruments de mesure sont utilisés pour une variété d'applications, allant du contrôle de la qualité à la maintenance prédictive.

Elle est essentielle pour assurer la précision et la fiabilité des mesures dans divers domaines. Implique la quantification précise de grandeurs physiques telles que la température, la pression et la vitesse. Des concepts clés tels que la précision, l'exactitude, l'incertitude de mesure et la traçabilité sont essentiels pour garantir la qualité des mesures. Le processus d'étalonnage joue un rôle crucial en comparant les mesures d'un instrument à celles d'un étalon de référence. En garantissant la conformité aux normes et réglementations, la métrologie en instrumentation assure la qualité et la sécurité des produits et des processus industriels. Une compréhension approfondie de ses principes et pratiques est nécessaire pour obtenir des mesures fiables et précises.

I.2.7. Fondements de la métrologie en instrumentation

Les fondements de la métrologie en instrumentation fournissent le cadre nécessaire pour la réalisation des mesures précises, fiables et traçables. Elles reposent sur plusieurs concepts et principes fondamentaux qui sous-tendent la science de la mesure et son application aux instruments de mesure.

I.2.7.1. Concept de mesure

Un élément fondamental de la métrologie et se réfère à l'ensemble des principes, méthodes et processus utilisés pour quantifier une grandeur physique ou une caractéristique. Il permet de transformer des observations qualitatives en données quantitatives, facilitant ainsi l'analyse, la comparaison et l'utilisation des informations dans divers contextes scientifiques, industriels et commerciaux.

I.2.7.2. Traçabilité des mesures

Un principe fondamental de la métrologie en instrumentation est la traçabilité des mesures. Cela signifie que les mesures doivent être rattachées à des étalons de référence internationalement reconnus, assurant ainsi la fiabilité et la validité des résultats de mesure.

I.2.7.3. Étalonnage

L'étalonnage est le processus méthodique de comparaison des lectures d'un instrument de mesure à un étalon de référence certifié, permettant d'identifier et de corriger les écarts.

I.2.7.4. Incertitude de mesure

L'incertitude de mesure est une caractéristique intrinsèque de toute mesure et représente la plage de valeurs dans laquelle la vraie valeur de la grandeur mesurée est susceptible de se situer avec une certaine probabilité. La métrologie en instrumentation vise à évaluer et à minimiser l'incertitude de mesure pour assurer la fiabilité des résultats.

I.2.7.5. Bonnes pratiques de mesure

Les bonnes pratiques de mesure sont des procédures et des méthodes recommandées pour effectuer des mesures de manière efficace, précise et reproductible. Cela inclut la manipulation appropriée des instruments, la documentation des procédures de mesure, ainsi que la gestion et l'analyse des données de mesure.

I.2.7.6. Validation des méthodes de mesure

Avant d'être utilisées en pratique, les méthodes de mesure doivent être validées pour s'assurer de leur exactitude, de leur précision et de leur fiabilité. Cela implique souvent la comparaison des résultats obtenus avec d'autres méthodes de référence ou l'utilisation d'échantillons de contrôle connus.

I.3. Etalonnage

Le processus d'étalonnage revêt une importance cruciale dans le domaine de la métrologie, car il permet de garantir la fiabilité des mesures effectuées par un instrument. En évaluant et en ajustant la précision de l'instrument par rapport à des étalons de mesure reconnus, on s'assure que les résultats obtenus sont fiables et conformes aux normes établies. Cela permet non seulement de garantir la qualité des produits et des services fournis, mais aussi de respecter les exigences réglementaires en vigueur. Donc, l'étalonnage est une étape essentielle dans le processus de mesure, contribuant à assurer la confiance des utilisateurs dans les résultats obtenus.

Lors du processus d'étalonnage, il est essentiel de comparer les indications de l'instrument à celles des étalons de référence afin de garantir la précision des mesures. Si des écarts sont constatés, des ajustements sont effectués pour corriger les erreurs de mesure. Ces ajustements peuvent être de nature mécanique, électronique ou logicielle, selon le type d'instrument concerné. Il est également possible d'apporter des corrections aux résultats de mesure afin d'obtenir des données fiables et précises. Le processus d'étalonnage est donc crucial pour assurer la fiabilité des instruments de mesure.

En effectuant un étalonnage régulier, on s'assure que l'instrument respecte les normes de mesure établies, ce qui permet de garantir la qualité des mesures effectuées. De plus, l'étalonnage assure la traçabilité des mesures, c'est-à-dire la possibilité de remonter à l'origine des résultats obtenus et de vérifier leur fiabilité.

En conclusion, l'étalonnage contribue à assurer la confiance dans les mesures réalisées et à garantir la qualité des produits ou des services fournis.

I.3.1. Aspects essentiels de l'étalonnage

Dans cette section, nous explorerons les aspects essentiels de l'étalonnage, en abordant ses principes fondamentaux.

I.3.1.1. Qualité des mesures

L'étalonnage vise à assurer que les instruments de mesure produisent des résultats précis et reproductibles. En comparant les indications de l'instrument à celles d'étalons de référence connus, on peut évaluer et ajuster la précision de l'instrument, garantissant ainsi la qualité des mesures réalisées.

I.3.1.2. Fiabilité des mesures

Des instruments étalonnés correctement offrent une plus grande fiabilité dans les mesures effectuées. En réduisant l'incertitude de mesure et en minimisant les erreurs systématiques, l'étalonnage contribue à améliorer la fiabilité des résultats obtenus, ce qui est essentiel dans de nombreux domaines où des décisions critiques sont prises sur la base de données de mesure.

I.4. Vérification

La vérification est une étape essentielle dans le processus d'assurance de la qualité des instruments de mesure. Elle permet d'évaluer si un instrument répond aux critères de performance établis par le fabricant ou par des normes de métrologie spécifiques. Contrairement à l'étalonnage, la vérification ne nécessite pas d'ajustements de l'instrument, mais vise plutôt à déterminer s'il fonctionne correctement. Grâce à la vérification régulière des instruments de mesure, il est possible de garantir la fiabilité des résultats obtenus et d'assurer la précision des mesures effectuées. Il est donc crucial de mettre en place des procédures de vérification rigoureuses pour garantir la qualité des données produites.

Pendant la vérification d'un instrument, il est essentiel d'effectuer une série de tests et de comparaisons afin d'évaluer différentes caractéristiques de performance telles que la précision, la linéarité, la répétabilité, entre autres. Ces tests peuvent comprendre des évaluations fonctionnelles, des analyses de stabilité, des mesures de résolution, et bien d'autres.

La vérification de l'instrument de mesure revêt une importance capitale dans le cadre de garantir son bon fonctionnement et la précision de ses résultats conformément aux normes établies par le fabricant ou les réglementations en vigueur. Cette démarche vise à identifier toute défaillance potentielle de l'appareil avant son utilisation dans des contextes critiques, où la fiabilité des données est essentielle. En procédant à une vérification rigoureuse, il est possible de prévenir les erreurs de mesure et d'assurer la qualité des informations fournies par l'instrument, contribuant ainsi à la fiabilité des processus et à la sécurité des opérations.

I.4.1. Différence entre l'étalonnage et la vérification

Un étalonnage c'est l'estimation d'erreur d'instrument et de compenser le défaut de justesse par une correction. La vérification nous permet de savoir si une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées et de confirmer que l'erreur de mesure reste plus petite que l'erreur maximale tolérée.

Dans l'étalonnage on connaît quelques caractéristiques de l'instrument, cependant dans la vérification on connaît que notre instrument a une erreur petite qu'une valeur définie a priori. L'étalonnage ne permet pas de prendre une décision de conformité par contre la vérification c'est la seule qui le permet [13]. Les étapes de l'étalonnage et de la vérification sont présentées dans le schéma de la Figure (I.3).

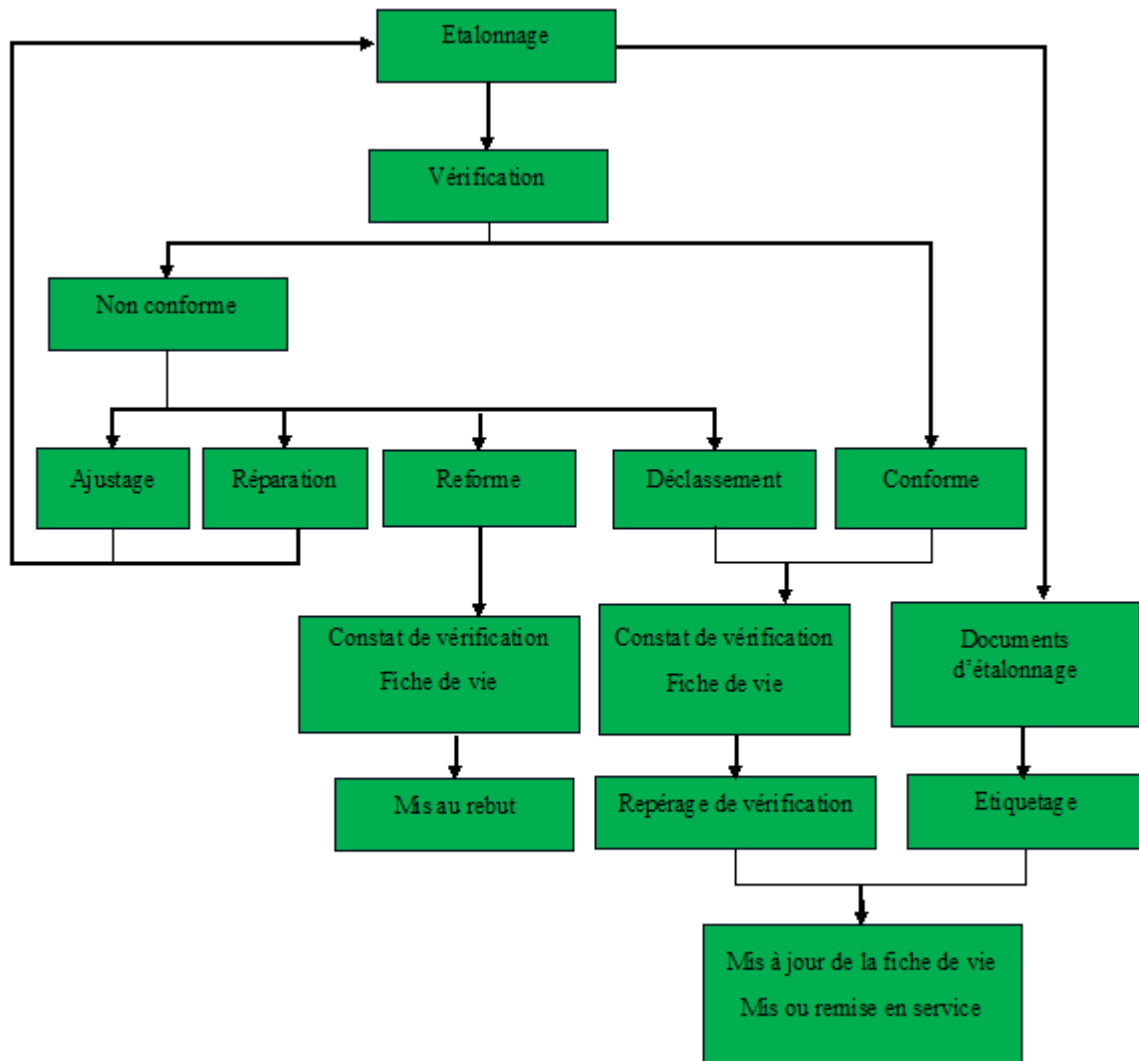


Figure I.2 : Les étapes de l'étalonnage et de la vérification.

I.4.2. Avantages et inconvénients de l'étalonnage et de la vérification

L'étalonnage assure que les instruments de mesure fournissent des résultats précis, ce qui est essentiel pour des applications critiques telles que la recherche scientifique et la production industrielle. Les processus d'étalonnage garantissent que les instruments respectent les normes internationales et nationales, facilitant ainsi l'harmonisation et la comparabilité des mesures à l'échelle mondiale. En réduisant les incertitudes de mesure, l'étalonnage améliore la qualité et la précision des données collectées, permettant des décisions mieux informées. Cependant, le processus d'étalonnage peut être

coûteux en termes de temps, d'équipements et de main-d'œuvre qualifiée, ce qui peut représenter un investissement significatif pour les entreprises. De plus, l'étalonnage nécessite souvent des interruptions dans l'utilisation des instruments pour les procédures de test et de correction, ce qui peut ralentir les opérations. Les instruments doivent également être calibrés régulièrement pour maintenir leur précision, ajoutant ainsi une charge de travail continue pour les organisations. En revanche, la vérification garantit que les instruments de mesure fonctionnent correctement et selon les spécifications, ce qui est essentiel pour maintenir la qualité des processus. Comparée à l'étalonnage, la vérification peut être moins coûteuse et plus rapide, car elle ne nécessite pas nécessairement de corrections ou de réglages détaillés. La vérification régulière peut également identifier les instruments défectueux ou hors spécifications avant qu'ils ne causent des erreurs significatives, permettant des actions correctives rapides. Cependant, contrairement à l'étalonnage, la vérification ne corrige pas les déviations mais se contente de confirmer si les instruments sont dans les tolérances acceptables. La vérification est généralement moins détaillée que l'étalonnage et peut ne pas identifier tous les problèmes potentiels, ce qui peut compromettre la précision à long terme. De plus, la vérification peut être influencée par les conditions de l'environnement et les méthodes utilisées, ce qui peut affecter la cohérence des résultats [9] [10] [11].

I.5. Qualification

La qualification est un processus essentiel pour évaluer la conformité des équipements, des systèmes ou des processus aux normes et aux exigences réglementaires en vigueur. Son objectif principal est de prouver que l'équipement, le système ou le processus peut produire des résultats conformes aux attentes et qu'il est adapté à son utilisation prévue. Cela inclut la garantie de la qualité, de la fiabilité, de la sécurité et de la conformité réglementaire des produits ou des processus liés à l'équipement qualifié. En menant une qualification rigoureuse, les organisations peuvent assurer la performance optimale de l'équipement, la satisfaction des exigences réglementaires et des normes de qualité, ainsi que la sécurité des utilisateurs. Ce processus est crucial pour garantir la fiabilité et la performance des équipements dans divers domaines industriels, pharmaceutiques, biotechnologiques et autres.

I.5.1. Méthodologie

La méthodologie de la qualification comprend généralement les étapes suivantes :

I.5.1.1. Planification

Dans le cadre de notre projet de qualification, il est impératif d'élaborer un plan détaillé qui définira clairement les objectifs à atteindre, la portée du projet, les ressources nécessaires, les responsabilités

de chacun et le calendrier à respecter. Ce plan servira de guide pour assurer le bon déroulement de la qualification et garantir que tous les aspects du projet sont pris en compte de manière efficace. Il est essentiel que chaque membre de l'équipe comprenne son rôle et ses responsabilités afin de contribuer de manière optimale à la réussite du projet. En suivant ce plan de qualification, nous pourrons atteindre nos objectifs dans les délais impartis et avec la qualité requise.

I.5.1.2. Installation (IQ - Installation Qualification)

La vérification de l'installation de l'équipement ou du système selon les spécifications du fabricant et les exigences de conception est une étape essentielle pour garantir son bon fonctionnement. Cela implique de s'assurer que tous les composants sont correctement installés, que les accessoires sont compatibles, que les connexions sont sécurisées et que les paramètres de configuration sont correctement réglés. Cette vérification rigoureuse permet de minimiser les risques de dysfonctionnement et d'assurer la fiabilité de l'équipement ou du système sur le long terme.

I.5.1.3. Opération (OQ - Operational Qualification)

La vérification de l'équipement ou du système pour s'assurer qu'il fonctionne correctement dans les limites spécifiées est une étape essentielle dans tout processus d'assurance qualité. Cela implique la réalisation de tests fonctionnels rigoureux afin d'évaluer la performance opérationnelle, la stabilité et la reproductibilité. Ces tests permettent de garantir que l'équipement ou le système répond aux exigences et aux normes établies, assurant ainsi la fiabilité et la précision des résultats obtenus. Il est crucial de mener ces vérifications de manière méthodique et approfondie pour garantir le bon fonctionnement de l'équipement ou du système.

I.5.1.4. Performance (PQ - Performance Qualification)

La vérification de la conformité des résultats produits par un équipement ou un système dans des conditions de fonctionnement normales est une étape essentielle pour assurer leur fiabilité et leur précision. Cette vérification implique la réalisation de tests de performance sous charge de travail réelle, permettant d'évaluer la robustesse de l'équipement ou du système. Ces tests permettent de s'assurer que l'équipement ou le système fonctionne de manière optimale et qu'il est capable de répondre aux attentes en termes de performance. La réalisation de ces tests est donc cruciale pour garantir la qualité et la fiabilité des résultats obtenus.

I.5.1.5. Documentation

La compilation de toutes les données, des résultats de tests et des analyses effectuées pendant le processus de qualification est essentielle pour garantir la conformité aux exigences de qualification. Ce dossier de qualification constitue une preuve tangible de la rigueur et de la méthodologie appliquées tout au long du processus. Il permet de documenter de manière précise toutes les étapes et les décisions prises, offrant ainsi une traçabilité complète des opérations réalisées. En outre, ce dossier facilite la communication et la transmission d'informations entre les différentes parties prenantes impliquées dans le processus de qualification, assurant ainsi une compréhension commune des résultats obtenus.

I.6. Normes ISO pertinentes

L'ISO/CEI 17025 :2005 est une norme internationale qui établit les exigences générales de compétence pour effectuer des essais et/ou des étalonnages, y compris l'échantillonnage. Cette norme vise à garantir la fiabilité et l'exactitude des résultats produits par les laboratoires, qu'ils utilisent des méthodes normalisées, des méthodes non normalisées ou des méthodes élaborées en interne. En se conformant à l'ISO/CEI 17025 :2005, les laboratoires démontrent leur capacité à fournir des résultats fiables et reproductibles, ce qui est essentiel pour assurer la confiance des clients et des autorités de réglementation. En mettant en place un système de gestion de la qualité conforme à cette norme, les laboratoires peuvent améliorer leur efficacité opérationnelle, renforcer leur crédibilité et accroître leur compétitivité sur le marché. En fin de compte, l'ISO/CEI 17025 :2005 contribue à garantir la qualité et la fiabilité des produits et des services offerts aux consommateurs, ce qui est essentiel pour assurer la sécurité et la protection des utilisateurs finaux [12].

La norme ISO/IEC 17029, Évaluation de la conformité – Principes généraux et exigences pour les organismes de validation et de vérification, spécifie les principes généraux et les exigences applicables pour que les organismes d'évaluation assurant des activités de validation et de vérification procèdent de manière impartiale, compétente et cohérente. Cette Norme internationale est essentielle pour les organismes de tous secteurs, car elle garantit que les déclarations faites sont plausibles en vue de leur utilisation future prévue (validation) ou sont établies avec vérification. Elle est conçue pour être utilisée en complément des programmes sectoriels spécifiques déjà en place [13].

Les normes ISO jouent un rôle crucial en aidant de nombreuses entreprises à travers le monde à établir des normes de qualité, de sécurité et de sûreté internationalement reconnues. Ces normes offrent un cadre fiable pour garantir la conformité et l'amélioration continue des processus et des produits.

I.7. Principaux défis dans le domaine de la métrologie

Dans le domaine de la métrologie, plusieurs défis majeurs sont rencontrés. Assurer la traçabilité des mesures à des standards internationaux, s'adapter aux avancées technologiques rapides, réaliser des mesures à l'échelle nanométrique, travailler dans des conditions extrêmes, assurer l'interopérabilité des systèmes de mesure, atteindre une grande précision avec une faible incertitude, tout en gérant les coûts et les ressources, sont autant de défis à relever. En investissant dans la recherche et le développement de nouvelles technologies et en collaborant avec d'autres acteurs de l'industrie, les métrologues peuvent continuer à garantir des mesures précises et fiables dans un large éventail d'applications.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré divers domaines d'application de la métrologie, mettant en évidence son rôle crucial dans la garantie de la qualité, de la sécurité et de la conformité dans différents secteurs d'activité. Ensuite, notre attention s'est concentrée sur un aspect spécifique de la métrologie : la métrologie en instrumentation en citant les différentes qualités métrologiques des instruments de mesure. Enfin, nous avons parlé de l'étalonnage, la vérification et la qualification, tous les trois en mentionnant leurs définitions, leurs méthodologies et leurs objectifs.

Désormais, dans le chapitre suivant nous allons approfondir les méthodologies d'étalonnage, vérification et qualification, et nous allons étudier leurs procédures.

Chapitre II :

Méthodologies et procédures d'étalonnage, de vérification et de qualification

II.1. Introduction

Dans le domaine de la mesure et de l'analyse, on a besoin nécessairement des méthodologies et des procédures rigoureuses pour étalonner, vérifier et qualifier les instruments de manière systématique et reproductible.

Ce chapitre explore les fondements de ces méthodologies, depuis la sélection des normes de référence jusqu'à l'analyse des données issues de l'étalonnage. Il examine également les protocoles de vérification pour assurer la précision des instruments au quotidien et aborde la qualification des équipements, en validant leur performance dans des conditions spécifiques. Ces pratiques permettent de prendre des décisions éclairées basées sur des données fiables.

II.2. Etalonnage des instruments de mesure

II.2.1. Processus d'étalonnage (étapes et protocoles)

Le processus d'étalonnage des instruments de mesure implique plusieurs étapes clés et protocoles spécifiques. Cette sous-section détaille les étapes du processus d'étalonnage ainsi que les protocoles à suivre, en s'appuyant sur des références telles que les guides de métrologie, les normes de qualité (ISO 9001). On donne une décomposition détaillée de ces étapes et protocoles [14].

II.2.1.1. Préparation initiale de l'instrument

Avant de commencer l'étalonnage, il est crucial de préparer l'instrument correctement. Cela peut inclure la vérification de l'état physique de l'instrument, le nettoyage des composants si nécessaire, et la mise en place des conditions environnementales appropriées pour l'étalonnage.

II.2.1.2. Obtention des données de référence

Cette étape consiste à :

- Sélectionner les étalons de référence appropriés en fonction des spécifications de l'instrument à étalonner.
- Assurer la traçabilité des étalons de référence aux normes nationales ou internationales.
- Vérifier la stabilité et la validité des étalons de référence avant utilisation.

II.2.1.3. Réglage ou ajustement de l'instrument

Si nécessaire, l'instrument peut exiger un réglage ou un ajustement pour s'assurer qu'il affiche des mesures précises. Cela peut impliquer des ajustements mécaniques, électroniques ou logiciels selon le type d'instrument et les paramètres mesurés.

II.2.1.4. Réalisation des mesures et comparaison avec les données de référence

Une fois que l'instrument est prêt, des mesures sont effectuées en utilisant les conditions et les méthodes spécifiées. Les résultats obtenus sont ensuite comparés aux données de référence pour évaluer l'exactitude de l'instrument. Cela se fait en suivant les protocoles suivants :

- Suivre les instructions du fabricant pour utiliser correctement l'instrument à étalonner.
- Appliquer des techniques de mesure appropriées pour garantir des résultats précis et reproductibles.
- Répéter les mesures plusieurs fois pour évaluer la stabilité et la cohérence des résultats.

II.2.1.5. Analyse des résultats et ajustements finaux

Une fois les mesures effectuées, les résultats sont analysés pour détecter d'éventuels écarts par rapport aux valeurs de référence. Cette analyse se fait en :

- Comparant les résultats de mesure avec les valeurs de référence tout en évaluant les écarts.
- Appliquant des corrections ou des ajustements à l'instrument pour aligner les mesures avec les valeurs de référence.
- Vérifiant à nouveau les mesures après ajustement pour confirmer la précision.

II.2.1.6. Génération du rapport d'étalonnage

Une fois que le processus d'étalonnage est terminé, un rapport d'étalonnage est généré. Ce rapport documente toutes les étapes du processus, y compris les résultats des mesures, les ajustements effectués, et toute autre information pertinente.

II.2.2. Méthodes d'étalonnage

L'étalonnage des instruments de mesure peut être réalisé selon différentes méthodes, chacune présentant ses propres avantages, limitations et domaines d'application spécifiques. Dans cette sous-section, nous examinerons les principales méthodes d'étalonnage disponibles [15].

II.2.2.1. Etalonnage par comparaison directe

L'étalonnage par comparaison directe est l'une des méthodes les plus couramment utilisées, impliquant la comparaison des mesures de l'instrument à étalonner avec celles d'un étalon de référence connu. Cette méthode est souvent utilisée lorsque des mesures de haute précision sont requises.

Avantages

- Relativement simple et facile à mettre en œuvre.
- Peut fournir des résultats précis lorsque des étalons de référence de haute qualité sont utilisés.
- Convient à une large gamme d'instruments de mesure.

Limitations

- La précision de l'étalonnage dépend de la qualité des étalons de référence utilisés.
- Peut-être coûteux si des étalons de haute précision sont nécessaires.
- Nécessite une manipulation prudente pour éviter les erreurs de mesure.

II.2.2.2. Etalonnage par substitution

L'étalonnage par substitution consiste à remplacer l'instrument à étalonner par un étalon de référence pour effectuer des mesures dans des conditions similaires. Cette méthode est souvent utilisée lorsque l'instrument à étalonner ne peut pas être directement comparé à un étalon de référence, par exemple en raison de contraintes d'accès ou de compatibilité.

Avantages

- Peut être utilisé lorsque des étalons de référence spécifiques ne sont pas disponibles pour l'instrument à étalonner.
- Élimine les erreurs potentielles liées à la comparaison directe entre l'instrument et l'étalon de référence.

Limitations

- Peut nécessiter des ajustements supplémentaires pour tenir compte des différences entre l'instrument et l'étalon de référence.
- Peut-être plus complexe à mettre en œuvre que l'étalonnage par comparaison directe.
- Les résultats peuvent être moins précis si l'étalon de substitution n'est pas parfaitement compatible avec l'instrument à étalonner.

II.2.2.3. Etalonnage par ajustement

L'étalonnage par ajustement implique l'utilisation de données de référence pour ajuster les paramètres de l'instrument à étalonner afin d'aligner ses mesures avec les valeurs de référence. Cette méthode est souvent utilisée lorsque des corrections linéaires ou non linéaires sont nécessaires pour améliorer la précision de l'instrument.

Avantages

- Permet des ajustements précis pour corriger les erreurs de mesure systématiques.
- Peut être utilisé pour améliorer la précision de l'instrument dans des conditions spécifiques d'utilisation.

Limitations

- Nécessite une connaissance approfondie des caractéristiques de l'instrument et des techniques d'ajustement appropriées.
- Peut être limité par les capacités d'ajustement de l'instrument.
- Les ajustements peuvent nécessiter des compétences spécialisées et des équipements supplémentaires.

II.2.3. Sélection des normes de référence

La sélection des normes de référence appropriées est une étape indispensable dans le processus d'étalonnage des instruments de mesure. Cette sous-section examine les critères essentiels à prendre en compte lors de cette sélection.

II.2.3.1. Compatibilité avec l'instrument à étalonner

La norme de référence choisie doit être compatible avec l'instrument à étalonner en termes de plage de mesure, de précision et de méthodes de mesure. Elle doit également être adaptée au type spécifique d'instrument à étalonner, qu'il s'agisse d'un instrument électrique, optique, mécanique ou autre.

II.2.3.2. Traçabilité aux normes nationales ou internationales

Il est essentiel que la norme de référence soit traçable aux normes nationales ou internationales reconnues, telles que le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) ou les organismes

nationaux de métrologie. Cela garantit la fiabilité et la validité des mesures effectuées lors de l'étalonnage [16].

II.2.3.3. Disponibilité des normes de référence

La norme de référence choisie doit être facilement accessible et disponible pour une utilisation régulière lors de l'étalonnage des instruments. Il est important de s'assurer que les normes de référence sont disponibles en quantité suffisante pour répondre aux besoins d'étalonnage à long terme [17].

II.2.4. Gestion des données d'étalonnage

La gestion efficace des données d'étalonnage est essentielle pour assurer l'intégrité, la traçabilité et la qualité des mesures réalisées. Cette sous-section explore les meilleures pratiques pour la gestion des données d'étalonnage :

II.2.4.1. Documentation des résultats

Il est crucial de documenter de manière exhaustive tous les résultats d'étalonnage, y compris les mesures initiales, les corrections appliquées, les écarts détectés, et les mesures finales après ajustement. Cette documentation doit être claire, précise et conforme aux exigences réglementaires et de qualité.

II.2.4.2. Mise en place de systèmes de gestion de la qualité

La mise en place de systèmes de gestion de la qualité robustes est essentielle pour assurer l'intégrité et la sécurité des données d'étalonnage. Cela peut inclure l'utilisation de procédures normalisées, de systèmes de suivi des instruments, de contrôles de qualité réguliers, et de processus de validation des méthodes d'étalonnage.

II.3. Vérification de la précision des instruments

La vérification de la précision des instruments est une étape essentielle pour s'assurer de la justesse. Cette section détaille les protocoles et méthodes de vérification en s'appuyant sur des références telles que les procédures internes de vérification, les guides de métrologie spécifiques à chaque type d'instrument, et des études comparatives entre différentes méthodes de vérification [18].

II.3.1. Évaluation des procédures internes de vérification

Avant de procéder à la vérification de la précision des instruments, il est important d'évaluer les procédures internes de vérification déjà en place dans l'organisation. Cela comprend :

- La consultation des documents internes décrivant les procédures de vérification des instruments.

- La vérification de la traçabilité des mesures aux normes nationales ou internationales.
- L'analyse des résultats précédents de vérification pour identifier les tendances ou les écarts.

II.3.2. Utilisation des guides de métrologie spécifiques

Pour chaque type d'instrument, il existe des guides de métrologie spécifiques décrivant les méthodes recommandées. Les protocoles suivis pour adopter ces guides sont :

- La consultation des guides de métrologie spécifiques à chaque type d'instrument pour obtenir des instructions détaillées sur la vérification de la précision.
- Le suivi scrupule des protocoles recommandés pour garantir des résultats fiables et reproductibles.
- L'Adaptabilité des procédures de vérification en fonction des spécifications et des caractéristiques de chaque instrument.

II.3.3. Études comparatives entre différentes méthodes de vérification

Il est également utile de réaliser des études comparatives entre différentes méthodes de vérification pour évaluer leur efficacité. Ces études peuvent être menées en :

- Sélectionnant un échantillon représentatif d'instruments à vérifier.
- Appliquant différentes méthodes de vérification à chaque instrument et comparer les résultats obtenus.
- Analysant les écarts entre les différentes méthodes de vérification pour identifier les facteurs influençant la précision des mesures.

II.4. Protocoles de vérification pour la maintenance quotidienne

Les protocoles de vérification pour la maintenance quotidienne des instruments jouent un rôle très important dans le maintien de leur précision et de leur fiabilité opérationnelle. Cette section détaille ces protocoles en se basant sur les références.

II.4.1. Consultation des manuels d'entretien des instruments

Avant de commencer la maintenance quotidienne, il est essentiel de se référer aux manuels d'entretien des instruments fournis par les fabricants. Ces manuels contiennent des instructions détaillées sur les procédures de maintenance recommandées, les intervalles d'entretien, et les points critiques à vérifier. Cela se fait par :

- Examiner attentivement les sections pertinentes du manuel d'entretien de chaque instrument.
- Identifier les procédures de vérification recommandées par le fabricant pour la maintenance quotidienne.

- Noter les recommandations spécifiques concernant les pièces à inspecter, les ajustements à effectuer, et les outils nécessaires.

II.4.2. Suivi des recommandations des fabricants pour la maintenance préventive

Les fabricants fournissent souvent des recommandations spécifiques pour la maintenance préventive des instruments afin de garantir leur bon fonctionnement à long terme. Ces recommandations peuvent inclure :

- L'utilisation de listes de vérification détaillées, des calendriers d'entretien, et des conseils pour l'identification précoce des problèmes potentiels.
- Le suivi des calendriers d'entretien recommandés par le fabricant pour chaque instrument.
- L'attention aux signes précurseurs de dysfonctionnement ou de dégradation des performances, et la prise de mesures appropriées pour y remédier.

II.4.3. Respect des normes de sécurité en milieu industriel

La maintenance quotidienne des instruments de mesure doit être réalisée en conformité avec les normes de sécurité en milieu industriel pour garantir la sécurité des opérateurs et la préservation des équipements. Cela comprend :

- L'assurance que tous les opérateurs impliqués dans la maintenance quotidienne sont formés aux normes de sécurité en vigueur.
- L'utilisation appropriée des équipements de protection individuelle (EPI), tels que les gants, les lunettes de protection, et les vêtements de protection, selon les recommandations du fabricant et les exigences de sécurité de l'entreprise.
- Le respect des procédures de verrouillage/étiquetage pour éviter les accidents liés à la mise en marche accidentelle des équipements.

II.5. Qualification des équipements de mesure

La qualification des équipements de mesure est une étape critique dans le processus de garantie de la qualité des données obtenues à partir de ces équipements. Cette section détaille les protocoles et les méthodologies de qualification en se basant sur des références telles que les directives de qualification des équipements (GAMP), les normes de validation pharmaceutique (GMP), et la littérature sur la qualification des équipements dans des industries similaires.

II.5.1. Utilisation des directives de qualification des équipements (GAMP)

Les directives GAMP (Good Automated Manufacturing Practice) fournissent un cadre pour la qualification des équipements automatisés utilisés dans l'industrie pharmaceutique et d'autres secteurs

réglementés. Elles décrivent les principes et les processus à suivre pour assurer la conformité réglementaire et la qualité des systèmes automatisés. Les étapes à suivre se font par :

- Suivre les directives GAMP pour élaborer un plan de qualification des équipements de mesure.
- Identifier les exigences spécifiques en matière de qualification pour chaque équipement, en fonction de son utilisation prévue et de son impact sur la qualité des données.
- Établir des critères de performance acceptables pour chaque équipement, en se basant sur les spécifications du fabricant, les exigences réglementaires et les bonnes pratiques de l'industrie.

II.5.2. Conformité aux normes de validation pharmaceutique (GMP)

Les normes de validation pharmaceutique (GMP - Good Manufacturing Practice) définissent les exigences pour assurer la qualité et la sécurité des produits pharmaceutiques. Elles incluent des directives spécifiques sur la qualification des équipements utilisés dans la fabrication, le contrôle et l'analyse des produits pharmaceutiques. Ces directives se font par :

- Assurer la conformité aux normes GMP lors de la qualification des équipements de mesure utilisés dans des environnements pharmaceutiques.
- Suivre les directives spécifiques pour la qualification des équipements de mesure, y compris les exigences documentaires, les tests de performance et les critères d'acceptation.
- Documenter toutes les activités de qualification conformément aux exigences GMP pour assurer la traçabilité et la transparence des processus.

II.5.3. Références à la littérature sur la qualification des équipements

En plus des directives GAMP et des normes GMP, il est utile de se référer à la littérature sur la qualification des équipements dans des industries similaires. Cette littérature comprend de :

- Consulter la littérature pertinente sur la qualification des équipements de mesure pour s'informer des meilleures pratiques et des leçons apprises.
- Analyser les études de cas pour comprendre les défis courants et les solutions innovantes rencontrés lors de la qualification des équipements de mesure.
- Adapter les protocoles de qualification en fonction des enseignements tirés de la littérature et des recommandations spécifiques à chaque industrie.

II.6. Validation de la performance dans des conditions opérationnelles

La validation de la performance des équipements dans des conditions opérationnelles représente une étape cruciale pour assurer leur adéquation aux besoins spécifiques de l'entreprise. Cette section détaille les protocoles et les méthodologies de validation de la performance en se basant sur des

références telles que les protocoles de validation internes, les normes sectorielles (ex. FDA pour l'industrie pharmaceutique), et des études de cas sur la validation des équipements dans des environnements spécifiques.

II.6.1. Utilisation de protocoles de validation internes

Les protocoles de validation internes sont développés par l'entreprise elle-même. Ces protocoles peuvent inclure des tests de performance, des scénarios d'utilisation simulés et des évaluations de la robustesse des équipements. L'ensemble de ces règles se font par :

- Développer des protocoles de validation adaptés aux besoins spécifiques de l'entreprise et aux caractéristiques des équipements à valider.
- Définir des critères de performance acceptables en fonction des exigences opérationnelles et des spécifications des équipements.
- Réaliser des tests rigoureux pour évaluer la capacité des équipements à fonctionner correctement dans des conditions réelles d'utilisation.

II.6.2. Conformité aux normes sectorielles

Les normes sectorielles, telles que celles établies par la FDA (Food and Drug Administration) pour l'industrie pharmaceutique. Il est essentiel de se conformer à ces normes pour assurer la conformité réglementaire et la qualité des produits. Ces normes comprennent :

- La familiarisation avec les normes sectorielles pertinentes pour l'industrie dans laquelle les équipements seront utilisés.
- Le suivi des directives spécifiques pour la validation des équipements, y compris les tests de performance, les critères d'acceptation et la documentation requise.
- La collaboration avec les organismes de réglementation et les experts du secteur pour garantir la conformité aux normes et réglementations en vigueur.

II.6.3. Analyse d'études de cas sur la validation des équipements

Les études de cas sur la validation des équipements dans des environnements spécifiques peuvent fournir des informations précieuses sur les défis rencontrés et les meilleures pratiques à suivre. Cela se fait par :

- Examiner les études de cas pertinentes sur la validation des équipements dans des environnements similaires.
- Identifier les méthodologies utilisées, les résultats obtenus et les leçons apprises lors de la validation des équipements.

- Adapter les protocoles de validation en fonction des enseignements tirés des études de cas et des recommandations spécifiques à chaque contexte opérationnel.

II.7. Bonnes pratiques en matière d'étalonnage et de qualification

Les bonnes pratiques en matière d'étalonnage et de qualification des équipements de mesure sont essentielles pour avoir des résultats justes. Cette section détaille ces bonnes pratiques en se basant sur des références telles que les guides de bonnes pratiques en métrologie, les normes sectorielles (comme les bonnes pratiques de laboratoire - GLP), et les publications sur les meilleures pratiques en matière d'assurance qualité.

II.7.1. Utilisation des guides de bonnes pratiques en métrologie

Les guides de bonnes pratiques en métrologie décrivent les méthodes recommandées pour l'étalonnage, la qualification et la gestion des équipements de mesure. Donc, il est essentiel de :

- Consulter les guides de bonnes pratiques en métrologie pertinents pour obtenir des recommandations spécifiques sur l'étalonnage et la qualification des équipements de mesure.
- Suivre scrupuleusement les méthodes et les protocoles recommandés pour garantir des résultats précis et reproductibles.
- Mettre en place des processus de gestion documentaire conformes aux bonnes pratiques en métrologie pour assurer la traçabilité et la transparence des opérations.

II.7.2. Conformité aux normes sectorielles (ex. GLP pour les laboratoires)

Les normes sectorielles, telles que les bonnes pratiques de laboratoire (GLP), se définissent par :

- Vérifier la conformité aux normes sectorielles pertinentes, telles que les GLP, pour s'assurer que les pratiques d'étalonnage et de qualification sont en ligne avec les exigences réglementaires.
- Intégrer les protocoles et les procédures recommandés par les normes sectorielles dans les pratiques d'étalonnage et de qualification de l'organisation.
- Documenter toutes les activités d'étalonnage et de qualification conformément aux exigences des normes sectorielles pour assurer la traçabilité et la conformité réglementaire.

II.7.3. Références aux publications sur les meilleures pratiques en assurance qualité

Les publications sur les meilleures pratiques en assurance qualité fournissent des conseils et des recommandations pour améliorer les processus d'étalonnage et de qualification, ainsi que pour garantir la conformité aux normes de qualité et de sécurité. Cela implique de :

- Examiner les publications sur les meilleures pratiques en assurance qualité pour identifier les recommandations et les conseils spécifiques en matière d'étalonnage et de qualification.
- Appliquer les principes et les techniques recommandés pour optimiser les processus d'étalonnage et de qualification et garantir des résultats fiables et précis.
- Collaborer avec des experts en assurance qualité pour mettre en œuvre des améliorations continues dans les pratiques d'étalonnage et de qualification de l'organisation.

II.8. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons commencé par citer les étapes d'étalonnage et ses principales méthodes, en mentionnant les normes de référence et la gestion des données d'étalonnage. Ensuite, nous avons étudié les étapes et protocoles d'étalonnage et nous avons examiné la vérification de la précision des instruments tout en explorant les protocoles de cette vérification pour la maintenance quotidienne. Puis, nous avons passé à la qualification des équipements de mesure et à la validation de la performance dans les conditions opérationnelles. Enfin, nous avons cité les bonnes pratiques en matière d'étalonnage et de qualification.

Dans le chapitre suivant et le dernier, nous allons étudier des cas pratiques en termes d'étalonnage, vérification et qualification.

Chapitre III :
Application Pratique

III.1. Introduction

L'étalonnage, la vérification et la qualification des instruments de mesure et des équipements de laboratoire sont des pratiques essentielles pour maintenir des normes élevées de qualité et de sécurité dans divers domaines scientifiques et industriels. Ces procédures permettent de minimiser les erreurs potentielles et assurer la conformité aux standards établis.

Ce chapitre se concentre sur des applications pratiques de ces concepts à travers des études de cas spécifiques. En illustrant les méthodes et les défis rencontrés lors de l'étalonnage, de la vérification et de la qualification des instruments de mesure, nous mettons en évidence l'importance de ces pratiques dans des contextes réels. Chaque étude de cas est conçue pour offrir une compréhension approfondie des étapes nécessaires, des équipements requis, et des résultats attendus pour maintenir la précision et la fiabilité des mesures.

III.2. Etalonnage des capteurs de température

III.2.1. Etalonnage d'une Sonde RTD (Resistance Temperature Detector)

Les sondes RTD (Resistance Temperature Detector) sont largement utilisées pour mesurer la température avec une grande précision et stabilité. Elles fonctionnent sur le principe que la résistance électrique d'un matériau change de manière prévisible avec la température. Dans notre cas on va étalonner une PT100 (la résistance ohmique d'une PT₁₀₀ à 0°C égale à 100Ω).

III.2.1.1. Préparation et matériels utilisés

Avant de procéder à l'étalonnage de la sonde RTD on doit :

- Vérifier visuellement la sonde pour détecter tout dommage physique.
- Nettoyer la sonde si nécessaire pour éviter les contaminants qui pourraient affecter les mesures.

La figure (III.1) montre la sonde PT₁₀₀ utilisée.

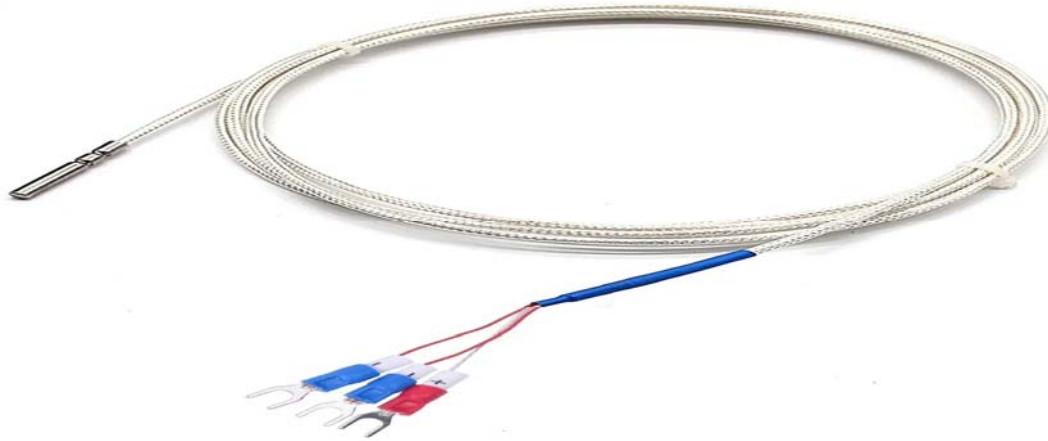


Figure III.1 : Sonde RTD de type PT₁₀₀.

Pour étalonner une sonde RTD on aura besoin de :

- 2 Fours de température avec contrôle précis : le premier varie de 50°C au-dessous de l'ambiance jusqu'à 140°C et le deuxième va de 5°C au-dessus de l'ambiance jusqu'à 750°C. La figure III.2 (a) et (b) illustre les 2 fours utilisés.



(a)

(b)

Figure III.2 : (a) Four d'étalonnage (-50°C+T_a à 140°C) et (b) Four d'étalonnage (T_a+5°C à 750°C).

- Sonde de référence (étalonnée et traçable aux standards nationaux) PT100 illustrée dans la figure III.3.



Figure III.3 : Sonde de température PT₁₀₀.

- Multimètre Additel de haute précision pour mesurer la résistance.



Figure III.4 : Multimètre Additel 222A.

Il faut assurer une connexion correcte et sécurisée entre la sonde RTD, le multimètre et le dispositif de contrôle de température.



Figure III.5 : Connexion entre les dispositifs.

Calcul « linéaire » [21][27]

La variation de la résistance d'une sonde PT100 en fonction de la température est :

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- R_T : résistance à $T^\circ\text{C}$,
- R_0 : résistance à 0°C (100Ω),
- α : coefficient de température de la sonde ($0,00385 \Omega / ^\circ\text{C}$) et,
- T : la température en $^\circ\text{C}$.

On en déduit l'équation inverse de calcul de la température à partir de la valeur de la résistance de la sonde :

$$T = \frac{\frac{R_T}{R_0} - 1}{\alpha} \quad (\text{III.2})$$

III.2.1.2. Procédure d'étalonnage

Pour commencer l'étalonnage on a placé la sonde RTD et la sonde de référence dans le milieu d'étalonnage (four de température).

Ensuite, on a sélectionné le premier point d'étalonnage (-20°C) et on a laissé suffisamment de temps pour que les deux sondes (sonde de référence et sonde à étalonner) atteignent la température de consigne et se stabilisent (la stabilité thermique est primordiale pour obtenir des mesures précises).

Puis, on a sélectionné plusieurs points de température dans la plage de fonctionnement de la sonde RTD. On a pris des points dans la plage allant de -20°C jusqu'à 157°C. À chaque point de température, on a attendu que le système se stabilise avant de prendre les mesures.

On a enregistré la résistance mesurée par la sonde RTD et on l'a comparé à la résistance de référence. On a documenté les résultats de chaque point de température tout en calculant les écarts entre les valeurs mesurées par la sonde et les valeurs de référence. Le tableau III.1 montre nos résultats.

Température de référence °C	Résistance de référence Ω	Résistance lue (IST) Ω	Correction de résistance Ω	Incertitude d'étalonnage (k=2) °C
-20,00	92,153	92,282	-0,129	0,038
-10,00	96,078	96,148	-0,070	0,140
0,00	100,000	100,140	-0,140	0,064
25,00	109,723	109,846	-0,123	0,005
50,00	119,385	119,523	-0,138	0,040
100,00	138,489	138,673	-0,184	0,162
150,00	157,311	157,405	-0,094	0,125
157,00	159,921	160,068	-0,147	0,031

Tableau III.1 : Résultats de mesure après étalonnage PT100.

La correction de résistance représente la différence entre la résistance de référence et la résistance lue.

On a utilisé les données pour générer une courbe de la variation des écarts enregistrés en fonction des résistances lues montrée sur la figure (III.6).

- On a utilisé la méthode des moindres carrés car elle consiste à minimiser la somme des carrés des écarts, écarts pondérés dans le cas multidimensionnel, entre chaque point du nuage de régression et son projeté, parallèlement à l'axe des ordonnées, sur la droite de régression.
- On a plutôt affaire à une régression linéaire multiple.

- Une droite de régression aux moindres carrés est construite pour modéliser la correction de résistance en fonction de la résistance lue.

L'équation de la droite est :

$$C = -0,0003 \times R_{lue} - 0,0885 \quad (\text{III.3})$$

Avec C est la correction de résistance et R_{lue} est la résistance lue.

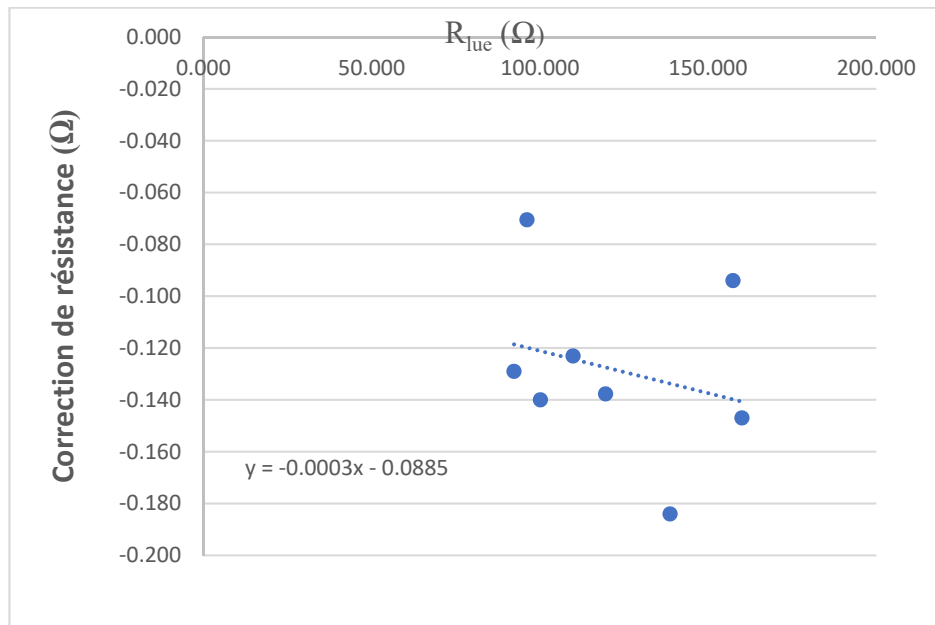


Figure III.6: Courbe de correction de résistance en fonction de la résistance lue.

L'incertitude d'étalonnage avec $k=2$ dans le tableau (III.1) représente l'incertitude élargie, $u_{\text{élar}}$, qui a été obtenue après avoir calculé les résidus qui sont calculés à leur tour par la soustraction de la correction de résistance et la correction de la résistance modélisée, le tout en valeur absolue.

Les calculs faits sont dans le tableau (III.2).

Résistance lue (IST) Ω	Correction de résistance Ω	Correction modélisée $C = -0.0003-0.0885$ Ω	Résidus Ω
92.282	-0.129	-0.116	0.013
96.148	-0.070	-0.117	0.047
100.140	-0.140	-0.119	0.021
109.846	-0.123	-0.121	0.002
119.523	-0.138	-0.124	0.013
138.673	-0.184	-0.130	0.054
157.405	-0.094	-0.136	0.042
160.068	-0.147	-0.137	0.010

Tableau III.2 : Calcul des résidus.

De-là on obtient la formule de l'incertitude élargie ($u_{\text{élar}}$) obtenue dans tableau III.1 avec l'équation :

$$u_{\text{élar}} = 2 \times \frac{\text{résidu}}{\alpha R_0} \tag{III.4}$$

L'incertitude modélisée $u_{\text{modélis}}$ est calculée par l'équation suivante :

$$u_{\text{modélis}} = \frac{0.054}{\sqrt{3}} \tag{III.5}$$

$u_{\text{modélis}}=0.0312\Omega=0.10^\circ\text{C}$ (par conversion résistance-température).

Si l'écart entre les mesures et les références est systématique, on peut ajuster les coefficients de la sonde RTD pour améliorer la précision. Ceci peut être fait en utilisant des logiciels spécifiques.

✓ **Détermination de la classe de précision d'une sonde RTD en fonction des normes établies**

Nous avons calculé la température en fonction de la résistance lue en utilisant la formule suivante :

$$R = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3] \tag{III.6}$$

Avec :

	-200 °C to 0 °C	0 °C to 540 °C
R0	100	100
A	3.91E-03	3.91E-03
B	-5.78E-07	-5.78E-07
C	-4.18E-12	0

Donc à partir de là on a obtenu les températures correspondantes. (Voir le tableau III.3)

Pour identifier la classe de précision d'une sonde RTD avec la méthode d'essais en tolérance selon les normes ASTM 1137 ou CEI 60751, nous avons comparé les écarts de températures calculées aux exigences des 2 normes.

- Selon ASTM 1137 l'erreur maximale tolérée est :

	ASTM 1137
Classe A	$\pm (0.13 + (0.0017 \times T_r))$
Classe B	$\pm (0.25 + (0.0042 \times T_r))$

Température de référence (T_r) °C	Résistance lue Ω	Température Calculée °C	Tolérance ASTM1137 Classe A °C	Tolérance ASTM1137 Classe B °C	Ecart °C
-20.00	92.282	-19.69	0.16	0.33	0.31
-10.00	96.148	-9.84	0.15	0.29	0.16
0.00	100.140	0.10	0.13	0.25	0.10
25.00	109.846	25.29	0.17	0.36	0.29
50.00	119.523	50.33	0.22	0.46	0.33
100.00	138.673	100.44	0.30	0.67	0.44
150.00	157.405	150.46	0.39	0.88	0.46
157.00	160.068	157.70	0.40	0.91	0.70

Tableau III.3 : Méthode d'essais en tolérance selon ASTM 1137.

On déduit du tableau III.3 que la RTD sous test est de classe B.

- Selon IEC 60751 l'erreur maximale tolérée est :

	IEC 60751
Classe A	$\pm (0.15 + (0.002 \times T_r))$
Classe B	$\pm (0.30 + (0.005 \times T_r))$

Les résultats sont donnés dans le tableau III.4.

Température de référence °C	Résistance lue Ω	Température Calculée ASTM1137 °C	Tolérance IEC 60751 Classe A °C	Tolérance IEC 60751 Classe B °C	Ecart °C
-20.00	92.282	-19.69	0.19	0.40	0.31
-10.00	96.148	-9.84	0.17	0.35	0.16
0.00	100.140	0.10	0.15	0.30	0.10
25.00	109.846	25.29	0.20	0.43	0.29
50.00	119.523	50.33	0.25	0.55	0.33
100.00	138.673	100.44	0.35	0.80	0.44
150.00	157.405	150.46	0.45	1.05	0.46
157.00	160.068	157.70	0.46	1.09	0.70

Tableau III.4 : Méthode d'essais en tolérance selon IEC 60751.

On déduit du tableau (III.4) que la RTD sous test est de classe B.

Après avoir procédé à l'étalonnage on a préparé un rapport détaillé incluant la méthode utilisée, les équipements de référence, les conditions de l'étalonnage, les données collectées, et les ajustements effectués tout en incluant les certificats d'étalonnage des équipements de référence pour assurer la traçabilité.

Enfin, on a conservé toutes les données d'étalonnage et les rapports associés dans une base de données pour une référence future et pour les audits.

Cette procédure rigoureuse d'étalonnage, en utilisant des équipements de référence traçables et en documentant soigneusement les résultats, on peut assurer la qualité et la conformité des mesures de température.

III.2.2. Etalonnage d'une CTN (Thermistance à Coefficient de Température Négatif)

Les thermistances à coefficient de température négatif (CTN) sont des composants essentiels dans de nombreuses applications électroniques. Leur capacité à changer de résistance en réponse aux variations de température les rend particulièrement utiles dans des circuits où une réponse rapide et précise aux changements de température est nécessaire. Une CTN est composée de matériaux semi-conducteurs céramiques tels que l'oxyde de nickel, de cobalt, ou de manganèse. Ces matériaux présentent une résistance électrique qui diminue de manière exponentielle avec l'augmentation de la température.

Le comportement d'une CTN peut être approximé par l'équation de Steinhart-Hart : [19][20][27]

$$\frac{1}{T} = A + B \times \ln(R) + C \times (\ln(R))^3 \quad (\text{III.7})$$

Où :

- T : est la température absolue (en kelvin),
- R : est la résistance de la CTN (en ohms),
- A, B et C : sont des coefficients spécifiques à la thermistance.

Dans notre étude, nous avons des valeurs de résistances de la CTN mesurées à l'aide d'un ohmmètre de précision. On a obtenu le tableau (III.5).

La température est connue et la résistance attendue est mesurée avec un multimètre. Donc, on cherche à déterminer les coefficients spécifiques de notre CTN.

III.2.2.1. Préparation et matériels utilisés

Pour l'étalonnage d'une CTN, il est important de disposer du matériel adéquat. Pour cela il nous faut :

- La CTN en question à étalonner.



Figure III.7: Sonde de température CTN.

- Source de température contrôlée : Four de température avec contrôle précis (-50°C+T_a à 140°C). Voir figure III.2(a).
- Thermomètre étalonné avec une précision supérieure à celle de la CTN pour mesurer la température réelle. Voir figure III.3.
- Multimètre Précis : Un multimètre numérique AGILENT de haute précision pour mesurer la résistance de la CTN.



Figure III.8 : Multimètre AGILENT.

Pour commencer, on a installé le four de température sur une surface stable. Puis, on a connecté la CTN au multimètre à l'aide des fils de connexion.

III.2.2.2. Procédure d'étalonnage

Notre objectif est de trouver la formule de variation de la résistance de la CTN en fonction de la température en calculant les coefficients de Steinhart-Hart à l'aide des données de résistance de thermistance et de température de référence. Voir l'équation III.8.

Nous avons suivi les instructions étape par étape pour calculer les coefficients de correction Steinhart-Hart.

Étape 1 : On a enregistré les valeurs de résistance de la thermistance pour trois températures de référence : -20°C , 25°C et 100°C . Nous avons entré les valeurs de résistance mesurés ainsi que les températures correspondantes dans le tableau approprié III.5.

Température de référence ($^{\circ}\text{C}$)	Résistance de la CTN (Ω)
-20.0	48279.00
25.0	4959.00
100.00	335.64

Tableau III.5 : Résistance de la CTN en fonction de la température de référence.

On a utilisé les données du tableau III.5 pour générer une courbe d'étalonnage montrée dans la figure III.9.

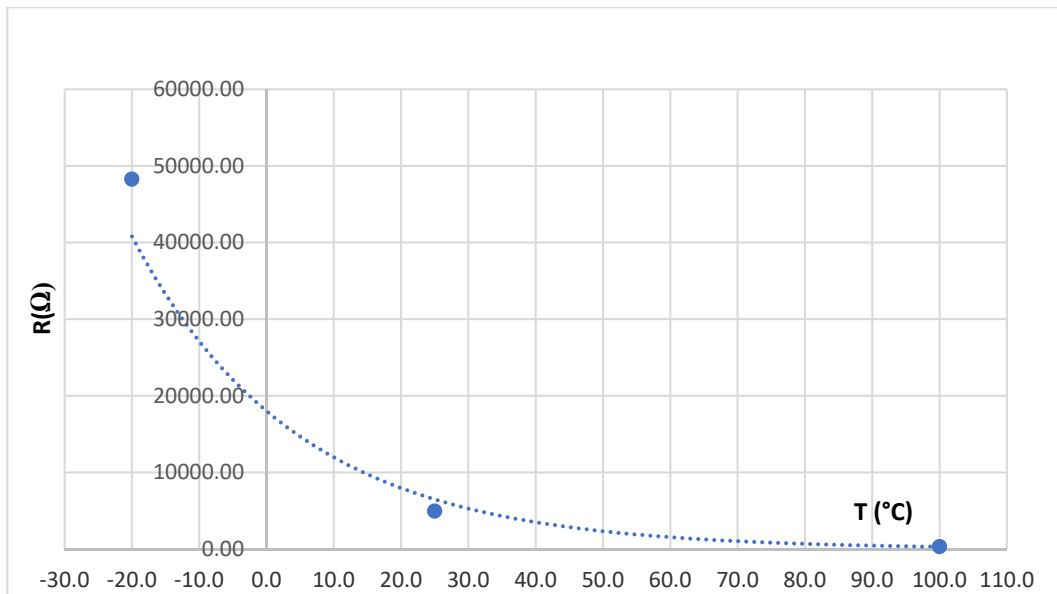


Figure III.9 : Courbe d'étalonnage de la sonde CTN.

Étape 2 : Sur la base de ces mesures, nous avons calculé les coefficients Steinhart-Hart de notre thermistance qui sont :

$$A = 1.2901 \times 10^{-3}$$

$$B = 2.3580 \times 10^{-4}$$

$$C = 9.3341 \times 10^{-8}$$

A l'aide de ces coefficients nous pouvons déterminer la température d'une CTN à partir de n'importe quelle résistance mesurée appartenant à son champ d'utilisation.

Pour vérifier les écarts de température calculés à partir de la résistance de la CTN mesurée nous avons réalisés d'autres points d'étalonnage. On a obtenu les résultats dans le tableau III.5.

Température de référence (°C)	Résistance de la CTN mesurée (Ω)	Température Calculée (°C)	Écart de température (°C)
-20.00	48279.00	-20.00	0.00
-10.00	27392.00	-9.93	0.07
0.00	16197.00	0.03	0.03
25.00	4959.00	25.00	0.00
50.00	1786.70	49.95	-0.05
100.00	335.64	100.00	0.00

Tableau III.6: Résultats de la mesure de la sonde de température CTN.

Après étalonnage, on a constaté que la mesure de température avec une CTN est très précise.

III.2.3. Etalonnage d'un thermocouple [22][23] [27]

Les thermocouples sont des capteurs de température utilisés dans une grande variété d'applications en raison de leur large plage de mesure, de leur robustesse et de leur simplicité. Un thermocouple est constitué de deux fils de métaux différents, soudés ensemble à une extrémité pour former la jonction chaude ou jonction de mesure. L'autre extrémité des fils, appelée jonction froide ou jonction de référence, est maintenue à une température constante. La différence de potentiel créée entre les jonctions chaude et froide est mesurée et convertie en une valeur de température. Il existe plusieurs types de thermocouples, chacun utilisant une paire de métaux spécifiques, offrant des caractéristiques de mesure différentes. On s'intéresse à deux types de thermocouples qui sont :

- Type T (Cuivre-Constantan) : Plage de -200°C à $+350^{\circ}\text{C}$.
- Type K (Chromel-Alumel) : Plage de -200°C à $+1350^{\circ}\text{C}$.

III.2.3.1. Préparation et matériels utilisés

Pour étalonner un thermocouple, les équipements suivants sont nécessaires :

- Thermocouple à étalonner dont la précision doit être vérifiée. Dans notre application, on a étalonné deux thermocouples K et T représentés dans la figure III.10 (a) et (b) respectivement.

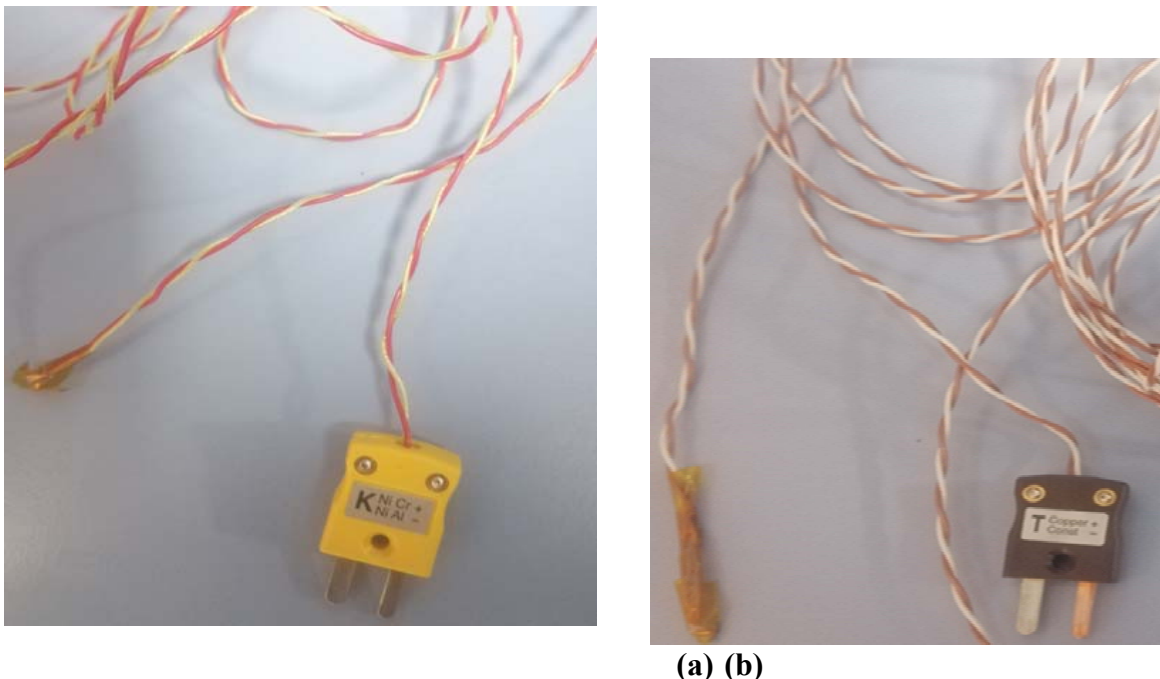


Figure III.10 (a): thermocouple type K et **(b):** thermocouple type T.

- 2 fours de référence pour fournir des températures contrôlées.
Voir les figures III.2 (a) et (b)
- Thermomètre de référence qui est la PT100 montrée dans la figure III.3.

- Un multimètre numérique Additel 222A qui permet de lire les signaux du thermocouple (f.e.m) en mV. Voir la figure III.4.

Avant de commencer, on a vérifié l'état physique du thermocouple, c'est-à-dire qu'on s'est assuré qu'il n'y a pas de dommages visibles sur les fils, les connecteurs ou la jonction de mesure et on a vérifié les connexions pour éviter les erreurs dues à des faux contacts.

III.2.3.2. Procédure d'étalonnage

On a sélectionné plusieurs points de température dans la plage de mesure des thermocouples K et T dans notre exemple :

- 0°C (point de glace),
- 100°C (point d'ébullition de l'eau),
- D'autres températures intermédiaires pour une application spécifique.

A chaque point de température, on note la lecture de la f.e.m en mV générée par les jonctions de mesure de chaque thermocouple et à l'aide des tables de références internationales des thermocouples (EIT 90). On note la température équivalente, puis on la compare à celle du thermomètre de référence.

Nous avons obtenu les résultats indiqués dans les tableaux III.7 et III.8.

Température de Référence (°C)	f.e.m de la jonction Chaude (mV)	Seebeck Coefficient dV/dT (mV/°C)	Température de la jonction Chaude (°C)	Déviaton (°C)	Erreur limite standard (Classe 2) (°C)	Erreur limite spéciale (classe 1) (°C)
-20.00	-0.75540	0.038267	-19.42	0.58	± 2.200	Non défini
-10.00	-0.36040	0.038946	-9.19	0.81	± 2.200	Non défini
0.00	0.00000	0.039450	0.00	0.00	± 2.200	± 1.100
25.00	0.95160	0.040474	23.80	-1.20	± 2.200	± 1.100
50.00	1.96070	0.041213	48.49	-1.51	± 2.200	± 1.100
51.00	2.01590	0.041242	49.83	-1.17	± 2.200	± 1.100
52.00	2.05220	0.041260	50.71	-1.29	± 2.200	± 1.100
53.00	2.09940	0.041283	51.85	-1.15	± 2.200	± 1.100
100.00	4.05130	0.041385	98.91	-1.09	± 2.200	± 1.100
153.90	6.29320	0.040206	153.85	-0.05	± 2.200	± 1.100
157.00	6.43600	0.040144	157.40	0.40	± 2.200	± 1.100

Tableau III.7 : Résultats de mesure pour le thermocouple de type K.

Nous constatons que le thermocouple K sous test est de classe 2 selon CEI 60584.3 (2007).

Température de Référence (°C)	f.e.m de la jonction Chaude (mV)	Seebeck Coefficient dV/dT (mV/°C)	Température de la jonction Chaude (°C)	Déviaton (°C)	Erreur limite standard (classe 2) (°C)	Erreur limite spéciale (classe 1) (°C)
-20.00	-0.73950	0.036942	-19.53	0.47	± 1.500	Non défini
-10.00	-0.37850	0.037864	-9.88	0.12	± 1.500	Non défini
0.00	0.00000	0.038748	0.00	0.00	± 1.000	± 0.500
25.00	0.97626	0.040650	24.61	-0.39	± 1.000	± 0.500
50.00	2.06400	0.042876	50.66	0.66	± 1.000	± 0.500
51.00	2.07540	0.042899	50.93	-0.07	± 1.000	± 0.500
52.00	2.10840	0.042964	51.69	-0.31	± 1.000	± 0.500
53.00	2.16010	0.043066	52.90	-0.10	± 1.000	± 0.500
100.00	4.28400	0.046793	100.12	0.12	± 1.000	± 0.500
153.90	6.86460	0.050358	153.19	-0.71	± 1.149	± ± 0.613
157.00	7.03720	0.050572	156.61	-0.39	± 1.175	± 0.626

Tableau III.8 : Résultats de mesure pour le thermocouple de type T.

Nous constatons que le thermocouple T sous test est de classe 2 selon CEI 60584.3 (2008).

III.3. Etalonnage de pression

III.3.1. Etalonnage d'un manomètre métallique

III.3.1.1. Description d'un manomètre métallique

Un manomètre est un instrument de mesure de pression dont l'élément sensible se déforme sous l'effet de la pression. Cette déformation est amplifiée mécaniquement ou électriquement.

Dans l'exemple, le manomètre a une étendue de mesure en pression relative de 0 à 1000 kPa (0 - 10 bar).



Figure III.11 : Manomètre métallique avec étendue de mesure (0-10bar).

III.3.1.2. Moyens mis en œuvre

III.3.1.2.1. Etalon de référence

L'étalonnage est effectué par comparaison directe avec un manomètre numérique.



Figure III.12 : Manomètre numérique.

L'incertitude sur la mesure de la pression à l'aide du manomètre numérique dans les conditions de l'étalonnage est de :

$$u_b = \pm (30 \text{ Pa} + 5.10^{-5} \cdot Pr) \quad (\text{III.8})$$

L'erreur est négligeable.

III.3.1.2.2. Environnement

Le laboratoire dans lequel sont réalisées les mesures, est climatisé.

Des relevés permettent de s'assurer que la température est de $22 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$, que l'humidité est de $50 \% \pm 20 \%$ et que la pression atmosphérique est de $1010 \text{ hPa} \pm 50 \text{ hPa}$.

III.3.1.2.3. Conditions opératoires

Ces conditions sont définies dans une procédure d'étalonnage.

Cette procédure doit, en particulier, préciser les points suivants :

- 1- Condition de raccordement du manomètre.
- 2- Condition de stabilisation en température.
- 3- Mode opératoire.

L'étalonnage est donc réalisé en 3 cycles de pression de 6 points par pressions croissantes et 5 points par pressions décroissantes. Les résultats sont obtenus et présentés pour la montée et la descente.

Le niveau de référence du manomètre métallique est pris au niveau du connecteur d'entrée en pression.

III.3.1.3. Analyse du processus de mesure

III.3.1.3.1. Méthode des "5 M" - recherche des causes d'erreurs

La mise au point du "bon modèle" mathématique nécessite d'avoir analysé finement le procédé de mesure de manière à identifier les causes possibles d'incertitude.

Il existe une technique dite des "5 M", ou "diagramme causes effet" qui permet, à partir d'une réflexion en remue-méninges et d'une très bonne connaissance du processus de mesure, d'imaginer toutes ces causes.

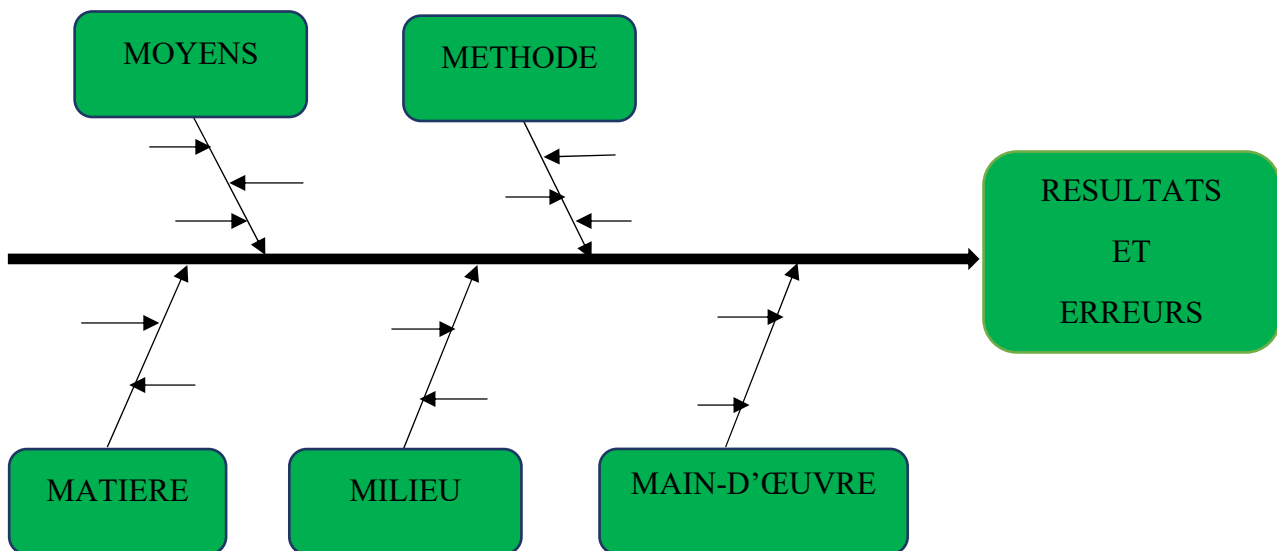


Figure III.13 : Méthode des 5M.

III.3.1.3.2. Moyens

Le terme "MOYENS" regroupe les instruments de mesure et les étalons.

- **L'instrument de mesure étalonné**
 - Fidélité,
 - Justesse de l'instrument,
 - Sensibilité aux variations de température, ...
 - etc.
- **L'étalon de référence**
 - Connaissance des caractéristiques métrologiques du manomètre numérique,
 - Stabilité dans le temps,
 - etc.

III.3.1.3.3. Méthode

Il faut avoir la même position du manomètre métallique par rapport au manomètre numérique tout en étant verticaux pour prendre des mesures précises sur le manomètre métallique.



Figure III.14 : Position des deux manomètres.

III.3.1.3.4. Matière

Les causes d'incertitudes liées au fluide utilisé pour générer la pression peuvent être :

- La masse volumique du fluide,
- La compressibilité du fluide,
- La nature du fluide (dans certains cas, la nature du gaz influe sur la réponse de l'instrument),
- L'effet de la température sur le fluide.

Le fluide utilisé est de l'air.

III.3.1.3.5. Milieu

L'étalonnage est réalisé à $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La température a une influence sur les données fournies par les instruments de mesure et le manomètre métallique.

On trouvera donc comme causes d'incertitude :

- L'effet de la température sur le manomètre métallique,
- L'effet de la température sur le manomètre numérique.

III.3.1.3.6. Main-d'œuvre : opérateur

Les paramètres à retenir sont, par exemple :

- L'expérience (appréciation de la stabilité de la pression générée),
- L'appréciation de lecture sur la mesure de pression.

III.3.1.3.7. Synthèse

La figure **III.15** montre la synthèse de la méthode des 5M.

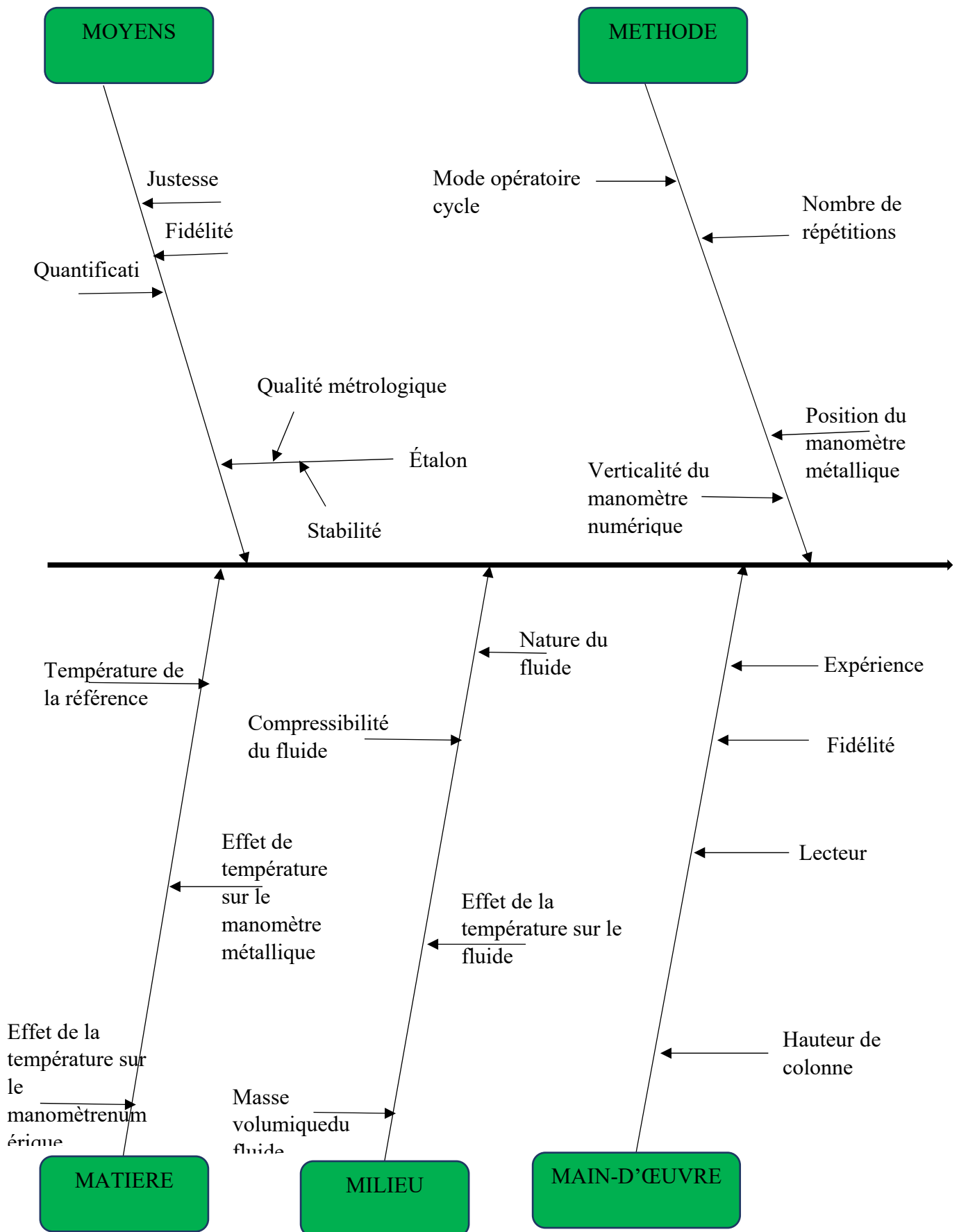


Figure III.15 : Grandeurs d'influence pour la méthode des 5M.

III.3.1.4. Réduction des erreurs

Dans le schéma explicatif présenté en figure III.15, un certain nombre de grandeurs d'influence ont pour effet de provoquer des erreurs systématiques.

Il est alors nécessaire de procéder à une réduction de ces erreurs par application de corrections.

Dans ce cas, il faudra considérer une incertitude sur ces corrections.

Si la grandeur d'influence a pour effet une erreur de type aléatoire, on devra se poser la question de la nécessité de réduire cette erreur en répétant les mesures et en prenant la moyenne des résultats obtenus.

III.3.1.5. Evaluation des incertitudes-types

III.3.1.5.1. Méthodes d'évaluation

Pour chaque grandeur d'entrée, nous devons nous poser les questions suivantes :

- L'évaluation de l'incertitude-type d'une grandeur d'influence, voire de son effet sur l'incertitude finale peut-elle être réalisée indépendamment des autres grandeurs ?
 - Si oui, quel type d'évaluation ? **Type A** ou **type B** ?
 - Si non, peut-on envisager de regrouper plusieurs grandeurs d'influence et de quantifier leur effet combiné sur l'incertitude finale du résultat ?

- Quel type d'évaluation ? Type A ou type B ? (Ce type de regroupement conduit souvent à une évaluation de type A).
- Comment rechercher l'information ou organiser les essais permettant de quantifier les incertitudes-types ?

Dans le cas des évaluations de type A, on devra s'assurer que la répétition du mode opératoire conduit à des observations indépendantes. Pour se faire, la connaissance du mode opératoire permet d'organiser les mesures en suivant les règles suivantes :

Répétition complète d'un cycle de mesure permettant d'englober tous les effets identifiés devant être quantifiés par ce mode d'évaluation (voir §III.3.1.5.2),

S'assurer que les autres grandeurs d'influence restent à un niveau constant (autant que possible).

Pour les évaluations de type B, on cherchera l'information :

- Au moyen de mesures ou d'essais,
- Dans les documents normatifs, la documentation constructrice, les publications techniques,
- En se fondant sur sa propre expérience.

Il importe dans tous les cas de veiller à ce que ces évaluations soient suffisamment documentées et toujours raisonnablement fiables.

III.3.1.5.2. Regroupement de grandeurs d'influence, cas de la répétabilité

On part du schéma donné en schéma explicatif figure III.15 et on dresse la liste des causes d'incertitude selon les critères donnés en III.3.1.5.1.

Cela nous amène, par exemple, à regrouper les grandeurs d'influence suivantes :

- Fidélité de la chaîne de mesure,
- Éléments relatifs à l'opérateur.

L'effet de chacune de ces grandeurs d'influence est difficilement quantifiable de manière isolée, et à la limite, ne présente que peu d'intérêt pour le but poursuivi.

Par contre, on peut faire l'hypothèse, qui doit être techniquement fondée, que si l'on répète les mesures, l'effet de chacune de ces grandeurs d'influence variera de manière aléatoire et que la dispersion observée sur un nombre de mesures pourra être quantifiée par un écart-type

[S -écart-type expérimental].

Bien évidemment, la valeur de cet écart-type va aussi dépendre du mode opératoire et du nombre de mesures nécessaires au calcul du résultat (voir § III.3.1.4).

Dans ce cas, est qualifié d'écart-type ou d'incertitude-type de répétabilité.

Commentaire :

La répétabilité de mesure, qui se traduit par une variabilité à court terme des résultats, est due au fait qu'un certain nombre de grandeurs d'influence, de faible effet individuel, vont varier d'une mesure sur l'autre. Cette analyse, suivant la règle des 5 M, permet de donner un contenu au terme répétabilité.

Les grandeurs d'influence qui viennent ainsi d'être regroupées sous le terme répétabilité pour la main d'œuvre sont l'expérience, la fidélité, le lecteur et la hauteur de colonne ; et pour les moyens c'est la fidélité.

III.3.1.5.3. L'évaluation des incertitudes-types

III.3.1.5.3.1. Considération sur le choix des lois de distribution

Il est fortement recommandé de se référer au guide pour l'expression des incertitudes de mesure (norme NF XP X 07-020), annexe F, et à la recommandation aéronautique RM Aero 802.2 pour le choix des lois de distribution.

Dans tous les cas, la logique et le bon sens doivent prévaloir, la loi choisie doit être représentative du phénomène physique étudié.

III.3.1.5.3.2. Application [24]

Le tableau III.9 indique :

- La pression réelle, pression délivrée par l'étalon,
- L'indication du manomètre métallique à chaque cycle de pression en fonction de la pression générée,

- L'indication moyenne, moyenne arithmétique des indications du manomètre métallique pour les 3 cycles de mesure,
- L'étendue, valeur absolue de l'écart entre les indications du manomètre métallique lors de chacun des trois cycles de mesure.

Indication du manomètre (bar)	Pression réelle			Indication moyenne (bar)	Etendue (bar)
	Cycle 1 (bar)	Cycle 2 (bar)	Cycle 3 (bar)		
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.0	2.022	2.020	2.023	2.022	0.003
4.0	4.017	4.015	4.018	4.017	0.003
6.0	5.982	5.980	5.977	5.980	0.005
8.0	8.011	8.005	8.015	8.010	0.010
10.0	10.049	10.060	10.055	10.055	0.011
10.0	10.029	10.054	10.033	10.039	0.025
8.0	7.970	7.968	7.965	7.968	0.005
6.0	5.914	5.909	5.907	5.910	0.007
4.0	3.940	3.929	3.935	3.935	0.011
2.0	1.986	1.983	1.984	1.984	0.003
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tableau III.9 : Résultats de mesure après étalonnage du manomètre métallique en 3 cycles.

A1 - Incertitude-type de répétabilité

La répétabilité u_p est estimée à partir de la valeur maximale des étendues calculées aux différents points. Cette valeur est divisée par un coefficient d_2 dépendant du nombre de mesures (cf RM. Aero 802 02-11/97).

$$u_p = \frac{\text{Le plus grand des résidus}}{\sqrt{\text{Nombre de mesures}}} \quad (\text{III.9})$$

$$u_p = \frac{0.025}{\sqrt{12}} = 7.2 \text{ mbar.}$$

B1 - Incertitude sur l'étalon de référence

L'incertitude de l'étalon, $u_{\text{étalon}}$, dans les conditions de l'étalonnage du manomètre métallique, tient compte de l'incertitude de l'étalon issue d'un certificat d'étalonnage et des conditions d'environnement.

Elle prend en compte la dérive éventuelle de l'étalon.

Ici, l'incertitude d'utilisation du manomètre numérique est de 4 mbar avec un coefficient d'élargissement égale à 2, soit :

$$u_{\text{étalon}} = 2 \text{ mbar.}$$

B2 - Incertitude due à l'erreur de lecture

L'incertitude due à l'erreur de lecture u_{lec} est liée à la résolution de l'appareil. La résolution représente une fraction de l'échelon. Le manomètre métallique étalonné, a un échelon de lecture de 1 bar.

On estime que la résolution est égale à 1/5ème de l'échelon soit 0.2 bar.

L'incertitude-type est alors obtenue en divisant la résolution par $2\sqrt{3}$.

$$u_{\text{lec}} = \frac{\text{La résolution}}{\sqrt{\text{Nombre de mesures}}} \quad (\text{III.10})$$

$$u_{\text{lec}} = \frac{0.2}{2\sqrt{3}} = 0.058 \text{ bar.}$$

B3- Incertitude due à l'interpolation

Pour un point de pression p_m compris entre les points d'étalonnage $[p_i, p_j]$, la correction ϵ_m peut être calculée par interpolation linéaire entre les corrections ϵ_i et ϵ_j correspondants aux points de pression p_i et p_j .

L'incertitude-type associée par cette interpolation est calculée à partir de l'écart-type de répétabilité $u_p(\text{rep})$:

$$\text{Soit : } u_p(\text{int}) = \sqrt{2} \times u_p(\text{rép}) \quad (\text{III.11})$$

$$u_p(\text{int}) = 10.18 \text{ mbar.}$$

B4 - Incertitude due à l'hystérésis

L'incertitude due à l'hystérésis n'est pas prise en compte dans cet étalonnage car les mesures ont été effectuées en pression croissante et décroissante.

B5 - Incertitude due à la mesure de la position des niveaux de référence

L'incertitude sur la position du niveau de référence est de 10 cm en pression de gaz. Pour de l'azote, le coefficient de sensibilité est de $1.2 \cdot 10^{-6} \text{ p / cm}$.

D'où, en considérant une distribution normale :

III.4.1.6. Calcul de l'incertitude-type composée

Le calcul de l'incertitude-type composée est donné par l'expression :

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u_i^2} \quad (\text{III.12})$$

D'après l'expression (III.12) on trouve :

$$u_c = \sqrt{(7.2^2 + 2^2 + 58^2 + 10.18^2)}$$

$$u_c = 0.06 \text{ bar.}$$

D'où l'estimation de l'incertitude élargie ($k=2$) : $u_c = \pm 0.12 \text{ bar}$.

III.3.2. Etalonnage d'un transmetteur de pression

III.3.2.1. Description d'un transmetteur de pression

Un capteur de pression, souvent appelé transducteur ou transmetteur de pression, est un dispositif utilisé pour mesurer et convertir une pression mécanique ou hydraulique en un signal électrique.

Dans notre cas la pression varie de 0 à 4 bar en absolu qui est égale à l'addition de la pression atmosphérique et la pression relative.

Le signal de sortie est du courant électrique 4 à 20 mA.

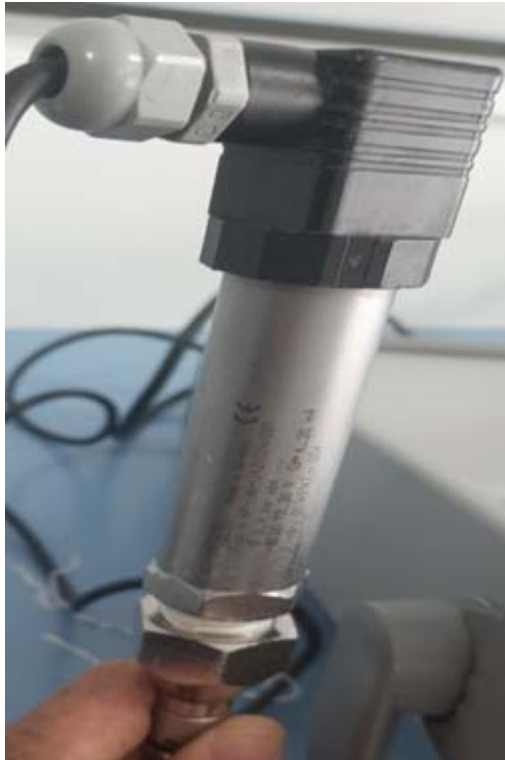


Figure III.16: Transmetteur de pression.

III.3.2.2. Moyens mis en œuvre

III.3.2.2.1. Equipements

Pour étalonner un transmetteur de pression, nous avons utilisés les équipements suivants :

- Transmetteur de pression à étalonner : Le dispositif dont la précision doit être vérifiée. Est illustre dans la figure **III.16**.
- Source de pression étalon : Une pompe de pression.



Figure III.17 : Pompe de pression.

- Manomètre de référence : Un manomètre numérique précis et déjà étalonné pour la comparaison. Voir figure III.12.
- Dispositif de mesure : Multimètre numérique pour lire les signaux de sortie du transmetteur. Voir figure III.8.

III.3.2.2.2. Inspection visuelle et connexion entre les dispositifs

Avant de commencer, il faut vérifier l'état physique du transmetteur de pression :

- On s'assure qu'il n'y a pas de dommages visibles sur le boîtier ou les connexions.
- On vérifie les raccords pour éviter les fuites de pression.

Ensuite, on connecte le transmetteur de pression au dispositif de mesure et à la source de pression étalon, tout en assurant que toutes les connexions sont sécurisées et correctes pour éviter les erreurs de mesure.

III.3.2.3. Procédure d'étalonnage

Après avoir inspecté et connecté tous les dispositifs entre eux, on a sélectionné plusieurs points de pression couvrant la plage de fonctionnement du transmetteur.

- Pression minimale (0 bar)
- Points intermédiaires (20%, 40%, 60% et 80% de la gamme)

- Pression maximale (100% de la gamme)

C'est-à-dire qu'en montant et en descendant, on a choisi 12 points en tout.

Puis, on a utilisé la source de pression étalon pour appliquer les pressions de référence au transmetteur. Pour chaque point de pression, on a attendu que la lecture se stabilise.

Après, on a noté la lecture de sortie du transmetteur de pression en mA pour chaque point de pression tout en calculant la moyenne entre la montée et la descente de chaque valeur de sortie. On a réalisé 3 cycles de mesure successifs. Les tableaux III.10, III.11 et III.12 montre les résultats.

Pression de référence (bar)	Transmetteur		
	Valeur actuelle (montée) (mA)	Valeur actuelle (descente) (mA)	Moyenne des valeurs actuelles (mA)
-0.9520	4.274	4.275	4.275
-0.6000	5.681	5.681	5.681
0.0004	8.080	8.077	8.079
0.4020	9.674	9.675	9.675
0.8010	11.258	11.260	11.259
1.2010	12.843	12.845	12.844
1.6010	14.425	14.426	14.426
2.0000	15.998	16.000	15.999
2.4000	17.570	17.572	17.571
2.8000	19.139	19.140	19.140
3.0000	19.920	19.922	19.921
3.0202	20.000	20.000	20.000

Tableau III.10 : Résultats de cycle 1.

Pression de référence (bar)	Transmetteur		
	Valeur actuelle (montée) (mA)	Valeur actuelle (descente) (mA)	Moyenne des valeurs actuelles (mA)
-0.9520	4.274	4.276	4.275
-0.6000	5.681	5.682	5.682
0.0012	8.079	8.081	8.080
0.4020	9.675	9.674	9.675
0.8010	11.257	11.259	11.258
1.2010	12.844	12.843	12.844
1.6010	14.425	14.422	14.424
2.0000	16.000	15.996	15.998
2.4000	17.574	17.572	17.573
2.8000	19.141	19.140	19.141
3.0000	19.920	19.921	19.921
3.0202	20.000	19.999	20.000

Tableau III.11 : Résultats de cycle 2.

Pression de référence (bar)	Transmetteur		
	Valeur actuelle (montée) (mA)	Valeur actuelle (descente) (mA)	Moyenne des valeurs actuelles (mA)
-0.9520	4.274	4.273	4.274
-0.6000	5.685	5.683	5.684
0.0013	8.079	8.080	8.080
0.4020	9.675	9.676	9.676
0.8010	11.259	11.261	11.260
1.2010	12.844	12.845	12.845
1.6010	14.427	14.426	14.427
2.0000	15.998	15.997	15.998
2.4000	17.570	17.571	17.571
2.8000	19.140	19.140	19.140
3.0000	19.919	19.920	19.920
3.0202	19.999	19.998	19.999

Tableau III.12 : Résultats de cycle 3.

Le tableau III.13 montre les résultats après avoir calculé la moyenne des 3 cycles de chaque mesure en mA pour chaque point de référence que ce soit en montant ou en descendant.

Pression de référence (bar)	Transmetteur		
	Valeur actuelle (montée) (mA)	Valeur actuelle (descente) (mA)	Moyenne des valeurs actuelles (mA)
-0.9520	4.2740	4.2747	4.2743
-0.6000	5.6823	5.6820	5.6822
0.0010	8.0793	8.0793	8.0793
0.4020	9.6747	9.6750	9.6748
0.8010	11.2580	11.2600	11.2590
1.2010	12.8437	12.8443	12.8440
1.6010	14.4257	14.4247	14.4252
2.0000	15.9987	15.9977	15.9982
2.4000	17.5713	17.5717	17.5715
2.8000	19.1400	19.1400	19.1400
3.0000	19.9197	19.9210	19.9203
3.0202	19.9997	19.9990	19.9993

Tableau III.13 : Résultats de la moyenne des 3 cycles pour chaque valeur de référence en (mA).

Conversion courant-pression :

Selon les caractéristiques du fabricant du transmetteur, l'étendue de mesure de l'appareil est de :

-1bar a 3bar en pression relative et une sortie signal courant 4-20 mA.

Courant (mA)	Pression (bar)
4.000	-1.0000
8.000	0.0000
12.000	1.0000
16.000	2.0000
20.000	3.0000

Tableau III.14 : Les valeurs de pression relative obtenue selon la valeur du courant.

Les résultats de tableau **III.14** sont montrés dans la figure **III.18**.

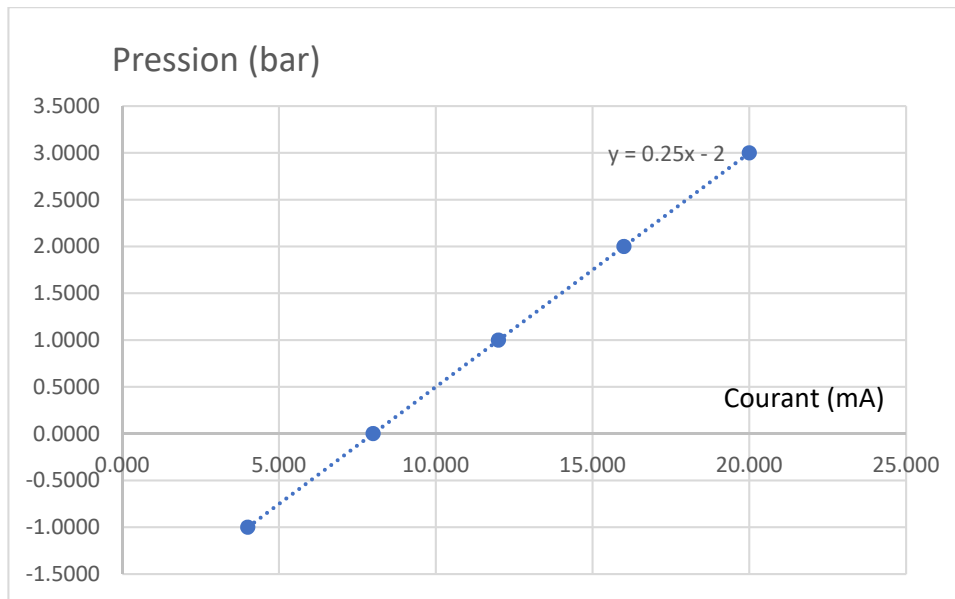


Figure III.18 : Courbe de pression relative en fonction du courant.

La conversion en bar se fait selon la formule :

$$P = 0.25 \times I - 2 \tag{III.13}$$

P : Pression (bar).

I : Courant (mA).

Le tableau **III.15** montre les résultats après la conversion en (bar).

Pression de référence (bar)	Transmetteur				
	Valeur actuelle (montée) (bar)	Valeur actuelle (descente) (bar)	Moyenne des valeurs actuelles (bar)	Ecart (bar)	hystérésis (bar)
-0.9520	-0.9315	-0.9313	-0.9314	0.0206	0.0002
-0.6000	-0.5794	-0.5795	-0.5795	0.0205	0.0001
0.0010	0.0198	0.0198	0.0198	0.0189	0.0000
0.4020	0.4187	0.4188	0.4187	0.0167	0.0001
0.8010	0.8145	0.8150	0.8148	0.0138	0.0005
1.2010	1.2109	1.2111	1.2110	0.0100	0.0002
1.6010	1.6064	1.6062	1.6063	0.0053	0.0002
2.0000	1.9997	1.9994	1.9995	-0.0005	0.0002
2.4000	2.3928	2.3929	2.3929	-0.0071	0.0001
2.8000	2.7850	2.7850	2.7850	-0.0150	0.0000
3.0000	2.9799	2.9803	2.9801	-0.0199	0.0003
3.0202	2.9999	2.9998	2.9998	-0.0204	0.0002

Tableau III.15 : Résultats de la moyenne des 3 cycles pour chaque valeur de référence en (bar).

Si les écarts sont au-delà des tolérances acceptables, on peut ajuster le transmetteur de pression si possible en agissant sur la fonction de transfert **III.18**.

Enfin, on documente les conditions d'étalonnage, incluant les pressions appliquées, les équipements utilisés, et les méthodes employées.

III.4. Vérification et étalonnage d'une balance analytique

III.4.1. Utilisation des balances pour le contrôle de la qualité

Des résultats de pesée précis sont essentiels dans la recherche et la fabrication. Dans certaines applications, des résultats de pesée inexacts pourraient non seulement compromettre les données, mais aussi devenir un risque pour la sécurité.

Dans l'industrie pharmaceutique, les balances d'analyse et de précision garantissent la qualité et l'efficacité en pesant avec précision des quantités constantes de composés, d'ingrédients pharmaceutiques actifs, d'excipients ou d'autres matériaux inertes. Dans les applications médicales, il arrive que la moindre incohérence puisse altérer l'efficacité d'un produit ou mettre la vie d'une personne en danger.

Pour la recherche et les applications médicales, les balances peuvent aider les laboratoires à rester conformes aux normes de bonnes pratiques de laboratoire (BPL) et de bonnes pratiques cliniques (BPC).

Transformation et fabrication de produits alimentaires

Comme pour les produits pharmaceutiques, l'une des principales utilisations des balances pour le contrôle de la qualité dans l'industrie alimentaire consiste à garantir une qualité et des normes de production constantes.

Les laboratoires alimentaires utilisent des balances pour créer des recettes et peser des échantillons pour une formulation rapide, et des analyseurs d'humidité pour évaluer la teneur en eau des aliments et des ingrédients.

Les laboratoires de contrôle de qualité effectuent souvent des tests multiples sur différents lots, de sorte que les balances doivent également mesurer avec précision les échantillons utilisés pour les tests.

Une recette cohérente permet d'éviter un produit de qualité inférieure et contribue à garantir par exemple que la boisson gazeuse d'une entreprise a toujours le même goût ou que les biscuits d'un fabricant ont tous le même goût et la même texture. Pour les grandes entreprises disposant de plusieurs sites de production, il est encore plus important de respecter la même recette dans tous les sites.

III.4.2. Vérification d'une balance analytique

But : Démontrer avec des évidences documentées que l'équipement remplit les conditions et les opérations prévues : confirmation par examen et apport de preuves tangibles que les exigences spécifiées ont été satisfaites.

Les étapes nécessaires pour effectuer la vérification sont détaillées ci-dessous :

D'abord on prépare les équipements qui sont :

- Balance analytique à vérifier.



Figure III.19 : Balance analytique.

- Poids calibrés et certifiés couvrant la plage de mesure de la balance.



Figure III.20 : Poids étalons.

- Documentation de référence : Spécifications techniques de la balance et certificats des poids étalons.
- Conditions environnementales contrôlées : Température, humidité et absence de vibrations.

Avant de commencer, on effectue une inspection visuelle de la balance qui se résume de :

- S'assurer que la balance est propre et exempte de poussière.
- Vérifier que le plateau de pesée est intact et bien en place.
- S'assurer que la balance est de niveau.

Ensuite, on allume la balance et on la laisse se stabiliser selon les recommandations du fabricant (généralement 30 minutes à 1 heure).

Après, on choisit des poids bien-définis et on note les valeurs affichées pour chaque poids utilisé et on les compare avec les valeurs nominales des poids étalons en procédant à des tests qui sont :

- Essai de linéarité,
- Essai de répétabilité,
- Essai d'excentricité.

III.4.2.1. Critères d'acceptation de la balance [26] [25]

La balance sera déclarée conforme lorsque toutes les conditions suivantes seront remplies :

- $|E_j| + U(E_i) \leq EMT$
- $E_F \leq EMT$
- $E_{E_{max}} \leq EMT$

Si une de ces trois conditions n'est pas respectée, la balance est déclarée non-conforme et une fiche de non-conformité est créée.

E_j : Erreur de justesse (linéarité).

E_F : Erreur de fidélité/Répétabilité.

$E_{E_{max}}$: Erreur d'excentration.

U_{E_i} : incertitude élargie avec un facteur 2.

Tout d'abord, on a relevé les caractéristiques techniques de la balance depuis sa plaque signalétique. Ces caractéristiques sont documentées dans le tableau **III.16**.

Nom de la balance	ALN 220 G		
Résolution	d =	0.1	mg
Échelon de vérification	e = 10*d	1	mg
Répétabilité	s =	0.2	mg
Erreur de linéarité	L = ±	0.3	mg
Masse de calibrage	V _m =	100	g
	emtc = ±	0.16	mg
Portée maximale	V _{max} =	220	g
Portée minimale	P _{min} =	10	mg

Tableau III.16 : Caractéristiques de la balance.

III.4.2.2. Classes de précision des balances et échelons de vérification (OIML R76-1)

Les erreurs maximales tolérées pour des charges croissantes et décroissantes sont données dans le tableau ci-dessous. Les erreurs maximales tolérées en service sont égales au double des erreurs maximales tolérées en vérification primitive.

EMT en vérification primitive	Masses exprimées en échelon de vérification "e"			
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
± 0,5 e	0 < m ≤ 50 000 e	0 < m ≤ 5000 e	0 < m ≤ 500 e	0 < m ≤ 50 e
± 1 e	50 000 e < m ≤ 200 000 e	5 000 e < m ≤ 20 000 e	500 e < m ≤ 2 000 e	50 e < m ≤ 200 e
± 1,5 e	m > 200 000 e	20 000 e < m ≤ 100 000 e	2 000 e < m ≤ 10 000 e	200 e < m ≤ 1000 e

Tableau III.17 : EMT en vérification primitive.

EMT de la balance	Masses exprimées en échelon de vérification "e"			
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
± 1 e	0 < m ≤ 50 000 e	0 < m ≤ 5000 e	0 < m ≤ 500 e	0 < m ≤ 50 e
± 2 e	50 000 e < m ≤ 200 000 e	5 000 e < m ≤ 20 000 e	500 e < m ≤ 2 000 e	50 e < m ≤ 200 e
± 3 e	m > 200 000 e	20 000 e < m ≤ 100 000 e	2 000 e < m ≤ 10 000 e	200 e < m ≤ 1000 e

Tableau III.18 : EMT de la balance.

III.4.3. Déroulement des tests (mode opératoire de la vérification)

Le But de la vérification est de s'assurer que les écarts entre les valeurs indiquées par la balance et les valeurs connues correspondantes des masses étalons utilisées sont tous inférieurs aux des masses étalons utilisées sont tous inférieurs aux erreurs maximales tolérées. La vérification Permet de déclarer si la balance est conforme ou non conforme

III.4.3.1. Test de linéarité/justesse

L'essai de justesse s'effectue en disposant successivement cinq charges comprises entre le Min et le Max de manière à permettre le relevé des mesures sur au moins la plage d'utilisation (Min au Max). Les charges sont appliquées de manière croissante et/ou décroissante dans la mesure du possible. La répartition de ces charges sur le plateau de la balance doit être conservée pour éviter les erreurs d'excentration.

Calculer les erreurs de justesse pour chaque masse :

$$E_j = V_{Lue} - V_{Vraie} \quad (\text{III.14})$$

Tolérance permise \leq EMT Balance pour la masse considérée

Nous avons utilisé les masses suivantes : 10mg, 20g, 50g, 100g, 150g et 200g.

Tolérance permise \leq EMT Balance pour la masse considérée.

On a noté les valeurs affichées et on les a comparés aux valeurs conventionnelles, et on a vérifié que les erreurs de mesure restent dans les tolérances acceptables spécifiées par le fabricant.

Charge déposée nominale M	Charge L (Valeur réelle)	Erreur limite étalon OIML R111 (mg)	Indication lue (l)	Erreur E (mg)	EMT balance (mg)
10 mg	10.0026 mg	0.008	0.0100 g	0.0	1
20 g	20.000026 g	0.08	19.9998 g	0.2	1
50 g	49.999963 g	0.10	49.9994 g	0.6	1
100 g	100.000014 g	0.16	99.9995 g	0.5	2
150 g	149.99977 g	0.36	149.9995 g	0.5	2
200 g	199.99995 g	0.34	199.9991 g	0.9	3

Tableau III.19 : Résultats après test de linéarité.

- L'erreur limite étalon est la plus grande limite qu'on peut atteindre entre la charge nominale des poids étalon et la valeur réelle de ces poids selon OIML R111. Dans le cas où la limite est

atteinte, on devrait penser à déclasser la balance. Dans notre cas la limite n'est pas atteinte, donc on continue le test.

- L'erreur (E) est calculée en soustraction directe entre l'indication lue par la balance (I) et la valeur réelle des poids étalon (L) ; en valeur absolue, ce qui donne :

$$E = |I - L| \quad (\text{III.15})$$

- Critère d'acceptation : L'erreur ne doit pas être supérieure à l'EMT de la balance pour la charge déposée sur le plateau (la balance à étalonner est de la classe I).
- Pour toutes les charges nominales l'erreur ne dépasse pas l'EMT de la balance.
- Donc, le test de linéarité est conforme.

III.4.3.2. Test de répétabilité

Le but est de vérifier l'aptitude de la balance à fournir des résultats concordants entre eux pour une même charge.

Méthodologie : on a procédé comme suit :

- Mettre la balance à zéro au début de l'essai.
- Réaliser 5 à 10 mesures d'une charge (à environ 50% de la charge maxi : on a utilisé une masse de 100g)
- On a relevé pour chaque pesée la valeur lue
- Ensuite on a calculé les écarts entre la valeur lue et la valeur vraie
- On a calculé l'erreur de fidélité de la balance pour chaque masse :

$$EF = V_{Lmax} - V_{Lmin} \quad (\text{III.16})$$

Les résultats sont montrés dans le tableau **III.20**.

Charge	N° de pesée	Charge L (Valeur réelle)	Indication lue (I) (g)	$E_F = V_{Lmax} - V_{Lmin}$	EMT
Essai effectué avec une charge d'environ 50% de la charge max.	1	100.00014 g	99.9996	0.00074 g	$\pm 2 \text{ mg}$ ($\leq 2e$)
	2		99.9996		
	3		99.9995		
	4		99.9994		
	5		99.9996		
	6		99.9995		
	7		99.9994		
	8		99.9996		
	9		99.9995		
	10		99.9994		

Tableau III.20 : Résultats après test de répétabilité.

- Après avoir effectué 10 pesées, on a mentionné les valeurs indiquées par la balance.
- On a tenu compte du plus grand écart entre la valeur indiquée par la balance et la valeur réelle du poids étalon.
- Critère d'acceptation : Le plus grand écart ne dépasse pas 2 fois l'échelon de vérification
- Donc, le test de répétabilité est conforme.

III.4.3.3. Test d'excentricité

L'objectif de test d'excentricité est de déterminer l'aptitude de la balance à fournir des résultats concordants entre la valeur lue (indication de la balance) et la valeur vraie (poids étalon), en modifiant le point d'application d'une même charge sur le plateau.

Méthodologie :

- Travailler avec une masse entre 1/3 et 1/2 de la portée maximale de la balance (100.00014 g).
- Procéder à la tare de la balance
- Diviser le plateau en 4 parties approximativement égales

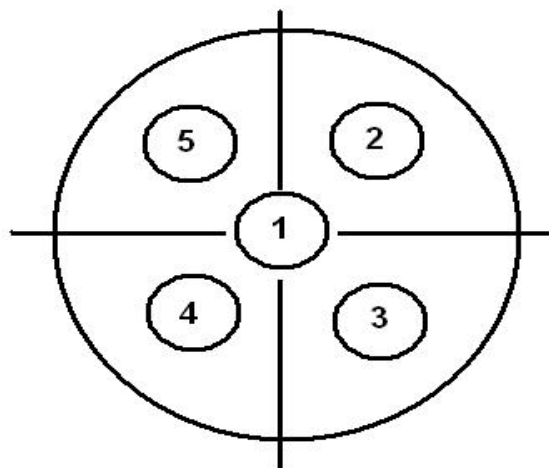


Figure III.21: plateau de la balance analytique à qualifier.

- Positionner la masse choisie au centre du plateau (point 1)
- Réaliser 4 mesures correspondant aux points 2, 3, 4 et 5 du plateau circulaire sans tarer au centre entre 2 mesures excentrées.
- Calculer pour chaque position, l'écart entre la valeur de la charge d'essai et la valeur lue = erreur d'excentration de charge EE.
- Déterminer l'erreur d'excentration maximale relevée parmi les 4 valeurs obtenues ($E_{E_{max}}$)
- On a noté les valeurs affichées pour chaque position, et on a vérifié que les variations entre les mesures restent dans les tolérances acceptables.
- Enfin, on a enregistré toutes les mesures et les écarts observés selon les conditions de qualification.

Les résultats obtenus sont dans le tableau III.21.

Point d'application	Charge L (Valeur réelle)	Indication lue (I) (g)	Erreur $E = I - L$ (g)	$E_{E_{max}}$	EMT Tolérance
P1	100.00014 g	100.0004	0.00026 g	1.04 mg	± 2 mg
P2		99.9991	-0.00104 g		
P3		99.9999	-0.00024 g		
P4		100.0004	0.00026g		
P5		99.9993	-0.00084g		

Tableau III.21 : Résultats après test d'excentricité.

- $E_{E_{max}}$ est l'erreur maximale en valeur absolue entre l'indication lue par la balance et la charge réelle du poids étalon.
- Critère d'acceptation : $E_{E_{max}}$ n'atteint pas l'erreur maximale tolérée.

- Donc, le test d'excentricité est conforme.

III.4.4. Estimation des erreurs maximales de la balance (EMT)

On a Vérifié la balance au moyen de masses de Classe E2.

$$\bullet E_c = \pm \frac{e_{mtc} \times m}{V_n} \quad (\text{III.17})$$

$$\bullet EMT_{balance} = \pm \sqrt{L^2 + ((2 \times S)^2 + E_c^2 + e_{mt}^2)} \quad (\text{III.18})$$

Avec :

- L : erreur de linéarité.
- s : écart-type de répétabilité.
- E_c : erreur de calibrage.
- e_{mt} : erreur maximale tolérée de la masse utilisée pour la vérification (cf. certificat accompagnant la masse).
- e_{mtc} : erreur maximale tolérée de la masse utilisée pour le calibrage (cf. certificat accompagnant la masse).
- m : charge déposée sur le plateau.
- V_n : valeur nominale de la masse utilisée pour le calibrage de la balance.

Charge déposée (mg)	Valeur nominale de la charge de calibrage (g)	Erreur maximale tolérée de la masse utilisée pour la calibration emtc	Erreur de calibrage E_c en (mg)
10 mg	10.0026 mg	0.16	0.00
20 g	20.000026 g	0.16	0.03
50 g	49.999963 g	0.16	0.08
100 g	100.000014 g	0.16	0.16
150 g	149.999977 g	0.16	0.24
200 g	199.99995 g	0.16	0.32

Tableau III.22 : Erreur de calibrage de la balance.

Le poids d'ajustage est 100 g ($V_n = 100000.014$ mg / $emtc = 0.16$ mg)

$$\bullet EMT_{balance} = \pm \sqrt{L^2 + ((2 * S)^2 + E_c^2 + e_{mt}^2)} \quad (\text{III.19})$$

Charge M (g)	2*Répétabilité 2*S (mg)	Linéarité L(en ±) (mg)	Calibrage Ec (mg)	emt (en ±) Masse utilisée (mg)	EMT balance (en ±) (mg)
10.0026 mg	0.18	0.0	0.00	0.008	0.17
20.000026 g	0.24	0.2	0.03	0.08	0.32
49.999963 g	0.21	0.6	0.08	0.10	0.65
100.000014 g	0.16	0.5	0.23	0.16	0.60
149.999977 g	0.33	0.5	0.24	0.19	0.67
199.99995 g	0.37	0.9	0.32	0.34	1.08

Tableau III.23 : EMT balance.

Nous constatons que tous les tests effectués sont passés avec succès, donc nous concluons que la balance est conforme et conserve sa classe de précision (classe I).

III.5. Conclusion

Les études de cas présentées dans ce chapitre mettent en évidence l'importance de suivre des procédures rigoureuses et systématiques pour l'étalonnage, la vérification et la qualification des instruments de mesure. Ces pratiques sont essentielles pour assurer des mesures fiables et précises, soutenant ainsi la qualité des produits et des processus dans divers domaines industriels et scientifiques. En appliquant les méthodes détaillées dans ce chapitre, les professionnels peuvent non seulement améliorer la performance de leurs instruments, mais aussi renforcer la confiance dans les données collectées, contribuant ainsi à l'excellence opérationnelle et à la conformité aux normes internationales. La rigueur dans ces processus est donc un pilier incontournable pour la réussite et la pérennité des activités de mesure et d'analyse.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'étalonnage, la vérification et la qualification des instruments de mesure et des équipements de laboratoire sont des éléments cruciaux pour garantir la précision, la fiabilité et la qualité des données expérimentales et industrielles. À travers ce mémoire, nous avons examiné en profondeur les principes, les méthodologies et les normes associées à ces processus.

Notre étude a démontré que ces trois processus sont indissociables et complémentaires.

Ensemble, ils constituent une chaîne de qualité indispensable pour toute activité scientifique et industrielle nécessitant des mesures précises. Nous avons également mis en évidence l'importance de suivre les normes internationales, telles que celles définies par l'ISO, afin d'assurer une uniformité et une reconnaissance mondiale des pratiques de mesure.

En analysant des cas pratiques dans différents secteurs, nous avons observé que la mise en œuvre rigoureuse des procédures d'étalonnage, de vérification et de qualification permet non seulement de garantir la qualité des résultats, mais aussi de réduire les coûts liés aux erreurs de mesure, aux défaillances d'équipement et aux non-conformités réglementaires.

La mise en place de programmes de maintenance et de contrôle qualité, incluant des calendriers réguliers d'étalonnage et de vérification, est essentielle pour prévenir les dérives et assurer la longévité des équipements de mesure. La formation continue des personnels impliqués dans ces processus est également primordiale pour maintenir un haut niveau de compétence et de vigilance.

En conclusion, l'étalonnage, la vérification et la qualification des instruments de mesure et des équipements de laboratoire sont des piliers fondamentaux pour garantir l'excellence scientifique et industrielle. Une gestion rigoureuse et bien structurée de ces processus contribue de manière significative à la fiabilité des mesures, à la satisfaction des exigences réglementaires et à l'amélioration continue des performances opérationnelles.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] :Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM). Troisième édition JCGM 200 :2012.
- [2] :<https://aqualeha.com/metrologie-legale-controle-stations-services-balances/> (Consultée le 7/06/2024).
- [3]: NIST. (2020). "Metrology in Medicine." (Consultée le 10/05/2024).
<https://www.nist.gov/programs-projects/metrology-medicine>
- [4]: Eurachem. (2019). "Measurement uncertainty in environmental analyticalchemistry." <https://www.eurachem.org/>(Consultée le 10/05/2024).
- [5] : USP. (2019). "General Chapter<1119> "Metrology". (Consultée le 15/05/2024).
<https://www.uspnf.com/>
- [6]: NATO STANAG. (2015). "STANAG 4714: Military Metrology for Aerospace Applications." (Consultée le 16/05/2024). <https://nso.nato.int/>
- [7]: Codex Alimentarius. (2017). "Principles and Guidelines for the Establishment and Application of Microbiological Criteria Related to Foods." (Consultée le 16/05/2024).
<http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/>
- [8] : ITU. (2019). " ITU-T Recommendations on TelecommunicationMeasurements." (Consultée le 21/05/2024). <https://www.itu.int/en/ITU-T/faq/Pages/default.aspx>
- [9]: BIPM. (2012). " The International System of Units (SI) ". 8th edition.
- [10]: ISO/IEC 17025:2017. (2017). " General requirements for the competence of testing and calibration laboratories ".
- [11]: Fluke Calibration. (2011). " Calibration: Philosophy in Practice ". 2nd edition.
- [12]: ISO/IEC 17025:2005 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Consulté le 29/05/2024).<https://www.iso.org/fr/standard/39883.html>
- [13]: ISO/IEC 17029 - Conformity assessment — General principles and requirements for validation and verification bodies (Consultée le 29/05/2024).
<https://www.iso.org/fr/standard/29352.html>
- [14]: A. B. Martins, José T. Farinha, A. M. Cardoso, « Calibration and certification of industrial sensors- a global review », WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL, E-ISSN: 2224-2856, vol. 15, 2020.
- [15] : DAZZAZI. M, HANFAOUI. M, HAKIM. H, « Maitrise des instruments de mesure», Université Hassan II Casablanca, rapport de projet de fin d'étude, le 8 avril 2024)

- [16] : Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). ‘‘The International System of Units (SI).’’ 9th edition, 2019.
- [17]: <https://fr.defelsko.com/resources/calibration-verification-and-adjustment>
(Consultée le 11/05/2024).
- [18] : <https://blog.wika.fr/savoir-faire/verification-ou-etalonnage/?> (Consultée le 13/05/2024).
- [19] : Stanford Research Systems <https://www.thinksrs.com>(Consultée le 01/06/2024).
- [20]: TDK ELCTRONICS- NTC thermistors for temperature measurement - Leaded NTSc, lead spacing 5mm - Series/Type B 57164, Epcos AG (DE), 2006.
- [21]: Note d’application FLUKE - Comment étalonner une sonde RTD ou sonde à résistance de platine (PRT). <https://www.fluke.com/fr/apprendre/blog/etalonnage/simuler-les-thermocouples-et-sondes-rtd-pour-l-etalonnage-et-les-tests> (Consultée le 01/06/2024).
- [22]: Guidelines on the Calibration of Thermocouples EURAMET Calibration Guide No. 8 Version 3.1 (02/2020).
- [23]: Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters EURAMET cg-15 Version 3.0 (02/2015).
- [24]: Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers EURAMET Calibration Guide No. 17.
- [25]: NF EN 45501 : Aspects métrologiques des instruments de pesage à fonctionnement non automatique.
- [26]: Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments EURAMET Calibration Guide No. 18.
- [27] : D. Ottello, la temperature- <https://aviatechno.net>(Consultée le 01/06/2024).

Résumé

Ce travail, qui a été collecté après avoir fait un stage pratique au sein de l'entreprise CELSIUS Ingénierie et en récoltant des données de plusieurs sources d'information. Cette étude nous a menés aux principaux concepts de la métrologie qui sont l'étalonnage, la vérification et la qualification des instruments de mesure et équipements de laboratoires. On a commencé par définir la métrologie, ses types et ses principaux domaines d'application tout en parlant de l'étalonnage, la vérification et la qualification et en soulignant leurs objectifs. Puis, on a cité les différentes étapes de l'étalonnage tout en incluant les méthodologies à suivre pour une bonne pratique de ces concepts. Enfin, on est passés à une expérimentation de cas en terme d'étalonnage et qualification qu'on a maniés durant notre stage.

Summary

This work, which was collected after completing an internship at the company CELSIUS Ingénierie and gathering data from various sources of information, led us to the main concepts of metrology, which are calibration, verification, and qualification of measuring instruments and laboratory equipment. We began by defining metrology, its types, and its main areas of application, discussing calibration, verification, and qualification, and highlighting their objectives. Then, we outlined the different steps of calibration, including the methodologies to follow for good practice of these concepts. Finally, we moved on to an experimental case in terms of calibration and qualification that we handled during our internship.

ملخص

تم جمع هذا العمل بعد الانتهاء من التدريب العملي داخل شركة CELSIUS Ingénierie ومن خلال جمع البيانات من عدة مصادر للمعلومات. قادتنا هذه الدراسة إلى المفاهيم الأساسية في علم القياس وهي المعايرة والتحقق وتأهيل أدوات القياس ومعدات المختبرات. لقد بدأنا بتعريف المترولوجيا وأنواعها وأهم مجالات تطبيقها مع الحديث عن المعايرة والتحقق والتأهيل وإبراز أهدافها. ثم ذكرنا المراحل المختلفة للمعايرة مع تضمين المنهجيات التي يجب اتباعها للممارسة الجيدة لهذه المفاهيم. أخيرًا، انتقلنا إلى تجربة الحالة من حيث المعايرة والتأهيل التي تعاملنا معها خلال فترة تدريبنا.

