

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministre De l'Enseignement Supérieur  
Et de la Recherche Scientifique*



*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté de Génie de la Construction  
Département de Génie Mécanique*



*Option : Construction Mécanique*

*Mémoire de fin d'étude*

A fin d'obtention de diplôme master 2 en construction mécanique

## **THÈME**

*Etalonnage et vérification des  
instruments de mesures dimensionnels :  
Application aux pieds à coulisse.*

*ENCADRE PAR :*

*Mr. BELAID Kamel*

*REALISE PAR*

*Mr. ARICHE Chafâa*

**PROMOTION : 2018**

# REMERCIEMENT

*Je remercie tout d'abord le bon Dieu le tout puissant de m'avoir gardé en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude.*

*Je tien à remercier également ma famille pour les sacrifices qu'elle a fait pour moi.*

*Mes infinis remerciements à mon promoteur Mr BELAID Kamel pour son aide et ses remarques qui mon permis de présenter mon travail dans sa meilleur forme.*

*Je remercie aussi tous les enseignants qui ont contribués à une bonne formation durant mon cursus universitaire.*

*Mes remerciements s'adressent aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger mon modeste travail.*

*Enfin je remercie toute personne ayant contribué de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# **DEDICACE**

**Je dédie ce modeste travail à :**

**Mes parents, êtres plus chère au monde, je les remercie de tout cœur pour leur sacrifice, leur soutien permanent, leur précieux conseils et pour m'avoir guidé depuis mon jeune âge, que dieu me les préserve.**

**A mes sœurs Tassadit, Taous, Baya et Karima ;et mes frères Boualem et Hamid ;**

**A ma chère épouse, mes chers amis Hakim, Ahmed, Rachid, Youcef, Koceila, Mehdi, Samir, Hilal et tous mes autres amis sans oublier personne ;**

**Mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis le primaire, le CEM, le lycée et l'université.**

# Table des matières

Table des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Introduction générale	1
<b>1 La Métrologie</b>	<b>3</b>
1.1 La métrologie... c'est quoi?[1]	3
1.1.1 Qu'est-ce que la métrologie?	3
1.1.2 Qu'est-ce que mesurer?	3
1.1.3 Qu'est-ce que la traçabilité?	4
1.1.4 Qu'est-ce qu'une incertitude de mesure?	4
1.1.5 Qu'est-ce que l'accréditation?	5
1.2 Quelques définitions	5
1.3 La Méthode des 5M	6
1.3.1 Définition	6
1.3.2 Exemple 1 : la consommation du carburant d'un véhicule	6
1.3.3 Exemple 2 : Une tarte aux pommes ratée	7
1.4 Grandeur	8
1.4.1 Systèmes de grandeurs	9
1.4.2 Dimension d'une grandeur	9
1.4.3 Mesurage d'une grandeur	10
1.5 Méthodes de mesure	10
1.5.1 Méthode de mesure directe	10
1.5.2 Méthode de mesure indirecte	11
1.5.3 Méthode de mesure selon définition	11
1.5.4 Méthode de mesure fondamentale	11
1.5.5 Méthode de mesure par comparaison	11
1.5.6 Méthode de zéro	12
1.6 Système international d'unité ( SI )	12
1.6.1 Unités SI de base	12

1.6.2	Unités SI dérivées . . . . .	15
1.6.2.1	Unités exprimées à partir des unités de base . . . . .	16
1.6.2.2	Unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers	16
1.6.3	Unités des grandeurs sans dimension, grandeurs de dimension un . .	17
<b>2</b>	<b>Caractéristique des instruments de mesures</b>	<b>18</b>
2.1	Introduction . . . . .	18
2.2	Capteur . . . . .	19
2.2.1	Définition . . . . .	19
2.2.2	Caractéristiques d'un capteur . . . . .	20
2.2.3	Catégories de capteurs . . . . .	20
2.2.3.1	Capteur actif . . . . .	20
2.2.3.2	Capteur passif . . . . .	21
2.2.4	Rôle du capteur . . . . .	22
2.2.5	Étalonnage d'un capteur . . . . .	22
2.3	Caractéristique des instruments de mesures . . . . .	24
2.3.1	Incertitude . . . . .	24
2.3.2	Fidélité, Justesse ET Précision[4] . . . . .	24
2.3.2.1	La fidélité : . . . . .	24
2.3.2.2	La justesse : . . . . .	24
2.3.2.3	La précision : . . . . .	24
2.3.3	Répétabilité . . . . .	26
2.3.4	Reproductibilité . . . . .	26
2.3.5	Sensibilité . . . . .	26
2.3.6	Résolution . . . . .	26
2.3.7	Étendue de mesure . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Chaines de mesure[5]</b>	<b>28</b>
3.1	Introduction . . . . .	28
3.2	Principe d'une chaîne de mesure . . . . .	29
3.3	Chaîne de mesure analogique . . . . .	30
3.3.1	Principe . . . . .	30
3.3.2	Capteurs . . . . .	31
3.3.3	Convertisseurs de mesure . . . . .	31
3.3.3.1	Convertisseurs de mesure pour capteurs passifs . . . . .	31
3.3.3.2	Convertisseurs de mesure pour capteurs actifs . . . . .	32
3.3.4	Amplificateurs . . . . .	33
3.4	Chaîne de mesure numérique . . . . .	33
3.4.1	Principe . . . . .	33
3.4.2	Échantillonneur-bloqueur . . . . .	34

3.5	Acquisition de données . . . . .	34
3.6	Facteurs d'influence . . . . .	35
3.7	Traitement du signal . . . . .	35
3.7.1	Définition d'un signal . . . . .	35
3.7.2	Traitement du signal . . . . .	36
3.8	Instrumentation associée a l'ordinateur personnel . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Incertitude</b>	<b>39</b>
4.1	Position de problème . . . . .	39
4.2	Traitement des erreurs de mesure . . . . .	39
4.2.1	Diminution des erreurs aléatoires . . . . .	40
4.2.2	Correction des erreurs systématique . . . . .	40
4.3	Modélisation du mesurage . . . . .	41
4.4	Procédure de détermination des incertitudes . . . . .	42
4.4.1	Hypothèse simplificatrice . . . . .	42
4.4.2	Procédure . . . . .	42
4.5	Évaluation des composantes de l'incertitude . . . . .	43
4.5.1	Méthode de type A . . . . .	43
4.5.1.1	Estimation de l'incertitude-type . . . . .	43
4.5.1.2	Diminution de l'incertitude . . . . .	43
4.5.2	Méthode de type B . . . . .	44
4.5.2.1	Chiffage des erreurs . . . . .	44
4.6	Estimation de l'incertitude . . . . .	45
4.7	Présentation des résultats . . . . .	46
4.7.1	Chiffres significatifs . . . . .	46
4.7.2	Écriture des résultats de mesure . . . . .	46
4.8	Méthodes d'analyses du processus de mesurage . . . . .	47
4.8.1	Méthodes pour étudier un problème . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Calcul d'incertitude d'un pied à coulisse</b>	<b>49</b>
5.1	Introduction . . . . .	49
5.1.1	Le principe de mesure . . . . .	49
5.1.2	Les moyens mis en œuvre . . . . .	50
5.1.2.1	Les étalons de référence . . . . .	50
5.1.2.2	L'environnement . . . . .	50
5.2	Analyse du processus de mesure . . . . .	50
5.2.1	La méthode des " 5 M " - Recherche des causes d'erreur . . . . .	50
5.2.1.1	Les moyens : Les cales étalons . . . . .	50
5.2.1.2	La méthode . . . . .	51
5.2.1.3	La matière (le produit mesuré) . . . . .	51

5.2.1.4	Le milieu . . . . .	51
5.2.1.5	La main-d'œuvre : l'opérateur . . . . .	51
5.2.1.6	Synthèse . . . . .	52
5.2.2	Le modèle mathématique . . . . .	53
5.3	L'évaluation des incertitude-types . . . . .	53
5.3.1	Incertitude-type de répétabilité . . . . .	53
5.3.2	résolution de l'instrument : . . . . .	53
5.3.3	incertitude sur l'étalon de référence . . . . .	53
5.3.3.1	Premier cas : les cales sont étalonnées mais non classées . . . . .	53
5.3.3.2	Deuxième cas : les cales sont étalonnées et classées . . . . .	54
5.3.4	Incertitude liée aux effets de la température . . . . .	54
5.4	Calcul de l'incertitude-type composée . . . . .	56
5.5	Calcul de l'incertitude-type composée calcul complet . . . . .	57
5.6	Calcul simplifié de l'incertitude sur l'erreur de justesse . . . . .	58
5.7	Expression finale du résultat . . . . .	59
5.8	Classes de précisions . . . . .	59
5.9	Exemple pratique 1 . . . . .	60
5.9.1	Détermination de l'erreur de justesse . . . . .	60
5.9.2	Détermination de l'erreur de fidélité . . . . .	61
5.10	Exemple pratique 2 . . . . .	63
5.10.1	Détermination de l'erreur de justesse . . . . .	64
5.10.2	Détermination de l'erreur de fidélité . . . . .	65
	<b>Conclusion générale</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>68</b>

# Table des figures

1.1	Forme générale . . . . .	6
1.2	La consommation de carburant d'un véhicul . . . . .	7
1.3	Une tarte aux pommes ratée . . . . .	7
2.1	Représentation des erreurs de mesure. . . . .	19
2.2	Schéma fonctionnel d'un capteur. . . . .	19
2.3	courbe d'étalonnage d'un capteur. . . . .	23
2.4	courbe de precision. . . . .	25
3.1	Structure de base d'une chaine de mesure. . . . .	29
3.2	Chaine de mesure d'un manomètre mécanique. . . . .	30
3.3	Structure d'une chaine de mesure analogique simple . . . . .	31
3.4	Structure complète d'une chaine de mesure analogique simple . . . . .	31
3.5	Montage potentiométrique (a), Montage en pont(b) . . . . .	32
3.6	variation du mesurande (a), tension d'alimentation (b), tension de mesure (c).. . . . .	32
3.7	Structure d'une chaine de mesure numerique . . . . .	33
3.8	Principe d'un échantillonneur-bloqueur : l'échantillonnage est effectué à instant réguliers $T_e$ (a) puis est bloqué durant un temps $\tau$ (b). . . . .	34
3.9	Schéma synoptique d'une chaîne de mesure numérique à n entrées avec multiplexage analogique à la sortie du conditionneur de signaux. . . . .	35
3.10	Dans l'instrumentation moderne, les données mesurées sont transmises à un ordinateur personnel par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition. . . . .	37
3.11	Exemple pratique d'une chaine de mesure numérique. . . . .	38
5.1	Méthode des 5 M . . . . .	52
5.2	Pied à coulisse 1/50 mm d'etendue de mesure 300 mm. . . . .	60
5.3	Détermination de l'erreur de justesse [ P a C 1/50 ]. . . . .	61
5.4	Détermination de l'erreur de fidélité côté règle [ P a C 1/50 ] . . . . .	62
5.5	Détermination de l'erreur de fidélité côté extrimités[ P a C 1/50 ]. . . . .	62
5.6	Pied à coulisse 1/20 mm d'etendue de mesure 150 mm. . . . .	64
5.7	Détermination de l'erreur de justesse [ PaC 1/20 ]. . . . .	64

5.8	Détermination de l'erreur de fidélité côté extrémité [ PaC 1/20 ]. . . . .	65
5.9	Détermination de l'erreur de fidélité côté règle [ PaC 1/20 ]. . . . .	65

# Liste des tableaux

1.1	Unités SI de base. . . . .	15
1.2	Exemples d'unités SI dérivées exprimées à partir des unités de base. . . . .	16
1.3	Exemple des unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers. . . . .	17
2.1	Quelques grandeurs de sortie . . . . .	20
5.1	Composantes relatives à la température des cales . . . . .	55
5.2	Calcul complet . . . . .	57
5.3	Traitement simplifié. . . . .	58
5.4	Les limites des pieds à coulisse au 1/50 mm et au 1/100 mm. . . . .	59
5.5	Détermination de l'erreur de justesse [ P a C 1/50 ]. . . . .	61
5.6	Détermination de l'erreur de fidélité [ P a C 1/50 ]. . . . .	62
5.7	Traitement simplifié. . . . .	63
5.8	Détermination de l'erreur de justesse [ P a C 1/20 ]. . . . .	64
5.9	Détermination de l'erreur de fidélité [ P a C 1/20 ]. . . . .	65
5.10	Traitement simplifié. . . . .	66

# Introduction générale

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse ...). La satisfaction des attentes des clients et l'obtention des produits de qualité doivent être le moteur du progrès des entreprises, cela impose à ces dernières une maîtrise de leurs instruments de mesure.

La métrologie est un concept qui est liée à des principes et à une organisation qui font intervenir des notions d'étalon et d'étalonnage, de vérification, de traçabilité, d'accréditation, d'incertitudes de mesure, ... La qualité s'appuie et s'appuiera toujours sur des essais et des mesures. La qualité même de ces mesures repose sur une bonne métrologie.

Tout système de mesure est inéluctablement attaché d'erreurs. Un système de mesure n'est jamais parfait puisqu'il est en général plus ou moins sensible à l'environnement (température, humidité...), il n'est pas fidèle et même les étalons servant à l'étalonnage de l'instrumentation ne sont qu'une matérialisation imparfaite de la définition de l'unité qu'ils sont chargés de représenter.

De manière générale, le but de la mesure est d'évaluer une variable physique appelée variable mesurée ou mesurande. Le but du système de mesure est donc la quantification de la variable mesurée, c'est l'opération de mesurage. Ce que l'on obtient en pratique est la valeur donnée par l'instrument de mesure. L'exactitude de la mesure se définit à partir de la différence entre la valeur donnée par l'appareil de mesure et la valeur réelle de la grandeur mesurée.

Toute la difficulté consiste donc à avoir une valeur donnée par le processus de mesure qui soit la plus proche possible de la vraie valeur qui reste généralement inconnue. Il est essentiel de pouvoir estimer l'erreur probable que l'on commet durant le processus de mesure. Afin de pouvoir garantir que la valeur donnée par l'appareil de mesure ne diffère pas de la vraie valeur d'une quantité supérieure à une grandeur fixée et connue.

Cependant, les mesures relevées ne peuvent être considérées exactes qu'à condition que les instruments de mesure utilisés fassent l'objet d'une gestion particulière. Cette gestion fait partie des activités de la fonction métrologique. C'est pourquoi, il est primordial de mettre en place la fonction métrologique au sein de l'entreprise, pour maîtriser les processus de fabrication et garantir la conformité des produits vendus, et elle permet de cibler les actions en fonction des besoins réels de l'entreprise, d'assurer la maîtrise des

instruments à tout moment et ainsi apporter une amélioration continue de la qualité.

Dans ce mémoire, nous allons déterminer et évaluer toutes les types d'erreurs qui interviennent dans la mesure des longueurs avec un pied à coulisse. Le pied à coulisse est un instrument de mesure qui permet de mesurer des dimensions intérieures, extérieurs et des profondeurs.

L'unité de base des mesures dimensionnelles est le mètre. C'est l'unité de longueur du Système international (SI). Le mètre a d'abord été défini comme la 10 000 000ème partie d'une moitié de méridien terrestre, puis comme la longueur d'un mètre étalon international, puis comme un multiple d'une certaine longueur d'onde et enfin, depuis 1983, comme « la longueur du trajet parcouru par la lumière dans le vide pendant une durée d'un 299 792 458ème de seconde.

L'organisation de ce mémoire est le suivant : l'après l'introduction générale, le premier chapitre est consacré aux notions de métrologie et de la mesure, le deuxième chapitre traite les caractéristiques des instruments de mesures ainsi que les capteurs d'une manière générale, le troisième chapitre explique le fonctionnement des chaines de mesure et de ses constituants, dans le chapitre quatre, les notions de base des incertitudes sont données ainsi que les types d'erreurs rencontrées lors des mesures, le dernier chapitre récapitule les différentes erreurs qui interviennent lors de la mesure avec les pied à coulisse avec un cas pratique de calcul d'incertitude d'un pied à coulisse et on terminera avec une conclusion générale.

# Chapitre 1

## La Métrologie

### 1.1 La métrologie... c'est quoi ?[1]

Avant de débiter ce chapitre important, il faut se poser les questions suivantes :

- qu'est-ce que la métrologie ? A quoi cela sert ?
- qu'est-ce que mesurer ?
- qu'est-ce que la traçabilité ?
- qu'est-ce qu'une incertitude de mesure ?
- qu'est-ce que l'accréditation ?

#### 1.1.1 Qu'est-ce que la métrologie ?

La métrologie est la science de la mesure associée à l'évaluation de son incertitude. Le métrologue s'intéresse à la qualité des mesures et en particulier à deux facteurs. Le premier de ces facteurs est de s'assurer du raccordement de la mesure à des étalons de référence. Le deuxième facteur de la qualité de la mesure est celui du calcul de l'incertitude. Pour évaluer les sources d'incertitude de mesure on utilise communément la méthode dite des 5M.

#### 1.1.2 Qu'est-ce que mesurer ?

Mesurer, c'est comparer une grandeur physique inconnue avec une grandeur de même nature prise comme référence, à l'aide d'un instrument. C'est exprimer le résultat de cette comparaison à l'aide d'une valeur numérique, associée à une unité qui rappelle la nature de la référence, et assortie d'une incertitude qui dépend à la fois des qualités de l'expérience effectuée et de la connaissance que l'on a de la référence et de ses conditions d'utilisation. Comparer, c'est mettre en œuvre un principe de mesure physique, développer des capteurs adaptés à la grandeur concernée, concevoir, construire, caractériser l'instrument optimal, traiter enfin le signal délivré par la chaîne de mesure pour en extraire toute l'information

disponible, en s'affranchissant autant que faire se peut des fluctuations indésirables, qui généralement constituent ce qu'on appelle le bruit.

### 1.1.3 Qu'est-ce que la traçabilité ?

Mesurer a aussi pour finalité d'asseoir les résultats de mesure sur des bases reconnues sans équivoque par plusieurs partenaires, que ce soit à des fins scientifiques, commerciales, ou d'expertise légale. Cela nécessite l'existence de références dont les caractéristiques sont clairement établies. Ce peut être la référence de travail d'un établissement ou d'un laboratoire, périodiquement étalonnée, par comparaison (à nouveau !) à une référence d'incertitude plus faible, c'est-à-dire située à un niveau plus élevé dans ce qu'on appelle la hiérarchie d'une chaîne d'étalonnage. Au sein de cette hiérarchie, les comparaisons sont entreprises selon des méthodes et des procédures de plus en plus élaborées et contraignantes. Le stade ultime de la hiérarchie nationale est la matérialisation dite primaire des unités les plus fondamentales permettant d'accéder à la grandeur. Il n'est plus question alors d'étalonnage, mais de mise en pratique de la définition de l'unité. Seules des inter-comparaisons effectuées entre des montages indépendants permettent de préciser l'incertitude, on parle alors d'exactitude de réalisation.

L'Office Fédéral de Métrologie (METAS)[2] est en Suisse le garant de la traçabilité des mesures. Ainsi, les « fournisseurs » de résultats de mesure et leurs « clients » ont besoin d'exprimer ces résultats en utilisant des références reconnues sans équivoque par chacun des acteurs et en exprimant de façon scientifiquement convenue l'incertitude associée. Cet ensemble constitue, pour toutes les grandeurs physiques, le langage (universel ?) de la métrologie.

### 1.1.4 Qu'est-ce qu'une incertitude de mesure ?

Une valeur mesurée n'est donc pas une valeur certaine : elle est issue de résultats présentant une certaine dispersion, et de plus il existe une certaine méconnaissance de la valeur due à divers facteurs comme : doute sur l'étalonnage du système, problèmes de dérive, conditions de mesure, etc. Une fois prises en compte toutes ces causes qui altèrent la connaissance de la valeur de la mesurande, on appelle incertitude (et pas erreur !) de mesure le paramètre associé au résultat qui caractérise la dispersion des valeurs numériques. En l'absence d'incertitude, il n'est plus possible, plus pertinent, de comparer entre eux des résultats. Comment savoir, sans connaître l'incertitude, si une grandeur a évolué, si tel procédé de mesure conduit au même résultat, ou si la différence éventuellement observée ne tient qu'à des phénomènes aléatoires mal maîtrisés dont l'origine peut être intrinsèquement liée à la grandeur elle-même ? Comment, dans des conditions analogues, comparer un résultat à des valeurs de référence spécifiées par exemple dans une norme, un autre texte réglementaire, un contrat, et donc garantir la conformité du produit ou du

système ainsi caractérisé ?

### 1.1.5 Qu'est-ce que l'accréditation ?

Aujourd'hui, il y a de plus en plus de produits sur le marché. De ce fait, les besoins de protection des consommateurs sont de plus en plus importants. Cette protection est assurée en partie par la certification, l'inspection et les tests réalisés sur les produits et leur mise en œuvre sous assurance qualité. Les consommateurs ne pouvant pas tester eux-mêmes la qualité, ni la mise en œuvre des produits qu'ils consomment, ce sont des organismes agréés qui s'en chargent à leur place. Pour qu'un organisme puisse certifier un produit et sa mise en œuvre, il doit au préalable être accrédité. Les organismes certificateurs de produits sont en général différents de ceux des systèmes d'assurance de la qualité. Ce sont des métiers différents. La certification de produits est importante pour un fabricant de biens de consommation, et la certification de système d'assurance de la qualité est importante pour un sous-traitant.

## 1.2 Quelques définitions

**La métrologie :** C'est la science de la mesure.

**Normes :** pour déterminer rigoureusement l'incertitude, il faudrait que tous les fabricants donnent la confiance de leurs incertitudes et les profils des lois de probabilité.

pour contribuer à une information complète sur l'expression de l'incertitude et fournir une base pour la comparaison internationale des résultats de mesure Le comité internationale des poids et mesure et l'Organisation internationale de normalisation ont développés un guide.

Il s'agit de mettre en place des méthodes d'évaluation et d'expression des incertitudes harmonisées pour tous les pays et tous les domaines ( de la santé, de la sécurité, industriel, commercial,etc.).

**Le mesurande :** C'est la grandeur physique particulière qui fait l'objet du mesurage.

**Le Mesurage :** L'objectif d'un mesurage consiste à déterminer la valeur du mesurande, c'est-à-dire la valeur de la grandeur particulière à mesurer. En conséquence, un mesurage commence par une définition appropriée du mesurande, de la méthode de mesure et de la procédure de mesure

**Étalon :** mesure matérialisée, appareil de mesure, matériau de référence ou système de mesure destiné à définir, réaliser, conserver ou reproduire une unité ou une ou plusieurs valeurs d'une grandeur pour servir de référence.

**cales étalons :** Les cales étalons sont en acier trempé, d'une grande dureté et d'une haute précision. Elles sont calibrées à 20°C. Les cales sont regroupées par jeux de composition diverse dans des écrins. Ils permettent de réaliser des cotes par combinaison.

## 1.3 La Méthode des 5M

### 1.3.1 Définition

C'est une méthode d'analyse qui permet de ne pas oublier d'éléments qui interviennent dans le phénomène (appelée aussi diagramme de poisson ou méthode ISHIKAWA). Autrement dit, elle utilise une représentation graphique pour matérialiser de manière structurée le lien entre les causes et leur effet (défaut, panne, dysfonctionnement...).

Kaoru Ishikawa classe les différentes causes d'un problème en 5 grandes familles : les 5M (Fig. 1.1).

Matière : les différents consommables utilisés, matières premières...

Milieu : le lieu de travail, son aspect, son organisation physique...

Méthodes : les procédures, le flux d'information...

Matériel : les équipements, machines, outillages, pièces de rechange...

Main d'œuvre : les ressources humaines, les qualifications du personnel

Pour un « effet » particulier (panne, défaillance technique, accident, retard...), la méthode d'Ishikawa permet de rechercher l'ensemble des « causes possibles ». Pour ce faire, un animateur de projet réuni autour d'un thème une équipe de travail multidisciplinaire et suffisamment représentative. Partant d'un brainstorming, les causes identifiées sont notées et classées selon les 5M.

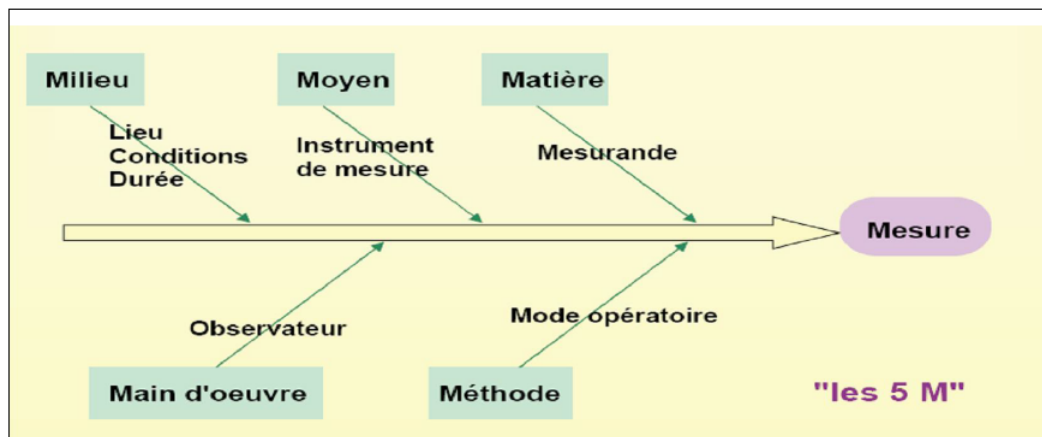


FIGURE 1.1 – Forme générale .

### 1.3.2 Exemple 1 : la consommation du carburant d'un véhicule

l'effet constaté, la consommation du carburant d'un véhicule, est tracé dans la Fig(1.2). Le champ d'application de la méthode d'Ishikawa s'étend à divers secteurs. Bien qu'à l'origine celle-ci ne retienne que cinq familles de cause, le diagramme de causes-effet reste un outil flexible pouvant être adapté aux conditions particulières de chaque champ d'analyse. Le nombre de famille de causes possibles peut donc varier selon les cas. Cependant, il ne

faut pas perdre de vue la distinction claire qui existe entre une cause et une solution.

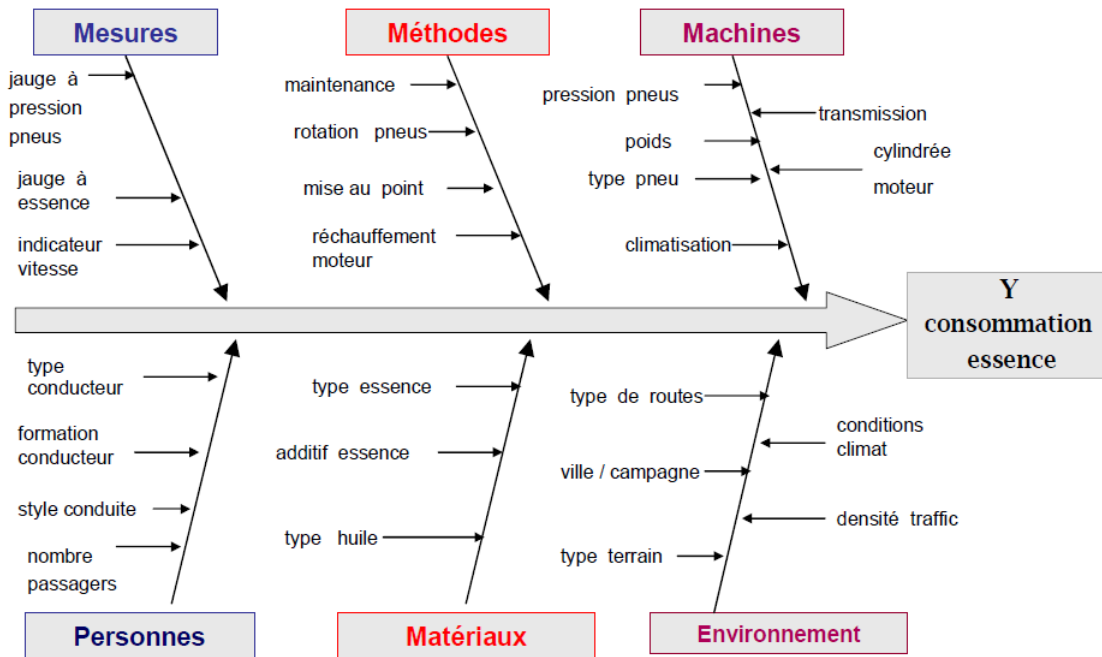


FIGURE 1.2 – La consommation de carburant d'un véhicule .

### 1.3.3 Exemple 2 : Une tarte aux pommes ratée

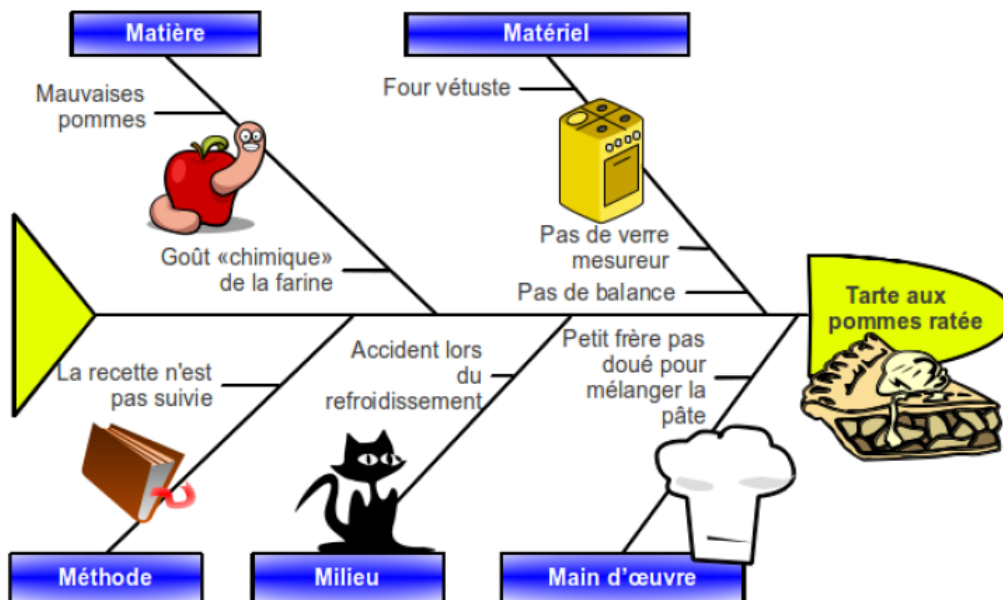


FIGURE 1.3 – Une tarte aux pommes ratée

## 1.4 Grandeur

C'est une caractéristique d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement par un nom (masse, distance, angle..) et déterminé quantitativement par une valeur (nombre exprimé dans l'unité choisie), autrement dit, elle se rattache à l'expression quantitative des phénomènes.

### Grandeurs mesurables

On est capable de définir, pour certaines classes d grandeurs et pour l'ensemble d'une classe donnée :

- une équivalence.
- une relation d'ordre total qui permet de dire si une grandeur est inférieure ou égale à une autre grandeur (par double pesée de masses à l'aide d'une balance à bras égaux, par exemple) .
- une opération d'addition (par exemple l'addition de deux angles de demi-droites) .
- une opération de multiplication par les réels positifs(dire que l'énergie mécanique d'un moteur est le triple de celle d'un autre moteur).

Donc, une grandeur physique est mesurable s'il est possible de définir l'égalité et l'addition de deux grandeurs de son espèce.

Les exemples de ces grandeurs abondent : la masse, la longueur, l'angle, l'énergie, l'induction magnétique, etc.

Pour toutes les grandeurs qui viennent d'être citées en exemple, on sait physiquement composer la somme de deux grandeurs caractérisant deux objets, deux propriétés. Par exemple, deux condensateurs de capacité  $C$  peuvent être associés (en parallèle) pour obtenir une capacité  $2C$  ou deux masses de  $5Kg$  peuvent être associées pour obtenir une masse de  $10Kg$ .

### Grandeurs repérables

Pour d'autres classes de grandeurs, les deux opérations d'addition et de multiplication par les réels, ne peuvent être définies. On utilise alors pour classer ces grandeurs (et non pour les mesurer) des échelles.

On parle alors de grandeurs repérables. On peut citer la dureté qui peut être évaluée par rapport à une échelle (échelle de Mohs) ou par un indice (Brinell, Vickers), alors qu'on ne peut pas parler de « somme » de deux duretés. C'est aussi le cas de l'intensité des séismes, de la température Celsius, du potentiel électrique, etc.

### 1.4.1 Systèmes de grandeurs

Les grandeurs physiques sont reliées entre elles par des relations qui permettent de les définir et de modéliser les phénomènes physiques qu'elles décrivent. Certaines grandeurs sont choisies comme grandeurs de base, considérées conventionnellement comme indépendantes ; les autres grandeurs, appelées grandeurs dérivées, se déduisent des grandeurs de base par les relations entre grandeurs. L'ensemble des grandeurs de base, des grandeurs dérivées et des relations qui les lient forme un système de grandeurs.

#### Exemple

Dans le système, habituellement appelé système de la mécanique, qui a pour grandeurs de base la longueur, la masse et le temps, la vitesse est une grandeur dérivée définie par le quotient de la longueur par le temps.

### 1.4.2 Dimension d'une grandeur

L'expression d'une grandeur dérivée  $Q$  en fonction de grandeurs de base consiste en général en un produit de puissances de grandeurs de base et, éventuellement d'un facteur numérique, c'est-à-dire :

$$Q = \xi A^\alpha B^\beta C^\gamma \dots$$

On appelle dimension de la grandeur  $Q$  ou encore produit de dimensions de  $Q$  l'expression  $A^\alpha B^\beta C^\gamma \dots$ , où  $A, B, C \dots$  indiquent les dimensions des grandeurs de base  $A, B, C \dots$  et où  $\alpha, \beta, \gamma \dots$  sont appelés exposants dimensionnels de la grandeur  $Q$ . Une grandeur dont tous les exposants dimensionnels sont nuls est dite grandeur sans dimension.

#### Exemple

Dans le domaine de la mécanique, on définit un système de grandeurs à partir des trois grandeurs de base : **longueur, masse et temps**, de dimensions habituellement symbolisées respectivement par  $L, M, T$ .

La dimension d'une grandeur  $A$  s'écrit alors :

$$\dim A = A = L^\alpha M^\beta T^\gamma$$

L'énergie  $E$  a ainsi comme dimension :

$$E = L^2 M T^{-2}$$

### 1.4.3 Mesurage d'une grandeur

Un mesurage peut être qualifié de statique lorsque la grandeur à mesurer (mesurande), peut être considérée comme constante pendant la durée du mesurage.

En sens inverse, un mesurage dynamique détermine la valeur instantanée d'un mesurande et, le cas échéant, ses variations dans le temps.

Il faut noter que les qualificatifs de statique et de dynamique s'appliquent au mesurande et non à la méthode de mesure.

Pour déterminer quantitativement la valeur d'une grandeur mesurable, on choisit une grandeur particulière, de même nature, qui est l'unité de mesure. La valeur d'une grandeur s'exprime alors comme le produit d'un nombre réel, appelé valeur numérique, par l'unité de mesure.

## 1.5 Méthodes de mesure

Fondée sur un principe de mesure, une méthode de mesure décrit d'une manière générique l'ensemble des opérations qui participent à la réalisation du mesurage. On lui associe un mode opératoire qui donne d'une manière spécifique les différentes opérations mises en œuvre lors de l'exécution de la méthode de mesure.

Le mode opératoire est habituellement décrit dans un document qui est quelquefois appelé lui-même « **mode opératoire** » et qui donne assez de détails pour qu'un opérateur puisse effectuer un mesurage sans avoir besoin d'autres informations.

### 1.5.1 Méthode de mesure directe

Une méthode de mesure directe est une méthode dans laquelle la valeur de la grandeur mesurée est obtenue directement.

#### Exemple

- Mesurage d'une longueur avec une règle à traits ou
- Mesurage d'un volume de liquide avec une éprouvette graduée.

Dans le cas où il est nécessaire de déterminer des grandeurs d'influence telles que la température, hygrométrie (humidité), pression, et plus généralement, des grandeurs caractéristiques des conditions ambiantes qui influent sur la valeur de la grandeur à mesurer, la méthode est encore appelée directe.

La détermination des grandeurs d'influence permet d'établir des corrections éventuelles.

### 1.5.2 Méthode de mesure indirecte

Le principe de mesure fait intervenir, dans ce cas, la liaison fonctionnelle du mesurande avec d'autres grandeurs. Ce sont ces autres grandeurs qui, directement mesurées, permettent de déterminer la grandeur soumise à mesurage. C'est la raison pour laquelle ce type de méthode est appelé **méthode de mesure indirecte**.

De très nombreuses méthodes de mesure procèdent de manière indirecte.

#### Exemple

- Mesurage d'une température avec un thermocouple par effet thermoélectrique,
- Mesurage d'une viscosité par détermination de la durée d'écoulement d'un volume de liquide à travers un capillaire,
- Mesurage de la résistivité d'un conducteur par détermination de sa résistance, de sa longueur et de sa section, etc.

### 1.5.3 Méthode de mesure selon définition

Lorsque le principe de la méthode est fondé sur la définition de l'unité correspondante, la méthode de mesure est dite **selon définition**.

#### Exemple

- Le mesurage d'une pression à l'aide d'un manomètre à piston par détermination de la force appliquée et de la surface sur laquelle cette force agit.

### 1.5.4 Méthode de mesure fondamentale

C'est une méthode de mesure dans laquelle la valeur de la grandeur à mesurer est déterminée par mesurage des grandeurs de base correspondantes.

#### Exemple

- Une méthode de mesure fondamentale de l'accélération due la pesanteur est fondée sur l'intervalle de temps mis par un corps pour parcourir une hauteur déterminée, en chute libre, dans le vide.

### 1.5.5 Méthode de mesure par comparaison

Le principe de la méthode de mesure par comparaison fait appel à une même grandeur, de valeur connue voisine de celle de la grandeur mesurée, ou à une grandeur différente mais liée fonctionnellement à la grandeur mesurée et de valeur connue.

## Exemple

- Le mesurage d'une longueur par comparaison directe avec une règle à traits.

### 1.5.6 Méthode de zéro

Dans la méthode de zéro,

On oppose, par un artifice quelconque, la valeur du mesurande à une valeur réglable d'une grandeur de même nature ou de nature différente, on s'aperçoit de la compensation exacte par un détecteur d'écart, auquel on demande essentiellement d'être sensible.

## Exemples

- Dans la pesée avec balance à bras égaux,
  - Dans la mesure de résistance avec pont de Wheatstone,
- c'est une grandeur de même nature qui permet d'assurer l'équilibre (ou indication minimale du détecteur d'écart).

On parle alors de méthode d'opposition.

## 1.6 Système international d'unité ( SI )

On distingue deux classes d'unités SI :

- Les unités de base ;
- Les unités dérivées.

### 1.6.1 Unités SI de base

Les définitions officielles de toutes les unités de base du SI sont approuvées par la Conférence générale. La première de ces définitions fut approuvée en 1889 et la plus récente en 1983. Ces définitions sont modifiées de temps à autre pour suivre l'évolution des techniques de mesure et afin de permettre une réalisation plus exacte des unités de base.

### Unité de longueur (mètre)

La définition du mètre fondée sur le prototype international en platine iridié, en vigueur depuis 1889, avait été remplacée en 1960 par une définition fondée sur la longueur d'onde d'une radiation du krypton 86, afin d'améliorer l'exactitude de la réalisation du mètre. Il a été remplacé en 1983 par cette dernière définition :

Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $1/299792458$  de seconde.

## Unité de masse (kilogramme)

Le prototype international du kilogramme, en platine iridié, est conservé au Bureau international dans les conditions fixées par la 1<sup>re</sup> CGPM en 1889 lorsqu'elle sanctionna ce prototype et déclara : Ce prototype sera considéré désormais comme unité de masse. La 3<sup>e</sup> CGPM, dans une déclaration tendant à faire cesser l'ambiguïté qui existait dans l'usage courant sur la signification du terme « poids », confirma que :

Le kilogramme est l'unité de masse ; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

## Unité de temps (seconde)

La seconde, unité de temps, fut définie à l'origine comme la fraction  $1/86400$  du jour solaire moyen. La définition exacte du « jour solaire moyen » était laissée aux astronomes. Toutefois, leurs travaux ont montré que le jour solaire moyen ne présentait pas les garanties voulues d'exactitude par suite des irrégularités de la rotation de la Terre. Pour donner plus de précision à la définition de l'unité de temps, la 11<sup>e</sup> CGPM (1960) sanctionna une définition, donnée par l'Union astronomique internationale, qui était fondée sur l'année tropique. Cependant, les recherches expérimentales avaient déjà montré qu'un étalon atomique d'intervalle de temps, fondé sur une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule, pouvait être réalisé et reproduit avec une exactitude beaucoup plus élevée. Considérant qu'une définition de haute précision de l'unité de temps du Système international était indispensable, la 13<sup>e</sup> CGPM (1967) a remplacé la définition de la seconde par la suivante :

La seconde est la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à la température de 0°K.

## Unité de courant électrique (ampère)

Des unités électriques, dites « internationales », pour le courant et pour la résistance, avaient été introduites par le Congrès international d'électricité, tenu à Chicago en 1893, et les définitions de l'ampère « international » et de l'ohm « international » furent confirmées par la Conférence internationale de Londres en 1908. Bien qu'une opinion unanime de remplacer ces unités « internationales » par des unités dites « absolues » fût déjà évidente à l'occasion de la 8<sup>e</sup> CGPM (1933), la décision formelle de supprimer ces unités « internationales » ne fut prise que par la 9<sup>e</sup> CGPM (1948) qui adopta pour l'ampère, unité de courant électrique, la définition suivante proposée par le Comité international (1946) :

**L'ampère** est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une

distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à  $2 * 10^{-7}$  newton par mètre de longueur.

## Unité de température thermodynamique (kelvin)

La définition de l'unité de température thermodynamique fut en fait donnée par la 10<sup>e</sup> CGPM (1954) qui choisit le point triple de l'eau comme point fixe fondamental en lui attribuant la température de 273,15 K par définition. La 13<sup>e</sup> CGPM (1967) adopta le nom kelvin (symbole *K*) au lieu de « **degré Kelvin** » (symbole °*K*) et définit l'unité de température thermodynamique comme suit :

Le **kelvin**, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

En raison de la manière dont les échelles de température étaient habituellement définies, il resta d'usage courant d'exprimer une température thermodynamique, symbole *T*, en fonction de sa différence par rapport à la température de référence  $T_0 = 273,15 K$ , le point de congélation de l'eau. Cette différence de température est appelée température **Celsius**, symbole *t*, et elle est définie par l'équation :

$$t = T - T_0$$

L'unité de température **Celsius** est le degré Celsius, symbole °*C*, égal à l'unité kelvin par définition. Un intervalle ou une différence de température peut s'exprimer aussi bien en kelvins qu'en degrés Celsius (13<sup>e</sup> CGPM, 1967-1968).

La valeur numérique d'une température Celsius *t* exprimée en degrés Celsius est donnée par la relation :

$$t/^{\circ}C = T/K - 273,15$$

## Unité de quantité de matière (mole)

Suivant les propositions de l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA), de l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) et de l'ISO, le Comité international donna en 1967 et confirma en 1969 une définition de la mole qui fut finalement adoptée par la 14<sup>e</sup> CGPM (1971) :

- La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12; son symbole est « **mol** ».
- Ce nombre d'entités élémentaires est appelé nombre d'Avogadro. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des

atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.

## Unité d'intensité lumineuse (candela)

Les unités d'intensité lumineuse fondées sur des étalons à flamme, qui étaient en usage dans différents pays avant 1948, furent d'abord remplacées par la luminance du radiateur de Planck à la température de congélation du platine. Cette modification avait été préparée dès 1937 par la Commission internationale de l'éclairage (CIE) et par le Comité international; la décision fut prise par le Comité international en 1946. Elle fut ratifiée en 1948 par la 9<sup>e</sup> CGPM qui adopta pour cette unité un nouveau nom international, la **candela** (symbole *cd*).

En 1979, en raison des difficultés expérimentales de la réalisation du radiateur de Planck aux températures élevées et des possibilités nouvelles offertes par la radiométrie, c'est-à-dire la mesure de la puissance des rayonnements optiques, la 16<sup>e</sup> CGPM (1979) adopta une nouvelle définition de la candela :

**La candela** est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est  $1/683$  watt par stéradian.

### — Symboles des unités de base

Les unités de base du Système international sont rassemblées dans le tableau ( 1.1 ) avec leur nom et leur symbole :

Grandeurs de base	Unité de base		Symbole de la dimension
	Nom	Symbole	
longueur	mètre	m	<i>L</i>
masse	kilogramme	kg	<i>M</i>
temps	seconde	s	<i>T</i>
courant électrique	ampère	A	<i>I</i>
Température thermodynamique	Kelvin	K	$\Theta$
quantité de matière	mole	mol	<i>N</i>
intensité lumineuse	candela	cd	<i>J</i>

TABLE 1.1 – Unités SI de base.

## 1.6.2 Unités SI dérivées

Les unités dérivées sont des unités qui peuvent être exprimées à partir des unités de base au moyen des symboles mathématiques de multiplication et de division. Certaines unités dérivées ont reçu des noms spéciaux et des symboles particuliers qui peuvent eux-mêmes être utilisés avec les symboles d'autres unités de base ou dérivées pour exprimer les unités d'autres grandeurs.

### 1.6.2.1 Unités exprimées à partir des unités de base

Le tableau (1.2) donne quelques exemples d'unités dérivées exprimées directement à partir des unités de base. Les unités dérivées sont obtenues par multiplication où division des unités de base.

Grandeur dérivée	Nom	Symbole	Expression en termes d'unités de base
superficie	mètre carré	$m^2$	
volume	mètre cube	$m^3$	
vitesse	mètre par seconde	$m/s$	
Accélération	mètre par seconde carré	$m/s^2$	
Masse volumique	kilogramme par mètre cube	$kg/m^3$	
Volume massique	mètre cube par kilogramme	$m^3/kg$	
Densité de courant	ampère par mètre carré	$A/m^2$	
Champ magnétique	ampère par mètre	$A/m$	
Capacité thermique, entropie	joule par kelvin	$J.K^{-1}$	$kg.m^2.K^{-1}.s^{-2}$
Capacité thermique molaire, entropie molaire	joule par mole-kelvin	$J.mol^{-1}K^{-1}$	$kg.m^2.mol^{-1}.K^{-1}.s^{-2}$
Chaleur massique, entropie massique	joule par kilogramme-kelvin	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	$m^2.K^{-1}s^{-2}$
Volume molaire	mètre cube par mole	$m^3/mol$	
luminance lumineuse	candela par mètre carré	$cd/m^2$	
nombre d'ondes	mètre à la puissance moins un	$m^{-1}$	
Flux de chaleur	watt par mètre carré	$W.m^{-2}$	$kg.s^{-3}$
Conductivité thermique	watt par mètre-kelvin	$W.m^{-1}K^{-1}$	$kg.m.K^{-1}.s^{-3}$
Viscosité dynamique	pascal-seconde	$Pa.s$	$kg.m^{-1}s^{-1}$

TABLE 1.2 – Exemples d'unités SI dérivées exprimées à partir des unités de base.

### 1.6.2.2 Unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers

Par souci de commodité, certaines unités dérivées, ont reçu un nom spécial et un symbole particulier.

Ces noms et symboles peuvent eux-mêmes être utilisés pour exprimer d'autres unités dérivées.

Les noms spéciaux et les symboles particuliers permettent d'exprimer, sous une forme condensée, des unités fréquemment utilisées.

**Exemple**

Nom	Nom de l'unité	Symbole	Expression utilisant d'autres unités SI	Expression en unités SI de base
pression	pascal	Pa	$\frac{N}{m^2}$	$kg.m^{-1}.s^{-2}$
Fréquence	hertz	Hz		$s^{-1}$
énergie	joule	J	$N.m$	$kg.m^2.s^{-2}$
Force	newton	N		$kg.m.s^{-2}$
Puissance	watt	W	$J/s$	$kg.m^2.s^{-3}$
Quantité d'électricité et charge électrique	coulomb	C		A.s

TABLE 1.3 – Exemple des unités ayant des noms spéciaux et des symboles particuliers.

**1.6.3 Unités des grandeurs sans dimension, grandeurs de dimension un**

Certaines grandeurs sont définies par le rapport de deux grandeurs de même nature ; elles ont une dimension qui peut être exprimée par le nombre un. L'unité associée à de telles grandeurs est nécessairement une unité dérivée cohérente avec les autres unités du SI, et comme elle résulte du rapport de deux unités SI identiques, cette unité peut aussi être exprimée par le nombre un. Ainsi l'unité SI de toutes les grandeurs dont la dimension est un produit de dimension égal à un est le nombre un.

**Exemple**

- L'indice de réfraction,
- La perméabilité relative ou le facteur de frottement.

# Chapitre 2

## Caractéristique des instruments de mesures

### 2.1 Introduction

La question que tout le monde se pose face à un résultat de mesure ou d'essai est la suivante :

quelle confiance puis-je avoir dans ce résultat ?

L'incertitude a donc pour but de « chiffrer cette confiance » ; elle traduit la dispersion des valeurs associées au mesurande. Elle doit être établie de manière raisonnable et s'exprime sous forme d'un écart-type. Le but ultime de cette incertitude est de fixer un intervalle que l'on aimerait le plus étroit possible et dont on espère que la valeur vraie du mesurande y soit incluse. D'une façon générale la métrologie a pour but de définir la valeur de grandeurs physiques avec un degré d'incertitude aussi faible que nécessaire.

Exemple :

Mesure d'une pièce cotée  $100 \pm 0,1$  avec un pied à coulisse.

Un calcul d'incertitude a donné  $\pm 0,04$  à 95%  $\Rightarrow$  Si la mesure est 100,08, il y a 95% de chance que la pièce ait une dimension comprise entre 100,04 et 100,12. En fonction du risque choisi, la pièce sera déclarée conforme avec risque ou sera rejetée.

Si l'on considère la mesure d'une grandeur réelle  $X$ , le résultat brut de cette mesure  $X_i$ , la valeur fournie par l'appareillage utilisé, sera toujours entachée d'une erreur  $e$ . Pour se convaincre de la validité de cette affirmation, il suffirait de demander à  $n$  personnes de mesurer de façon totalement indépendante une grandeur réelle  $X$  donnée, on constaterait alors que l'on obtiendrait  $n$  résultats  $X_i$  différents (Fig 2.1), ce qui signifie qu'aux moins  $n-1$  personnes ont commis une erreur en effectuant leur mesure.

Les raisons de ces erreurs proviennent essentiellement de l'imperfection des processus mis en oeuvre pour réaliser les mesures.

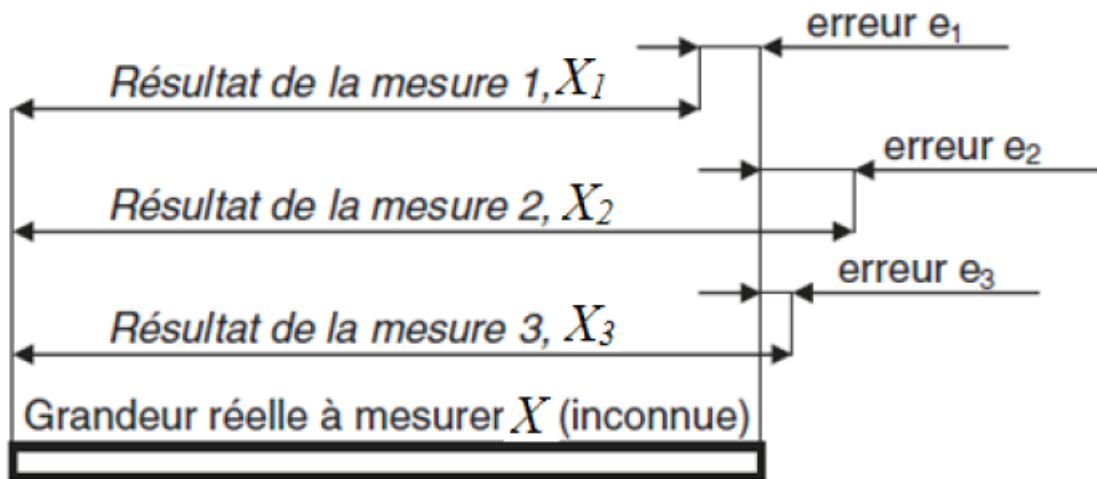


FIGURE 2.1 – Représentation des erreurs de mesure.

## 2.2 Capteur

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs ...), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, ...). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

### 2.2.1 Définition

Un capteur est un composant, qui élabore à partir d'une grandeur physique une autre grandeur de type électrique. La Fig (2.1) nous permet d'avoir un schéma fonctionnel d'un capteur.



FIGURE 2.2 – Schéma fonctionnel d'un capteur.

Où ;

$m$ , est appelé "mesurande" qui est la quantité qu'on souhaite mesurer. Elle peut être déplacement, force, température ... .

$s$ , est la grandeur de sortie ou réponse du capteur. Elle est de nature électrique qui peut être sous forme de tension, impédance, ...

La relation qui lie  $s$  à  $m$ , est :

$$s = f(m) \quad (2.1)$$

Cette relation dépend :

- Des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur ;
- De la géométrie et de la dimension du capteur ;
- De l'environnement et du mode d'emploi du capteur.

## 2.2.2 Caractéristiques d'un capteur

On peut caractériser les capteurs selon :

- La grandeur mesurée (mesurande), on parle alors de capteurs de positions, vitesses, forces, ...
- Le caractère de l'information délivré, on parle de capteurs analogique, numérique, logique ( tout ou rien).

## 2.2.3 Catégories de capteurs

Si, on s'intéresse au phénomène physique mis en jeu dans un capteur, on peut les classer en deux catégories, actif et passif.

### 2.2.3.1 Capteur actif

la réponse en sa sortie d'un capteur actif peut être un courant, une tension ou une charge.

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion de l'énergie de la grandeur à mesurer en énergie électrique.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeurs de sortie
Force Pression Accélération	Piézoélectrique	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
position (aimant )	Effet de Hall	Tension
Flux de rayonnement optique	Effet photo électromagnétique	Tension
Température	Thermoélectrique	Tension

TABLE 2.1 – Quelques grandeurs de sortie .

voici les effets physiques les plus classiques[3] :

- **Effet piézoélectrique** : l'application d'une contrainte mécanique sur certains matériaux (le quartz est le plus connu) donne naissance à des charges électriques qui apparaissent à

la surface du matériau ; ce principe permet de réaliser des capteurs de force, de pression ou d'accélération.

- **L'effet d'induction électromagnétique** : lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique fixe, une force électromotrice apparaît à ses bornes ; il est ainsi possible de mesurer des vitesses.

- **Effet Hall** : lorsqu'un conducteur ou un semi-conducteur traversé par un courant électrique est soumis à une induction magnétique, une tension électrique apparaît à ses bornes (position).

- **L'effet magnétohydrodynamique** : un liquide contenant des charges libres et soumis à un champ d'induction magnétique, qui s'écoule dans un isolant, génère une tension électrique proportionnelle au débit.

- **Effet photo-électrique** : un matériau soumis à un rayonnement lumineux libère des charges électriques qui induisent un courant électrique (flux optique).

- **L'effet thermoélectrique** : un circuit constitué de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des températures différentes  $T_1$  et  $T_2$ , fait apparaître aux bornes de ce circuit une tension (force électromotrice) liée à la différence de température ( $T_1-T_2$ ).

### 2.2.3.2 Capteur passif

Lorsque le capteur se présente vu de sa sortie comme une impédance, il est dit passif, la sortie est alors une résistance, une self ou une capacité. Ce capteur nécessite une source d'énergie électrique pour que l'on puisse lire la sortie, le circuit dans lequel est mit, est appelé "conditionneur".

Pour les capteurs passifs, deux principes physiques sont possibles.

Le premier consiste à faire varier les caractéristiques dimensionnelles du capteur, soit en déplaçant un élément mobile (noyau de ferrite dans une bobine, ...), soit en déformant le capteur (jauge de contraintes, ...). Ces capteurs permettent donc de mesurer des grandeurs telles que le déplacement, la position, l'accélération, la pression, ...

Le second principe repose sur une modification des propriétés électromagnétiques du matériau qui constitue le capteur :

- Résistivité (c'est la capacité d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique).

- Permittivité (elle décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué).

- Perméabilité (caractérise la faculté d'un matériau à modifier un champ magnétique).

Avec ces capteurs, il est possible d'effectuer des mesures d'humidité, d'intensité lumineuse, de position, de niveau, de déformation, de contrainte mécanique ou de température.

### 2.2.4 Rôle du capteur

Parmi les informations de toutes natures issues de notre environnement, on distingue les grandeurs physiques associées à des évènements climatiques, géométriques ou encore lumineux ou temporels. Le rôle du capteur est de rendre exploitable ces différentes grandeurs physiques en vue de leur traitement ultérieur.

- Mesure de présence : indique la présence d'un "objet" à proximité immédiate.
- Mesure de position, de déplacement ou de niveau : indique la position courante d'un objet animé d'un mouvement de rotation ou de translation.
- Mesure de vitesse : indique la vitesse linéaire ou angulaire d'un "objet".
- Mesure d'accélération, de vibrations ou de chocs.
- Mesure de débit, de force, de couples, de pressions.
- Mesure de température, d'humidité.

### 2.2.5 Étalonnage d'un capteur

Pour les capteurs et instruments de mesure, l'étalonnage est un réglage ou une caractérisation de la réponse de l'appareil. Pour cela, généralement on utilise des grandeurs de référence ou étalons. L'étalonnage d'un instrument consiste à appliquer une valeur connue en entrée du système de mesure afin de vérifier que la sortie correspond bien à la valeur attendue. En entrant différentes valeurs connues on peut obtenir en sortie la courbe d'étalonnage

$$y = f(x)$$

de l'instrument qui permet de relier la valeur lue en sortie notée  $y$  à la vraie valeur de la grandeur physique à mesurer notée  $x$  (voir figure2.3).

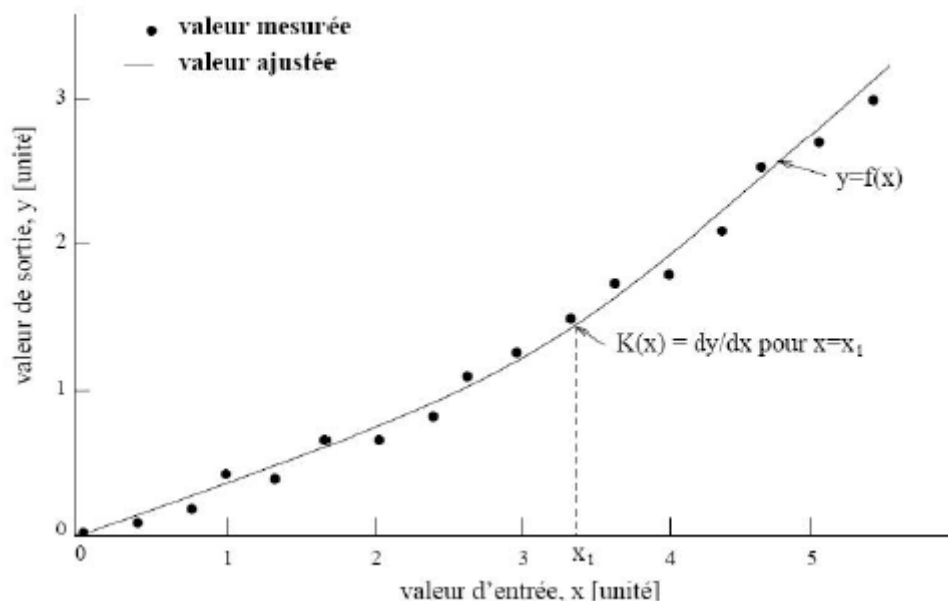


FIGURE 2.3 – courbe d'étalonnage d'un capteur.

C'est particulièrement utile lorsque la réponse de l'instrument est non linéaire.

La méthode générale consiste à utiliser l'appareil de mesure sur un étalon, et à vérifier que la mesure produite correspond bien à la valeur attendue ; si ce n'est pas le cas, on corrige le réglage de l'appareil. Par exemple, on pèse une masse étalon, et on corrige la position de l'aiguille pour que celle-ci indique la valeur correcte. C'est l'étalonnage dit à un point.

Cependant, cela ne suffit pas toujours. L'appareil peut présenter :

- Une dérive systématique : il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une quantité fixe.
- Une dérive de sensibilité : il indique systématiquement une valeur supérieure ou inférieure d'une proportion (d'un pourcentage) donné.

Chaque mesure étant entachée d'erreur, y compris la mesure des étalons, on effectue en général plusieurs mesure du même étalon, ou bien on utilise plus d'étalons que nécessaire et l'on détermine la courbe d'étalonnage par régression (méthode des moindres carrés).

L'étalonnage est généralement effectué par le fabricant de l'appareil de mesure. De manière générale, un appareil de mesure transforme un paramètre physique en une donnée analogique (lecture sur un cadran, tracé d'un feutre sur un papier) ou un signal électrique, qui peut ensuite être converti en données numériques.

De plus en plus sur les appareils modernes la correction suite à l'étalonnage n'est pas réglée sur l'instrument mais est fournie dans un fichier numérique. Cette correction est de fait effectuée numériquement par un microcontrôleur ou par l'ordinateur relié à l'instrument.

## 2.3 Caractéristique des instruments de mesures

### 2.3.1 Incertitude

L'incertitude de mesure est un paramètre, associée au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

### 2.3.2 Fidélité, Justesse ET Précision[4]

#### 2.3.2.1 La fidélité :

elle caractérise un appareil de mesure dont les erreurs aléatoires sont faibles, ce qui se traduit par des résultats de mesure groupés autour de leur valeur moyenne. L'écart type, dont l'importance reflète la dispersion des résultats est souvent considéré comme l'erreur de fidélité et en permet une appréciation quantitative.

#### 2.3.2.2 La justesse :

elle caractérise un appareil de mesure dont les erreurs systématiques sont faibles. La valeur la plus probable du mesurande déterminée par un tel appareil de mesure est très proche de la vraie valeur.

#### 2.3.2.3 La précision :

elle caractérise un appareil de mesure qui est tel que chaque mesure soit très proche de la valeur vraie du mesurande, un appareil précis est donc à la fois juste et fidèle. La précision peut être spécifiée numériquement comme l'intervalle autour de la valeur mesurée, à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vraie.

$$Fidélité + Justesse \Leftrightarrow Précision$$

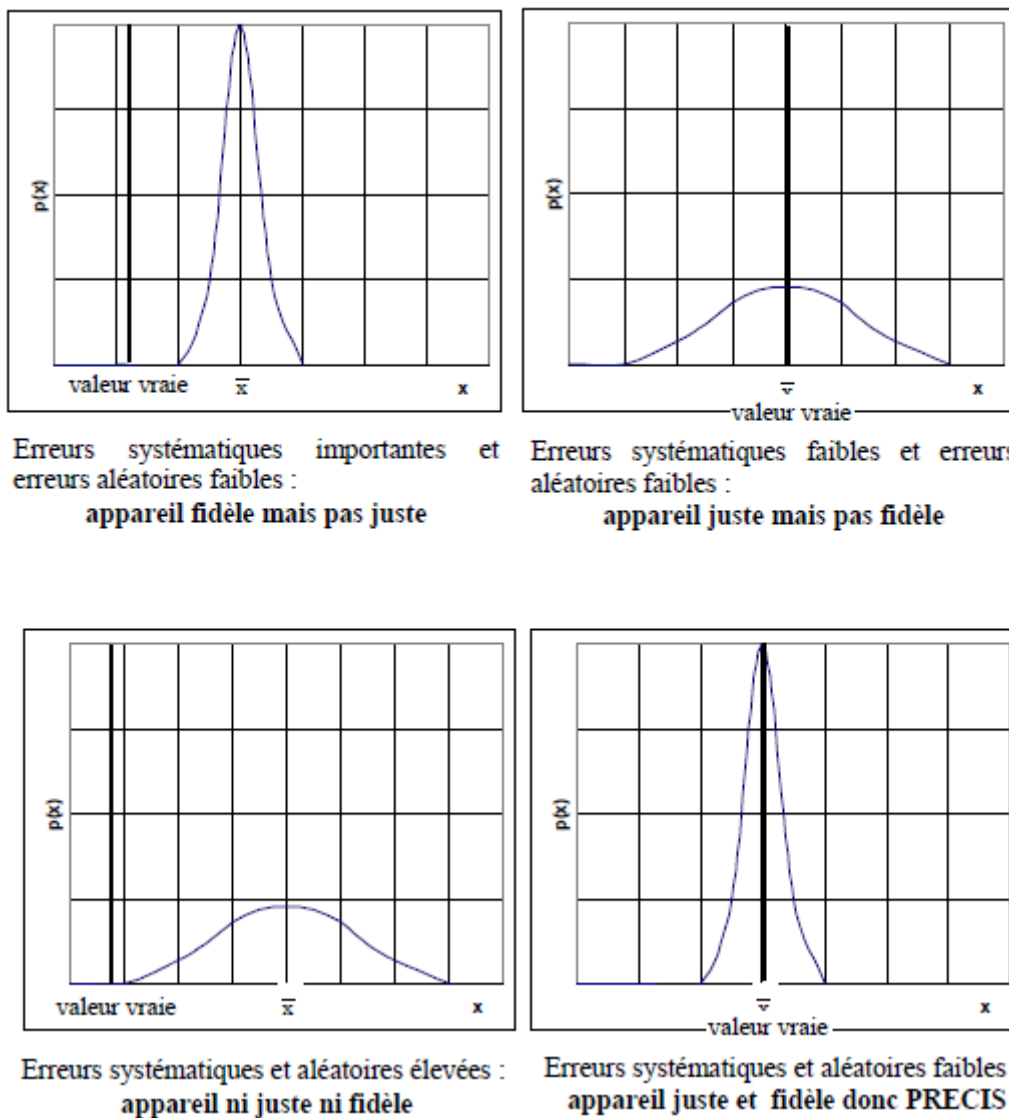


FIGURE 2.4 – courbe de precision.

C'est la différence entre la valeur mesurée et la vraie valeur.

Elle peut être définie par rapport à la valeur vraie ou par rapport à la pleine échelle[4], et elle s'exprime en % :

$$\text{précision}(\text{par rapport à la valeur vraie}) = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur vraie}}{\text{valeur vraie}} * 100$$

$$\text{précision}(\text{par rapport à la pleine échelle}) = \frac{\text{valeur mesurée} - \text{valeur vraie}}{\text{pleine échelle}} * 100$$

### 2.3.3 Répétabilité

Une mesure est répétable lorsque l'on vérifie la proximité de l'accord entre les résultats des mesures successives du même mesurande, effectuées dans les mêmes conditions de mesure :

- même procédé de mesure,
- même observateur,
- même instrument de mesure, utilisé dans les mêmes conditions
- même emplacement,
- répétition sur une courte période de temps.

La dispersion des résultats permet de quantifier la répétabilité.

### 2.3.4 Reproductibilité

Une mesure est reproductible lorsque l'on vérifie la proximité de l'accord entre les résultats des mesures du même mesurande, effectuées dans des conditions de mesure différentes ; à définir au cas par cas.

### 2.3.5 Sensibilité

Connaissant la courbe d'étalonnage, on peut définir la sensibilité de l'instrument au voisinage d'une valeur d'entrée  $x_i$  par la relation :

$$K(x_i) = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (2.2)$$

Cette grandeur permet de mesurer l'influence d'un changement de la valeur d'entrée sur la valeur de sortie. Un bon instrument devra avoir une assez grande sensibilité. Lorsque la sensibilité est constante la réponse de l'instrument est linéaire. Ce type d'instrument sera particulièrement recherché en raison de sa facilité d'utilisation. La sensibilité devra être aussi indépendante que possible de la fréquence de variation de la grandeur mesurée, du temps et d'autres grandeurs d'influence.

### 2.3.6 Résolution

La résolution d'un appareil de mesure est la plus faible variation du mesurande qui provoque une variation de la grandeur de sortie du capteur considéré, elle représente la plus petite variation de la grandeur d'entrée que le système de mesure sera capable d'identifier[4].

Lorsque l'appareil de mesure est un appareil numérique, la résolution est définie par le rapport entre l'étendue de la mesure et le nombre de points de mesure.

### 2.3.7 Étendue de mesure

Correspond à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure. Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée pleine échelle.

# Chapitre 3

## Chaines de mesure[5]

### 3.1 Introduction

Mesurer, consiste à faire correspondre une valeur à une grandeur physique. Pour cela, il est nécessaire de mettre en œuvre toute une chaîne mécanique, optique ou électronique qui, partant d'un capteur transforme la grandeur physique en un signal qui doit être traité (filtré, amplifié,...) avant de piloter une unité d'affichage. Cette chaîne est appelée chaîne de mesure.

La chaîne de mesure est constituée d'un ensemble de dispositifs (y compris le capteur), permettant de déterminer, de la manière la plus précise que possible, la valeur du mesurande considéré.

Parfois, pour des applications spécifiques, le métrologue est restreint de réaliser lui-même sa chaîne de mesure car il n'existe pas sur le marché de dispositif complet répondant à son besoin.

De plus, le progrès de l'électronique et de l'informatique ont considérablement contribué au développement des chaînes de mesure[6]. Il est maintenant possible de contrôler simultanément de nombreux paramètres dans des conditions d'environnement extrêmement difficiles. C'est pourquoi, la plupart des outils de production intègrent au moins une chaîne de mesure. En effet, en production, une chaîne de mesure peut contribuer :

- au contrôle de la qualité,
- à la surveillance du bon fonctionnement du processus,
- à l'optimisation de ce fonctionnement et à l'amélioration de sa sécurité,
- à la réalisation de régulations ou d'asservissements.

Les chaînes de mesure sont donc omniprésentes dans l'industrie et leur principe doit être connu des utilisateurs ainsi que bien évidemment des métrologues.

## 3.2 Principe d'une chaîne de mesure

La structure de base d'une chaîne de mesure comprend au minimum trois étages (Fig.3.1) :

- Un **capteur** sensible aux variations d'une grandeur physique et qui, à partir de ces variations, délivre un signal.
- Un **conditionneur de signaux** dont le rôle principal est l'amplification du signal délivré par le capteur pour lui donner un niveau compatible avec l'unité de visualisation ou d'utilisation ; cet étage peut parfois intégrer un filtre qui réduit les perturbations présentes sur le signal.
- Une **unité de visualisation et/ou d'utilisation** qui permet de lire la valeur de la grandeur et/ou de l'exploiter dans le cas d'un asservissement, par exemple.

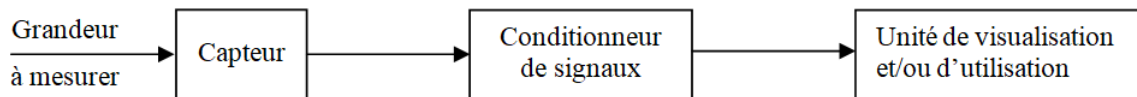


FIGURE 3.1 – Structure de base d'une chaîne de mesure.

Cette structure de base se rencontre dans toutes les chaînes de mesure et ce, quelles que soient leur complexité et leurs natures. Par exemple, la chaîne de mesure d'un manomètre à membrane (Fig.3.2) est une chaîne qui peut être entièrement mécanique, car :

- le capteur est constitué par la membrane qui transforme la pression en un déplacement,
- le bras de levier est actionné par le capteur et entraîne l'aiguille par l'intermédiaire d'une crémaillère ; il assure la fonction d'amplification,
- l'unité de visualisation comprend le cadran et l'aiguille qui indiquent la valeur.

Dans les chaînes les plus compliquées, c'est la complexité de chacun des étages et le nombre de fonctions qui sont modifiées ; ce n'est pas le nombre d'étages. Seules les chaînes utilisées dans les asservissements ou les processus de contrôle possèdent plusieurs étages.

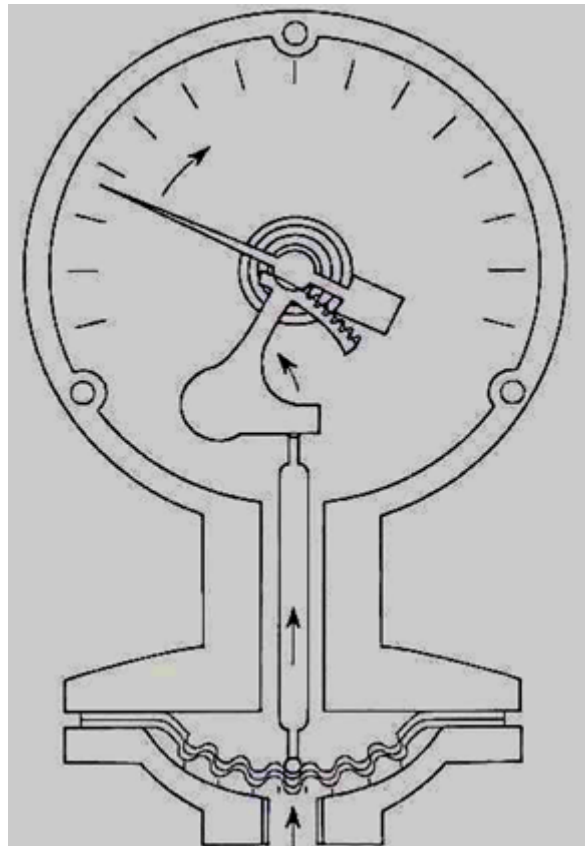


FIGURE 3.2 – Chaîne de mesure d'un manomètre mécanique.

De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques.

## 3.3 Chaîne de mesure analogique

### 3.3.1 Principe

Dans une chaîne de mesure analogique, le signal véhiculé est lié par une loi continue à la grandeur physique mesurée. Généralement, l'amplitude du signal suit les variations de l'amplitude de cette grandeur.

La structure de base d'une chaîne analogique comprend toujours les trois étages précités : le capteur, le conditionneur de signaux et l'unité de visualisation. Cependant, le conditionneur de signaux assure trois fonctions (Fig. 3.3) :

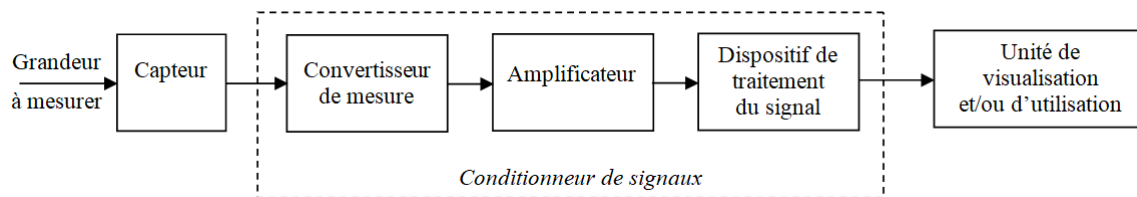


FIGURE 3.3 – Structure d'une chaîne de mesure analogique simple .

Lorsque la chaîne de mesure sert à piloter ou à asservir un dispositif, le signal disponible à la sortie de la chaîne directe est comparé à un signal de référence, image de la grandeur physique désirée. Le détecteur qui effectue cette comparaison délivre un signal d'erreur qui est lui-même amplifié ou transformé afin de commander le dispositif étudié (Fig. 3.4).

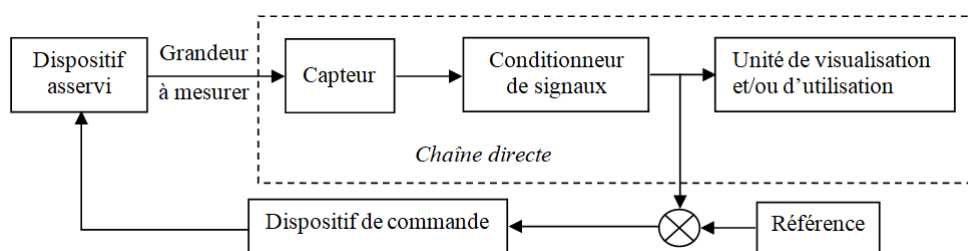


FIGURE 3.4 – Structure complète d'une chaîne de mesure analogique simple .

### 3.3.2 Capteurs

Le premier maillon de la chaîne de mesure est le capteur. Son choix est conditionné par la grandeur à mesurer.

### 3.3.3 Convertisseurs de mesure

#### 3.3.3.1 Convertisseurs de mesure pour capteurs passifs

Pour les montages à capteurs passifs, la conversion consiste à transformer la variation d'impédance du capteur, soit en variation d'amplitude du signal, soit en variation de fréquence.

Dans le premier cas, cet étage est constitué de circuits électroniques classiques : montages potentiométriques ou montage en pont, ce dernier présentant de nombreux avantages (bonne sensibilité, faible bruit, ...).

Le montage potentiométrique est l'association en série d'une source, du capteur et d'une impédance qui peut être ou non du même type (Fig. 3.5.a). C'est un montage simple, dont l'inconvénient est sa sensibilité aux parasites.

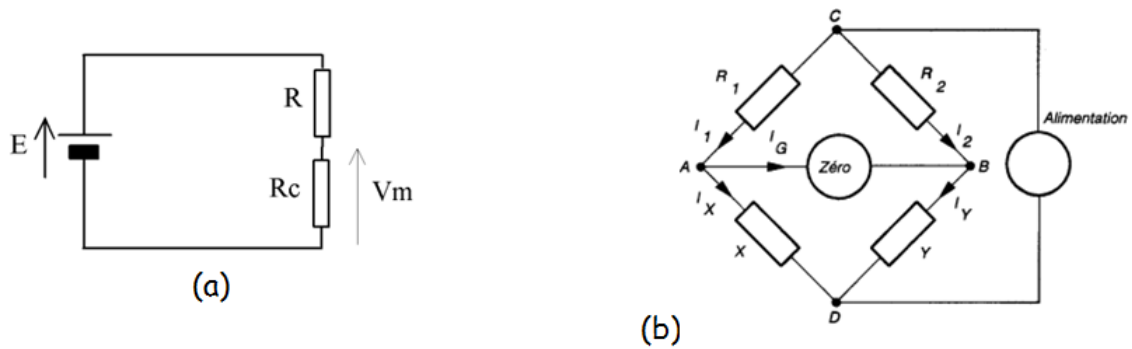


FIGURE 3.5 – Montage potentiométrique (a), Montage en pont(b) .

Le montage en pont dont l'équilibre permet la détermination de l'impédance du capteur et/ou dont le déséquilibre est une mesure de la variation de cette impédance (Fig. 3.5.b). C'est donc un double potentiomètre. Le caractère différentiel de la mesure permet de réduire de façon importante l'influence des parasites.

Lorsque avec ces conditionneurs, on utilise une source sinusoïdale, le signal de mesure résulte d'une modulation d'amplitude de la source par les variations de l'impédance du capteur (donc de mesurande). Pour retrouver l'information, il faut alors démoduler le signal de mesure (fig. 3.6).

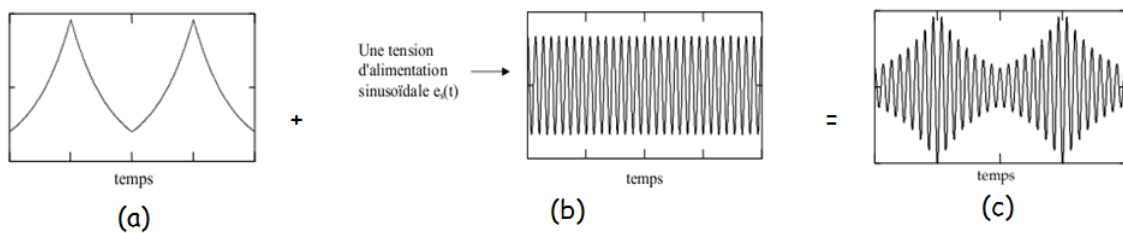


FIGURE 3.6 – variation du mesurande (a), tension d'alimentation (b), tension de mesure (c)..

Dans le second cas, le capteur est monté dans un oscillateur qui délivre un signal sinusoïdal dont la fréquence est fonction de l'impédance du capteur. Les oscillateurs utilisés dans ce cas, peuvent être de type sinusoïdal et délivrent un signal dont la fréquence est modulée par l'information, ce qui leur assure une bonne protection contre les parasites.

### 3.3.3.2 Convertisseurs de mesure pour capteurs actifs

Les capteurs actifs délivrant un signal électrique, les principales fonctions des convertisseurs de mesure qui leur sont associés sont :

- l'isolement entre le capteur et l'amplificateur afin de minimiser la réaction de la chaîne de mesure sur le capteur ;
- l'adaptation d'impédance qui permet d'optimiser la puissance transmise ;
- la pré-amplification du signal pour améliorer le rapport signal/bruit.

### 3.3.4 Amplificateurs

Différents types d'amplificateurs existent selon le besoin et la nature du signal disponible à la sortie du convertisseur de mesure.

L'amplificateur d'instrumentation est un composant particulièrement bien adapté pour l'extraction d'un signal d'amplitude faible par rapport à une valeur moyenne qui peut être élevée. De plus, il présente un gain très stable et il assure l'isolement entre la source et le reste de la chaîne de mesure.

Pour les signaux de très faible amplitude, des phénomènes de dérive apparaissent à l'intérieur des dispositifs électroniques. Pour s'affranchir de cette dérive, on utilise des amplificateurs découpage : la tension d'entrée continue est convertie en une tension alternative, qui est amplifiée, puis reconvertie en une tension continue proportionnelle au signal d'entrée.

## 3.4 Chaîne de mesure numérique

### 3.4.1 Principe

Dans son concept, une chaîne de mesure numérique est relativement différente d'une chaîne de mesure analogique. La chaîne de base comprend toujours le capteur et le conditionneur de signaux mais à la sortie de ce conditionneur, un échantillonneur-bloqueur assure l'échantillonnage du signal et bloque le niveau de l'échantillon durant la durée nécessaire à la conversion analogique-numérique (fig. 3.7).

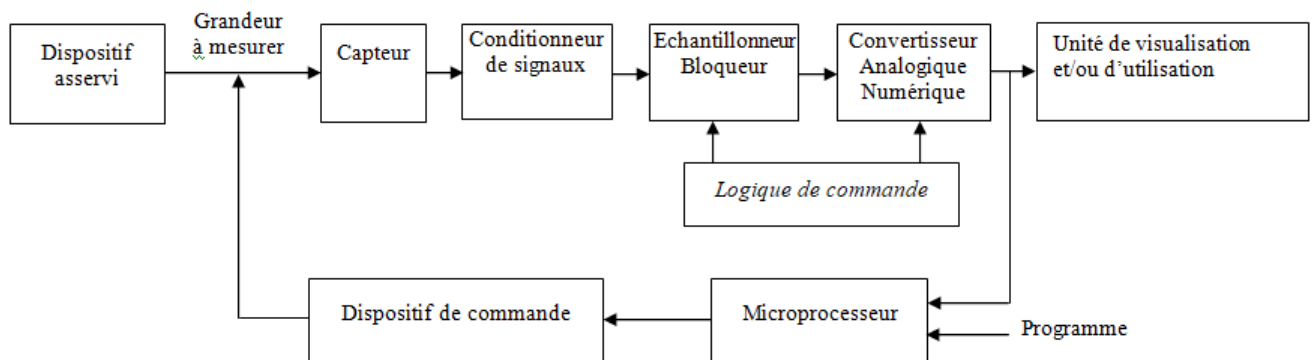


FIGURE 3.7 – Structure d'une chaîne de mesure numérique

Si la chaîne de mesure est intégrée dans un dispositif de commande de système, le signal numérique est alors directement transmis à un microprocesseur qui construit le signal d'erreur utilisé pour piloter le dispositif de commande.

### 3.4.2 Échantillonneur-bloqueur

L'échantillonneur-bloqueur est un dispositif qui permet d'échantillonner un signal à des instants régulièrement espacés. Il consiste à prélever des valeurs instantanées et de les maintenir à l'entrée du convertisseur analogique-numérique (CAN), au moins pendant un temps nécessaire à une conversion (fig. 3.8).

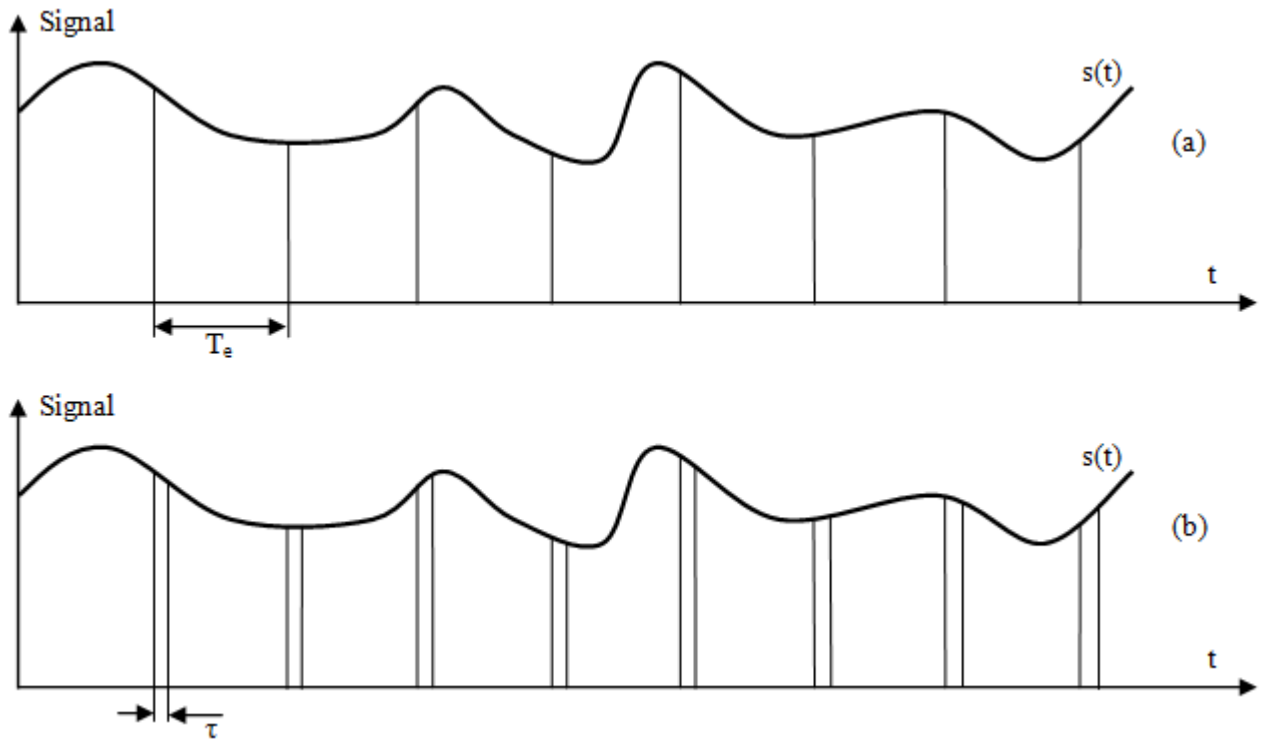


FIGURE 3.8 – Principe d'un échantillonneur-bloqueur : l'échantillonnage est effectué à instant réguliers  $T_e$  (a) puis est bloqué durant un temps  $\tau$  (b).

## 3.5 Acquisition de données

Toujours grâce à l'évolution de l'électronique numérique et de l'informatique les chaînes de mesure numériques se sont profondément modifiées et leur complexité est sans cesse croissante. C'est ainsi qu'après numérisation, le signal est généralement traité par un ordinateur ou un microprocesseur[7]. De même, pour suivre un processus complet, il est de plus en plus nécessaire de mesurer simultanément de nombreux paramètres, ce qui impose de mettre en œuvre des dispositifs d'acquisition de données.

Lorsqu'il est nécessaire de faire l'acquisition de plusieurs grandeurs, les signaux de mesure sont multiplexés afin d'être véhiculés sur une seule ligne, ce qui engendre une meilleure qualité (diminution de nombre de contacts) et une économie importante au niveau du câblage (fig. 3.9).

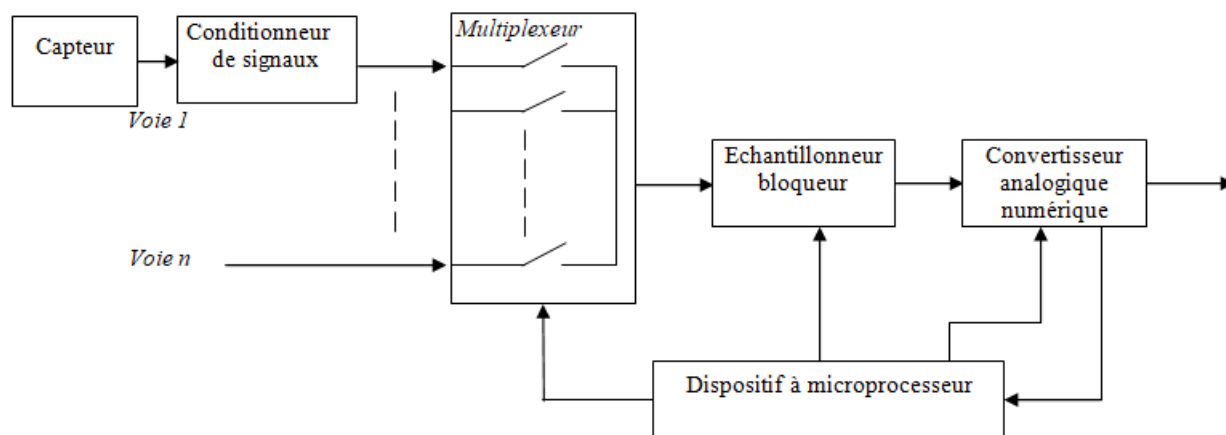


FIGURE 3.9 – Schéma synoptique d’une chaîne de mesure numérique à  $n$  entrées avec multiplexage analogique à la sortie du conditionneur de signaux.

## 3.6 Facteurs d’influence

Aussi bien le capteur que l’électronique qui lui associée présentent une sensibilité à différentes perturbations qui ont pour cause, soit des phénomènes physiques externes, soit des sources de bruits internes. Les principales grandeurs d’influence sont :

- La température qui modifie les propriétés du capteur et les caractéristiques de l’électronique.

- L’humidité qui a une très forte influence sur les capteurs et qui peut engendrer une dérive.

- L’effet thermoélectrique (tension générée au niveau de la jonction entre deux fils de nature différente) qui perturbe les dispositifs à faible niveau de sortie.

- Le bruit thermique : c’est un bruit actif généré par les composants électroniques qui devient prépondérant dans les mesures à haute température ou avec des signaux de faible niveau.

- Les interférences électromagnétiques qui peuvent perturber complètement le fonctionnement d’une chaîne de mesure.

## 3.7 Traitement du signal

### 3.7.1 Définition d’un signal

Un signal est la représentation d’une mesure d’un phénomène physique. Il est donc porteur d’une information ou d’un message.

Mathématiquement, un signal est décrit par une fonction à une ou plusieurs variables. Pour définir cette variable, il est souvent nécessaire de disposer d’un appareil de mesure adéquat. C’est ainsi qu’on aura besoin d’un thermomètre pour donner la température

qu'il fait puisque l'homme n'est pas capable de la faire : il dira qu'il fait froid, frais ou chaud sans pouvoir dire précisément, s'il fait  $-10^\circ$ ,  $15^\circ$  ou  $35^\circ$ .

Communément, le signal est une fonction à une variable qui est le temps. Si l'on considère un signal comme la température d'une salle, il peut être fonction de différentes sortes de variables :

- le temps si l'on place un système permettant d'enregistrer l'indication d'un thermomètre à certains instants de la journée.

- La distance si l'on dispose un certain nombre de thermomètres de même type sur une ligne. A l'instant  $t_0$ , la température donnée par le thermomètre situé à la distance  $d$  d'une origine choisie au préalable est un signal qui est une fonction de la variable spatiale qui est la distance  $d$ .

- En disposant ces thermomètres sur une grille (carrée), on peut construire, à l'instant  $t_0$ , un signal à deux variables  $(d_1, d_2)$  où  $d_1$  et  $d_2$  sont les distances du thermomètre à l'origine suivant les deux directions définies.

- Au lieu de fixer l'instant de mesure  $t_0$  comme dans le cas précédent, on peut envisager d'enregistrer la température de l'ensemble des thermomètres à plusieurs instants de la journée. On obtient ainsi un signal spatio-temporel dépendant de l'espace et du temps : le signal devient alors une fonction des variables  $((d_1, d_2, t))$ .

### 3.7.2 Traitement du signal

Traiter un signal c'est mettre en œuvre les techniques les mieux appropriées pour en extraire le maximum d'information, le plus souvent en présence de bruits perturbateurs. Les méthodes de traitement du signal se sont développées depuis une trentaine d'années, leur besoin se faisant sentir dans de nombreux domaines ; d'abord, bien sûr, lorsque l'on veut mettre en évidence un signal de faible amplitude sur lequel on possède une quantité plus ou moins grande de renseignements, mais qui est complètement masqué par un bruit parasite dû à l'environnement ou aux instruments de mesure eux-mêmes.

Le traitement du signal peut aller d'une fonction simple telle que le filtrage à une fonction très complexe comme la transformée de fourrier. Ces fonctions sont très généralement réalisées à l'aide d'ordinateurs et de logiciels spécifiques. Malheureusement, cette technique ne permet pas d'effectuer le calcul en temps réel car l'ordinateur n'est pas conçu pour effectuer simultanément l'acquisition de données et du calcul.

Pour remédier à ces contraintes, l'industrie de l'électronique a développé des micro-processeurs spécialement conçus pour le traitement numérique du signal et connus sous le nom de DSP (Digital Signal Processor).

### 3.8 Instrumentation associée a l'ordinateur personnel

L'association de l'ensemble des techniques décrites ci-dessus permet de mettre en œuvre des systèmes de mesure intégrés et pilotés directement à partir d'ordinateurs personnels de type PC. Les données sont transmises à l'ordinateur via une carte d'acquisition de données (Fig. 3.10).

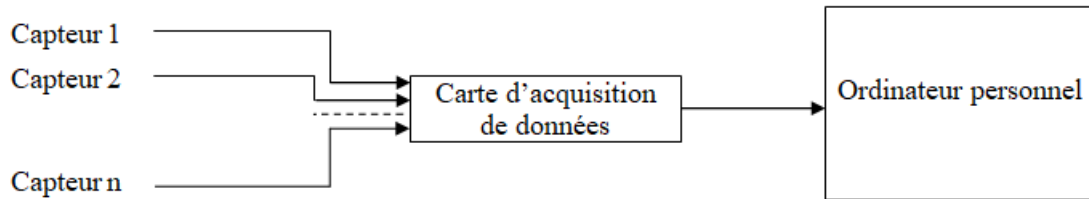


FIGURE 3.10 – Dans l'instrumentation moderne, les données mesurées sont transmises à un ordinateur personnel par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition.

De plus, pour effectuer les calculs en temps réel, un coprocesseur de calcul de type DSP est associé, soit directement à la carte d'acquisition, soit à l'ordinateur.

Au final, une chaîne de mesure doit pouvoir assurer les fonctions suivantes (Fig. 3.11) :

- Extraction de l'information → Capteur,
- Traitement analogique du signal → Amplification, filtrage, ...
- Sélection d'un signal parmi plusieurs → Multiplexage,
- Conversion du signal sous forme numérique → Échantillonnage, numérisation,
- Analyse et exploitation des données → PC.

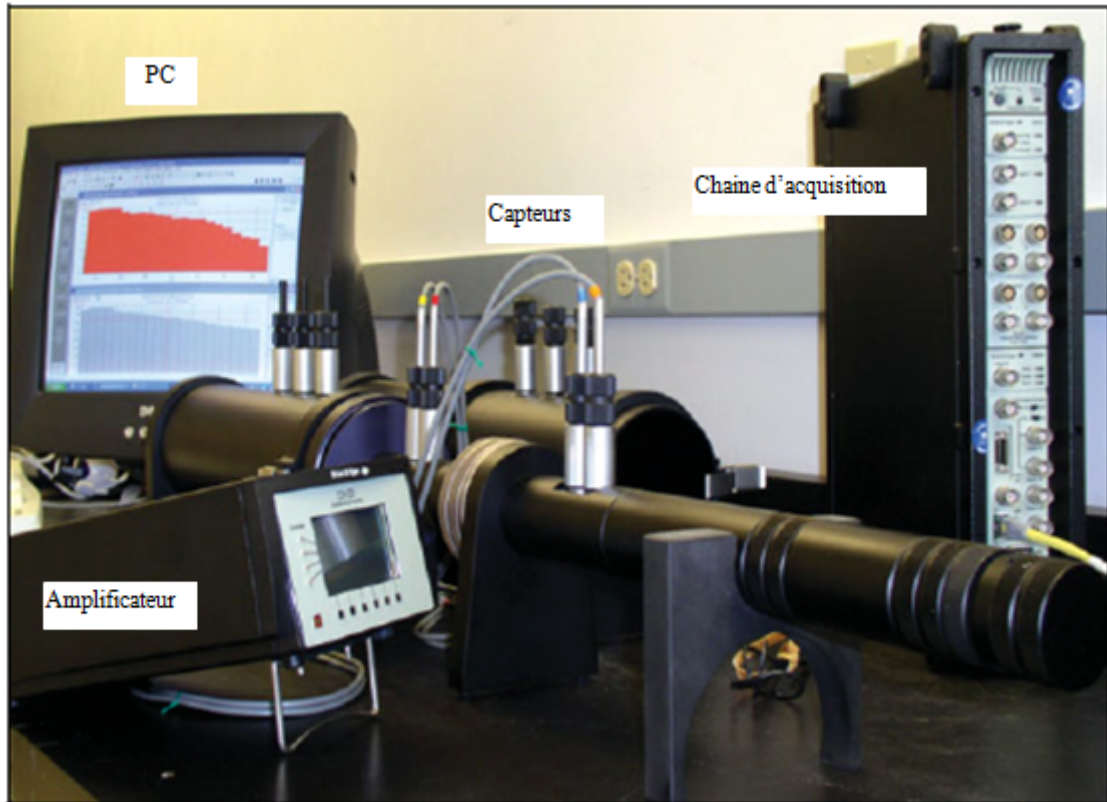


FIGURE 3.11 – Exemple pratique d'une chaine de mesure numérique.

# Chapitre 4

## Incertitude

### 4.1 Position de problème

L'objectif d'un mesurage est d'obtenir la valeur  $y$  d'une grandeur  $Y$  appelée mesurande. Malheureusement, des erreurs de mesures qui ont pour origine la grandeur elle-même, le système de mesure et la technique d'observation engendrent un écart entre le résultat du mesurage et la valeur vraie de la grandeur, ce qui rend cette dernière inaccessible au métrologue.

Bien évidemment, pour que le résultat annoncé soit aussi proche que possible de la valeur du mesurande, le métrologue doit tout mettre en œuvre pour diminuer les erreurs. Néanmoins, une incertitude  $\pm U$  sur la valeur annoncée subsiste nécessairement. Cette incertitude définit un intervalle  $[y-U, y+U]$  qui représente les valeurs pouvant raisonnablement être attribuées au mesurande  $Y$ .

Il est de devoir du métrologue d'évaluer cette incertitude afin de s'assurer qu'elle est compatible avec la tolérance demandée.

### 4.2 Traitement des erreurs de mesure

Par définition, l'erreur de mesure est l'écart entre le résultat du mesurage et la valeur du mesurande, ce qui se modélise de la façon suivante :

$$\text{Valeur annoncé} = \text{valeur du mesurande} + \text{erreur}$$

Il est toujours possible de décomposer les erreurs de mesure en deux familles[8] selon leur nature :

- l'erreur aléatoire, qui fluctue de manière imprévisible lorsqu'un mesurage est répété dans des conditions maintenues aussi constante que possible ;
- l'erreur systématique, qui est pratiquement constante ou qui évolue lentement et régulièrement en fonction des conditions expérimentales ; par exemple, le décalage du

zéro sur un appareil à aiguille qui n'a pas été calibré introduit une erreur systématique.

Cette décomposition de l'erreur permet alors d'écrire :

Valeur annoncée = valeur du mesurande + erreur aléatoire + erreur systématique

Ceci met en évidence l'importance de diminuer les erreurs afin d'obtenir un résultat aussi proche que possible de la valeur de mesurande. Dans cette opération, les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques sont traitées différemment.

### 4.2.1 Diminution des erreurs aléatoires

Pour diminuer les erreurs aléatoires, il suffit lorsque c'est possible de répéter la mesure. En effet, les  $n$  valeurs numériques  $y_i$  obtenues en répétant  $n$  fois la mesure de la grandeur  $Y$  constituent un échantillon aléatoire de taille  $n$  extrait d'une population.

La valeur annoncée est alors la moyenne arithmétique des résultats :

$$y = \bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

et l'écart-type sur cette valeur moyenne est :

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

ou  $s$  est l'écart-type estimé de la population :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n - 1}}$$

Cette réduction des erreurs aléatoires repose sur l'indépendance des différents résultats de mesurage. Pour cela, chaque opération de mesurage doit inclure le démontage et le remontage du produit à mesurer.

### 4.2.2 Correction des erreurs systématique

La seule méthode disponible pour réduire une erreur systématique consiste à appliquer une correction sur le résultat du mesurage. Cette opération est beaucoup plus difficile que la précédente car elle nécessite une connaissance approfondie du processus de mesure afin d'identifier un maximum de causes d'erreurs puis d'estimer les corrections qui permettent de les compenser.

En effet, il existe une multitude de sources d'erreurs systématiques dont les principales sont :

- l'effet des grandeurs d'influence (température en métrologie dimensionnelle, ...),
- l'erreur de justesse des instruments utilisés,
- la position de l'objet mesuré (déformation d'une pièce mécanique selon ses points d'appui, position d'un capteur de température dans une enceinte climatique, ...),
- la perturbation de la grandeur mesurée par la présence de l'instrument de mesure (impédance d'un voltmètre, ...),
- l'erreur due à un logiciel de traitement de résultats de mesure,
- les erreurs introduites par la méthode de mesure et le mode opératoire,
- l'erreur d'arrondissement, que le métrologue peut rendre négligeable.

Dans la pratique, les différentes méthodes utilisées pour détecter et évaluer ces erreurs sont :

- le mesurage de la même grandeur avec un instrument différent,
- le mesurage de la même grandeur avec des méthodes de mesure différentes,
- le mesurage d'une grandeur connue (étalonnage, mesure de la justesse, ...),
- le mesurage du même mesurande en faisant varier de manière contrôlée les conditions d'environnement,
- la comparaison entre laboratoires.

### 4.3 Modélisation du mesurage

Pour déterminer l'incertitude de mesure associée à un résultat, il faut d'abord décrire le processus de mesure par un modèle mathématique qui relie la valeur mesurée  $y$  du mesurande  $Y$  aux différentes grandeurs  $x_1, x_2, \dots, x_N$  qui interviennent dans le processus :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

Les valeurs  $x_i$  peuvent représenter :

- des grandeurs mesurées,
- des corrections d'erreurs systématiques,
- des constantes physiques, ...

Chacun des  $x_i$  est entaché d'une incertitude qui est caractérisée par un écart-type estimé  $u(x_i)$ , aussi appelé incertitude-type. Ces incertitudes peuvent être réparties en cinq grandes familles selon leur source :

- la méthode de mesure,
- l'opérateur,
- l'appareil de mesure,
- l'environnement,
- le produit à mesurer.

## 4.4 Procédure de détermination des incertitudes

### 4.4.1 Hypothèse simplificatrice

Pour rester simple, seul le cas où les grandeurs d'entrées  $x_1, x_2, \dots, x_N$  sont décorrélées est traité. Cette hypothèse correspond à la majorité des situations auxquelles le métrologue est confronté. Lorsque les grandeurs d'entrées sont corrélées, le phénomène est plus complexe.

### 4.4.2 Procédure

Avant toute chose, il est impératif de modéliser le processus de mesure sous la forme :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

et d'effectuer les corrections d'erreurs systématiques.

L'étape suivante consiste à déterminer chaque quantité  $x_i$  ainsi que l'incertitude-type  $u(x_i)$  qui lui est associée.

Lorsque l'incertitude est issue de plusieurs sources d'incertitudes indépendantes, on évaluera pour chacune de ces sources, l'incertitude  $u_1, u_2, \dots, u_n$  due à chaque source.

L'incertitude sur la grandeur d'entrée est alors évaluée par une incertitude composée  $u_c$  obtenue par :

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2$$

Lorsque l'incertitude est issue de plusieurs paramètres liés par une relation mathématique, on applique la loi de propagation des incertitudes  $u_c^2(y)$  :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 . u^2(x_i)$$

De cette relation découle l'écart-type composé  $u_c(y)$  :

$$u_c(y) = \sqrt{u_c^2(y)}$$

Puis l'incertitude élargie  $U$  est obtenue en multipliant l'écart-type composé par un facteur d'élargissement  $k$  :

$$U = k . u_c(y)$$

La valeur du facteur d'élargissement (associé à un niveau de confiance) est liée à la probabilité souhaitée.

Finalement, l'incertitude de mesure  $I$  est définie de la façon suivante :

$$I = \pm U = \pm k \cdot u_c(y)$$

Dès maintenant, il est important de noter qu'une incertitude de mesure n'a de sens que si la valeur du facteur d'élargissement qui a été utilisée pour la calculer est indiquée.

## 4.5 Évaluation des composantes de l'incertitude

Lors du calcul de l'incertitude de mesure, tout le problème du métrologue est d'identifier la totalité des paramètres  $x_i$  qui ont une incidence sur le résultat du mesurage et de quantifier leur incertitude-type.

Pour évaluer la valeur numérique des incertitudes-types associées à chacune des composantes de l'incertitude, deux méthodes peuvent être employées :

- **la méthode de type A** : qui se fonde sur l'application de la statistique. Elle est principalement utilisée pour quantifier les incertitudes de répétabilité de mesurage.

- **la méthode de type B** : qui recouvre tout ce qui n'est pas statistique (spécifications, constructeur, certificats d'étalonnage, facteurs d'influence, ...).

### 4.5.1 Méthode de type A

#### 4.5.1.1 Estimation de l'incertitude-type

La méthode de type A consiste à réaliser une série de  $n$  mesurages  $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}$  de la grandeur  $x_i$ .

L'incertitude-type  $u(x_i)$  est alors égale à l'écart-type expérimental :

$$u(x_i) = s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_{i,k})^2}{(n-1)}} \quad (4.1)$$

Il va de soi que cette série de mesurages (30 minimums) n'est pas réalisée qu'au moment de l'estimation de l'incertitude.

#### 4.5.1.2 Diminution de l'incertitude

Dans le cas où l'incertitude obtenue par la méthode de type A est trop importante, le métrologue peut la diminuer en effectuant plusieurs mesures de la grandeur à déterminer. Pour cela, à chaque opération de mesure, il effectue  $m$  mesurages successifs  $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}$  de la grandeur  $x_i$ , et il retient les résultats suivant :

$$x_i = \bar{x}_{i,k} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{i,k}}{m}$$

$$u(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{m}}$$

où  $s(x_i)$  est l'écart-type expérimental déterminé au paragraphe 4.5.1.1.

## 4.5.2 Méthode de type B

Les incertitudes déterminées à l'aide de la méthode de type B sont parfois plus difficiles à quantifier. Elles sont intimement liées à la maîtrise du processus de mesure et à l'expérience de l'opérateur. Ces incertitudes peuvent notamment être déterminées à partir :

- des documentations « constructeur »,
- des résultats d'étalonnage ou de vérification,
- des facteurs d'influence (température, pression, hygrométrie, rayonnement électromagnétique, ...),
- de la quantification des éléments utilisés ...

### 4.5.2.1 Chiffrage des erreurs

- Le constructeur fournit l'incertitude-type. Dans ce cas on utilise directement son résultat :

$$u(x) = \Delta_c$$

- Si le constructeur fournit l'incertitude sous la forme :  $\Delta_c = \pm \dots$ , alors, l'incertitude est :

$$u(x) = \frac{\Delta_c}{\sqrt{3}}$$

- Dans le cas des appareils de type analogiques, (exemple : multimètre à cadran, comparateur à cadran...), l'incertitude est :

$$u(x) = \frac{\Delta_c}{\sqrt{12}}$$

- Lorsque l'incertitude suit une loi normale, l'incertitude est :

$$u(x) = \frac{\Delta_c}{3}$$

- Parfois, la seule information dont dispose le métrologue est l'étendue à l'intérieur de laquelle la grandeur  $x$  se situe. Cette étendue est limitée par une valeur minimale  $x_-$  et une valeur maximale  $x_+$

La première action sera alors d'effectuer une correction dont la valeur est estimée par :

$$x = \frac{x_- + x_+}{2}$$

ensuite, si le métrologue estime que la loi de probabilité est une loi normale, l'incertitude sur la correction sera :

$$u(x) = \frac{x_+ - x_-}{6}$$

en revanche, s'il estime qu'il s'agit d'une loi rectangulaire, l'incertitude sur la correction sera :

$$\frac{x_+ - x_-}{2\sqrt{3}}$$

## 4.6 Estimation de l'incertitude

Connaissant les variances estimées  $u^2(x_i)$  associées à chaque quantité  $x_i$ , il ne reste plus qu'à calculer la variance composée  $u_c^2(y)$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i)$$

Dans la plupart des cas, il n'y a que des corrections additives et le modèle se simplifie de la façon suivante :

$$y = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N$$

avec :

$x_1$  : résultat de la mesure,

$x_2, x_3, \dots, x_N$  : corrections d'étalonnage, corrections d'environnement, ...)

La variance composée s'écrit alors :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u^2(x_i)$$

et l'incertitude associée au résultat final est déterminée par la relation :

$$U = k \cdot u_c(y)$$

où le facteur conventionnel  $k$  est choisi en fonction de la probabilité pour que la valeur de la grandeur soit comprise dans un intervalle  $\pm U$  autour du résultat de mesurage.

En faisant l'hypothèse d'une loi normale, ce qui est le cas le plus fréquent, les probabilités sont d'environ :

— 68 % pour  $k = 1$

- 95 % pour  $k = 2$
- 99.8 % pour  $k = 3$

Ces valeurs correspondent à une population statistique qui suit une loi normale, ce qui est le cas le plus fréquent en métrologie.

## 4.7 Présentation des résultats

Lorsqu'on arrondit un résultat en supprimant un certain nombre de chiffres, on introduit évidemment une erreur d'arrondissement dont la limite supérieure est égale à une demi-unité du dernier ordre exprimé.

Par exemple, écrire 1234,57 signifie que ce nombre peut être compris entre 1234,565 et 1234,575.

Cependant, lorsque le nombre est grand et qu'il comporte des zéros, ces derniers ne sont pas significatifs.

Par exemple, écrire 1200 signifie que ce nombre peut être compris entre 1150 et 1250, mais on peut aussi interpréter qu'il est compris entre 1199,5 et 1200,5. Pour lever toute ambiguïté, il y a lieu de mettre le résultat sous forme décimale en écrivant  $1,2 \cdot 10^3$  dans le premier cas et  $1,200 \cdot 10^3$  dans le second.

### 4.7.1 Chiffres significatifs

Dans un nombre, les chiffres autres que zéro sont significatifs. Les zéros s'ils sont placés en tête du nombre ne sont pas significatifs.

Exemples :

- 6,8 : 2 chiffres significatifs
- 6,80 : 3 chiffres significatifs
- 6800 : 4 chiffres significatifs
- 0,68 : 2 chiffres significatifs

### 4.7.2 Écriture des résultats de mesure

L'écriture du résultat du mesurage doit intégrer l'incertitude, le niveau de confiance et s'écrire avec les unités appropriées :  $M = m \pm \Delta M$ , unité, niveau de confiance.

La précision sur le résultat du mesurage sera caractérisée par  $\frac{\Delta M}{m}$ . Cette précision est souvent exprimée en %. Plus le résultat est petit, plus le mesurage est précis. La dernière étape consiste à déterminer le nombre de chiffres significatifs de  $m$  et de  $\Delta M$ .

Pour l'incertitude, obtenir une précision plus petite que 10% correspond à des conditions de mesure très contraignantes et coûteuses. Dans la très grande majorité des cas, il faut donc limiter le nombre de chiffres significatifs de l'incertitude à un seul chiffre significatif.

Pour l'estimation de la grandeur mesurée, on prendra comme dernier chiffre significatif, celui de même position (au sens numération) que celui de l'incertitude.

Exemple On mesure  $r = 100,251389\Omega$  avec une incertitude  $M = 0,812349\Omega$ . On écrit alors le résultat sous la forme  $R = (100,3\ 0,8)\Omega$ .

## 4.8 Méthodes d'analyses du processus de mesurage

Analyser correctement le processus de mesurage est très certainement la tâche la plus difficile et la plus délicate de l'évaluation des incertitudes. Cette analyse requiert compétences techniques et sens de l'analyse. Elle doit être pratiquée par une personne maîtrisant parfaitement la technique de mesurage.

La mise au point du "bon modèle" mathématique nécessite d'avoir analysé finement le processus de mesurage de manière à identifier de la façon la plus exhaustive possible les causes potentielles d'incertitude. Dans ce cadre, il est utilisé pour l'analyse des processus de mesurage, la méthode dite "des 5M".

### 4.8.1 Méthodes pour étudier un problème

La résolution de problème obéit à une méthodologie rigoureuse. L'étape de recherche des causes du problème se solde souvent par une liste impressionnante de causes.

Il est alors nécessaire de les classer, afin de déterminer les plus importantes, celles qui seront traitées en priorité.

#### Définir l'effet

L'effet doit être formulé en termes simples, admis par l'ensemble des participants.

- Que veut-on améliorer, changer, modifier, quel est l'effet attendu ?

La transformation doit être mesurable pour apprécier une modification de façon objective. L'effet doit constamment rester visible pour permettre de recentrer la démarche à tout moment.

#### Identifier les causes

C'est la période de recherche d'idées. L'important est de noter, sans classer, les idées venant de toute part. Tout doit être noté de façon visible pendant toute la séance.

#### Les mots-clés

L'émetteur de chaque phrase formulée, doit souligner le ou les mots-clés. Cet état fait souvent ressurgir des idées nouvelles qui seront notées à la suite, elles seront traitées à la fin.

### **Les principales familles**

Pour favoriser la recherche, la méthode des 5M est couramment utilisée. Elle permet d'orienter la réflexion vers les 5 domaines, desquels sont généralement issues les causes.

- Machine,
- Main d'œuvre,
- Méthodes,
- Matière,
- Milieu.

Toutes autres organisations mieux adaptées au problème peuvent, bien entendu, être utilisées.

### **Tracer le diagramme**

Le diagramme est tracé en reportant dans l'ordre des idées formulées. Seul le mot-clé indiqué sur les flèches.

### **Choisir**

Le choix des causes sur lequel va porter l'analyse commence par déterminer les familles (de machine jusqu'à milieu) qui semblent être les plus importantes.

### **Définir l'objectif**

L'objectif doit être exprimé en termes de valeur de l'évolution et en temps que l'on s'accorde pour vérifier l'évolution.

### **Les moyens**

Choisir les méthodes de mesure, les tests, les procédures.

# Chapitre 5

## Calcul d'incertitude d'un pied à coulisse

### 5.1 Introduction

Le pied à coulisse est sans doute l'instrument de mesure dimensionnelle le plus largement répondu dans l'industrie.

Les récentes évolution de la technologie ont fait bénéficier cet instrument de système de mesure à affichage numérique, améliorant ainsi les conditions d'utilisation de cet instrument.

Néanmoins le pied à coulisse est un instrument pour lequel les conditions de manipulation sont déterminantes aussi bien pour la qualité de l'étalonnage que pour la qualité des mesures en utilisation courante.

Le pied à coulisse est défini par la norme française NF E 11 - 91 , qui fixe les caractéristiques dimensionnelles et qualitatives les plus importantes.

Un pied à coulisse présente plusieurs caractéristique fonctionnelles ou métrologiques qui doivent faire l'objet des même attentions au moment de l'étalonnage.

On retiendra en particulier l'erreur de justesse et l'erreur de fidélité.

En fonction des condition d'utilisation et de la nature de l'instrument, d'autres caractéristiques peuvent être également mesurés : largeur combinée des becs, becs à boucles ; etc.

*l'exemple présenté concerne l'incertitude sur la détermination de l'erreur de justesse d'un pied à coulisse à affichage numérique au 1/100 de mm, de capacité de 200 mm.*

#### 5.1.1 Le principe de mesure

Les conditions de mesure sont imposées par la définition du mesurande telle que défini dans la norme.

## 5.1.2 Les moyens mis en œuvre

### 5.1.2.1 Les étalons de référence

Le nombre de cales étalons dépend du nombre de points d'essais.

La qualité des cales étalons utilisés ainsi que les conditions d'étalonnage de ces cales contribuent à l'incertitude sur la connaissance des erreurs de justesse.

### 5.1.2.2 L'environnement

bien que les exigences ne soient pas au niveau de celles rencontrées lors des opérations d'étalonnage d'étalons matérialisés, il est néanmoins nécessaire de travailler dans un local où la température soit régulée. On peut supposer dans notre exemple que la température est de  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

compte tenu de la nature de l'instrument et de ses conditions d'utilisation, on supposera que l'opérateur est équipé de gants afin de limiter l'échauffement du corps de l'instrument.

## 5.2 Analyse du processus de mesure

### 5.2.1 La méthode des " 5 M " - Recherche des causes d'erreur

#### 5.2.1.1 Les moyens : Les cales étalons

deux cas peuvent se présenter :

#### **les cales étalons sont étalonnées :**

Lors du calcul de l'erreur de justesse, l'opérateur utilise la valeur maximale donnée dans le certificat d'étalonnage.

En générale, le certificat fait apparaître la longueur au centre, les cinq longueurs ou les longueurs extrêmes (minimum et maximum) ainsi la variation de longueur.

ces valeurs doivent être accompagnées d'une incertitude de mesure déterminée selon la norme NF *XP07 - 020* "Guide pour l'expression des incertitudes de mesure"

#### **Les cales étalons ont été mesurées puis classées**

Le constat de vérification fait alors apparaître la classe de chaque cale.

Rappel : le classement d'un étalon selon les règles en vigueur (norme ISO 14-253 partie 1) impose les conditions suivantes :

— Condition de mesure identique à celles d'un étalonnage.

- Chacune des 5 longueurs mesurées se situe à l'intérieur d'un intervalle, centré sur la valeur nominale, et dont la demi largeur est égale à l'écart toléré par la classe diminué de l'incertitude élargie  $U$  (règle EAL-R1 : European Accreditation of Laboratories).
- La variation de longueur est égale a la valeur limite de la classe considérée diminuée de l'incertitude élargie.

### 5.2.1.2 La méthode

Le strict respect des conditions opératoires élimine les incertitudes liées à la méthode d'évaluation des caractéristiques ; subsiste néanmoins un certain nombre d'incertitudes liées aux conditions de manipulation de l'instrument et de l'étalon.

### 5.2.1.3 La matière (le produit mesuré)

- Le pas de quantification est sans doute la cause d'incertitude la plus importante. A noter que pour un instrument à affichage numérique la résolution de l'instrument intervient au moment de la mise à zéro et au moment de la mesure de la cale étalon. Pour un pied à coulisse à vernier il n'y a qu'une seule lecture au moment de la mesure de la cale.
- La géométrie des becs, leur rectitude et leur parallélisme.
- la connaissance du coefficient de dilatation et des propriétés de conductivité thermique.
- la sensibilité à la force exercée lors de la mesure.

### 5.2.1.4 Le milieu

Le milieu a peu d'influence vis à vis de l'effet des variations thermiques provoquées par les manipulations.

On estime donc que la température de l'étalon et de l'instrument sont plutôt dépendantes des condition de manipulation que des condition de régulation thermique du locale de mesure.

### 5.2.1.5 La main-d'œuvre : l'opérateur

On suppose que le personnel est apte à réaliser ce type de mesure ; néanmoins on ne peut exclure toute influence de l'opérateur compte tenu de la nature de l'instrument.

5.2.1.6 Synthèse

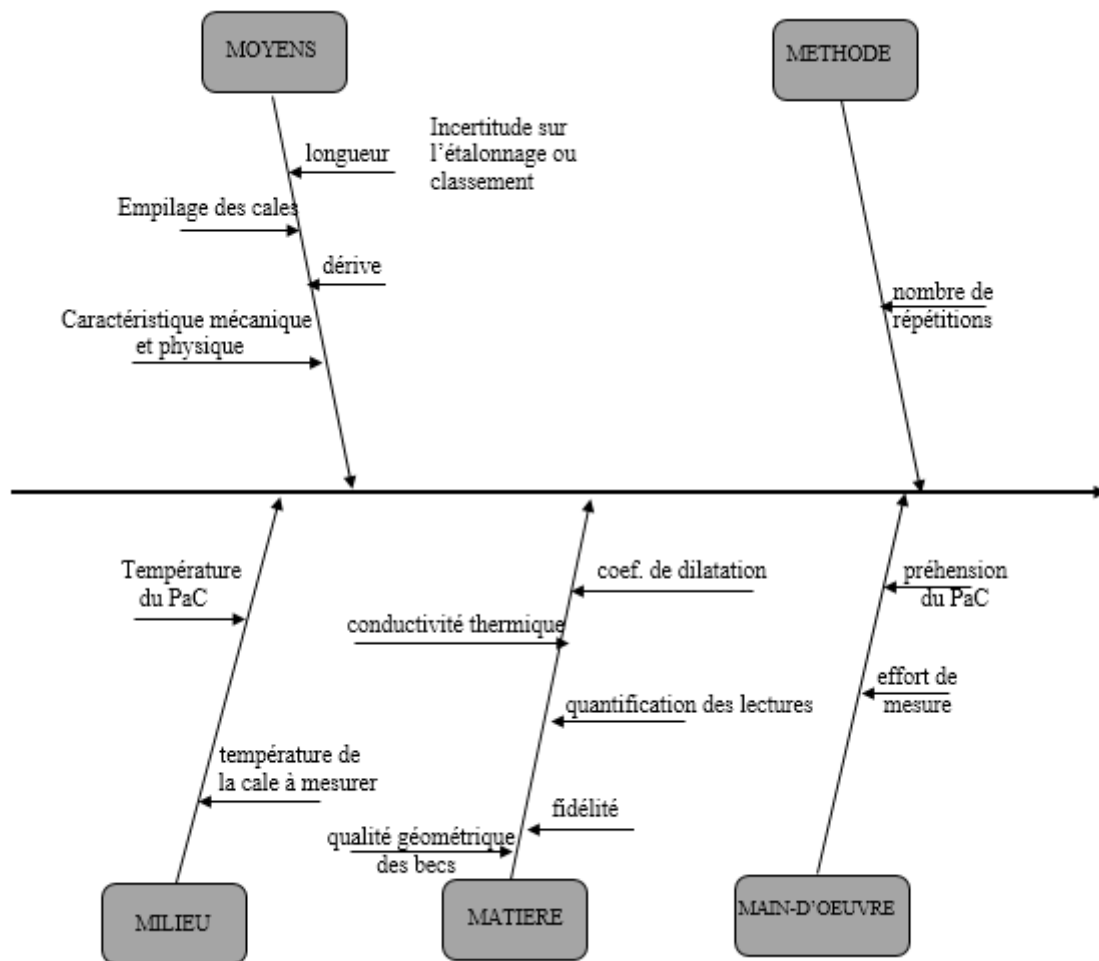


FIGURE 5.1 – Méthode des 5 M

## 5.2.2 Le modèle mathématique

$$\delta l = l_1 - l_2 - L_{nom} + C_{q1} + C_{q2}C_{g\acute{e}om} + C_{Tcale} + C_{TPaC} + C_{force} \quad (5.1)$$

avec :

$L_{nom}$  : longueur nominale de la cale de référence.

$l_i$  : lectures en chaque points.

$C_{qi}$  : correction de l'erreur de quantification.

$C_{Tcale}$  : correction de dilatation de la cale.

$C_{TPaC}$  : correction de dilatation du pied a coulisse.

$C_{g\acute{e}om}$  : correction de géométrie.

$C_{force}$  : correction de la déformation due à la force de mesure exercée sur le coulisseau.

## 5.3 L'évaluation des incertitude-types

### 5.3.1 Incertitude-type de répétabilité

On fait l'hypothèse que la dispersion lors de la répétition du processus complet de mesure traduit la fidélité de l'instrument, les effets de la géométrie et pour une part, les variations de l'effort de mesure.

On admet que l'opérateur n'induit pas d'erreur systématique en particulier par l'effort de mesure.

### 5.3.2 résolution de l'instrument :

Pour un appareil à affichage numérique, il y a deux lectures ; une lecture de zéro correspondant à la mise à zéro réalisée lorsque les becs sont en contact et une lecture lors de la mesure de la cale.

si le pas de quantification est  $q$ , on admet qu'à chaque lecture, on peut avoir une erreur limite de  $\pm \frac{q}{2}$ . La loi de distribution associée est logiquement uniforme.

L'incertitude-type est donc pour deux lectures

$$\frac{q}{\sqrt{6}} = \sqrt{\frac{2q^2}{12}}$$

### 5.3.3 incertitude sur l'étalon de référence

#### 5.3.3.1 Premier cas : les cales sont étalonnées mais non classées

On apporte une correction correspondant à l'écart entre la plus grande longueur et la valeur nominale de la cale.

L'incertitude type se déduit de l'incertitude élargie donnée dans le certificat d'étalonnage en divisant celle-ci par le facteur d'élargissement (généralement  $k = 2$ ).

Pour un empilage on combine quadratiquement les incertitudes types d'étalonnage de chacune des cales. Il faut ajouter une seconde incertitude liée à l'empilage des cales.

Lors des mesures, les cales sont prises entre deux plans parallèles, de ce fait c'est la longueur maximale de l'empilage (cote enveloppe) qui doit être prise en compte dans le calcul de l'erreur de justesse. L'incertitude sur cette valeur dépend de la combinaison des écarts de forme des faces en contact. Elle peut être évaluée en prenant pour demi somme des variations de longueurs de chaque cale en considérant une loi de distribution uniforme, soit

$$U = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_i}{2\sqrt{3}}$$

La valeur de l'empilage est égale à la somme des longueurs maximales diminuée de la demi somme des variations de longueurs.

### 5.3.3.2 Deuxième cas : les cales sont étalonnées et classées

Le rapport de vérification atteste de la conformité de la cale par rapport à une classe de précision "par exemple classe 2" ce qui signifie que pour une cale de 100 mm l'écart maximale entre la longueur en un des cinq points et la valeur nominale est inférieure à  $1,6\mu m$ .

On admet que la loi de distribution associée est une loi uniforme, ce qui donne une incertitude type de

$$\frac{1,6}{\sqrt{3}}\mu m$$

Pour empilage on combine quadratiquement ces incertitudes types.

### 5.3.4 Incertitude liée aux effets de la température

Le modèle mathématique (1) inclut deux termes relatifs aux correction de dilatation qui peuvent être explicités.

$$C_{TPaC} = L \cdot \alpha_{PaC} \Delta_{TPaC}$$

$$C_{Tcale} = -L \cdot \alpha_{cale} \Delta_{Tcale}$$

Afin d'éviter d'éventuelles corrélations prévisibles entre les deux termes liés à la température, nous posons :

$$\Delta_{TPaC} = \Delta_{Tcale} + \delta T$$

Le modèle mathématique devient :

$$\begin{aligned} \delta l = [l_2 - l_1] - L_{nom} + C_L + C_{q1} + C_{q2} + C_{g\acute{e}om} + L \cdot \alpha_{PaC} (\Delta_{Tcale} + \delta T) \\ - L \cdot \alpha_{cale} \Delta_{Tcale} + C_{force} \end{aligned} \quad (5.2)$$

L'application de la loi de propagation des incertitudes à la partie relative aux corrections thermiques donne :

$$\begin{aligned} u_{(\delta l)}^2 = [...] + L^2 \alpha_{PaC}^2 \cdot u^2(\delta T) + L^2 (\alpha_{PaC} - \alpha_{cale})^2 u^2(\Delta_{Tcale}) \\ + L^2 (\Delta_{TPaC} + \delta T)^2 u^2(\alpha_{PaC}) + L^2 \Delta_{Tcale}^2 \cdot u^2(\alpha_{cale}) + L^2 u^2(\Delta_{TPaC}) u^2(\alpha_{PaC}) \\ + L^2 u^2(\Delta_{Tcale}) u^2(\alpha_{cale}) + L^2 u^2(\alpha_{PaC}) u^2(\delta T) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Les termes de la formulation (5.3) sont repris dans le tableau ( 5.1 )

composante	Source de l'incertitude	Coefficient des sensibilité
$u(\delta T)$	écart de température entre le Pied a coulisse et la cale	$L \cdot \alpha_{PaC}$
$u(\Delta_{Tcale})$	écart de température à 20°C de la cale	$L (\alpha_{PaC} - \alpha_{cale})=0$
$u(\alpha_{PaC})$	incertitude sur la connaissance du coefficient de dilatation du pied à coulisse.	$L (\Delta_{TPaC} + \delta T) = 0$
$u(\alpha_{cale})$	incertitude sur la connaissance du coefficient de dilatation de la cale	$L \Delta_{Tcale} = 0$
$u(\Delta_{TPaC}),$ $u(\alpha_{PaC})$	cale étalon : incertitude liée aux coefficients de de dilatation et à la fluctuation de température auteur de 20°C	$L$
$u(\Delta_{Tcale}),$ $u(\alpha_{cale})$	Pied a coulisse : incertitude liée aux coefficients de de dilatation et à la fluctuation de température auteur de 20°C	$L$
$u(\delta T),$ $u(\alpha_{PaC})$	incertitude liée aux coefficients de de dilatation du pied a coulisse et à l'écart de température entre produits	$L$

TABLE 5.1 – Composante relatives à la température des cales

Ligne (1), on fait l'hypothèse que l'écart de température moyen entre le pied à coulisse et la cale est nul avec une fluctuation de  $\pm 2^\circ C$ . Ceci peut être justifié par les conditions de manipulation et/ou de mise en température de pied à coulisse.

Le coefficient de sensibilité de la ligne (2) est nul si l'on suppose l'égalité des valeurs nominales des coefficients de dilatations.

Les coefficients de sensibilités des lignes (3) et (4) sont nuls si l'on suppose que l'écart moyen entre la température de la cale ou du pied à coulisse et la température de référence ( $20^{\circ}\text{C}$ ) est nul.

Les lignes (5) à (7) correspondent aux termes de deuxième ordre du développement en série de Taylor ( cf. note 5.1.2 du guide pour l'expression des incertitudes de mesure).

Les hypothèses complémentaires sont les suivantes :

- Les coefficients de dilatation sont en valeur nominale de  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ , ils sont connus à  $\pm 1 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$  et leur loi de distribution est normale.
- La cale étalon est en moyenne à  $20^{\circ}\text{C}$  avec une fluctuation de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  autour de cette valeur avec une loi de distribution arc sinus, provenant de l'effet de la climatisation.

L'expression (5.3) peut être simplifiée :

$$\begin{aligned} u_{(\delta l)}^2 = & [\dots] + L^2 \alpha_{PaC}^2 \cdot u^2(\delta T) + L^2 u^2(\Delta_{TPaC}) u^2(\alpha_{PaC}) \\ & + L^2 u^2(\Delta_{Tcale}) u^2(\alpha_{cale}) + L^2 u^2(\alpha_{PaC}) u^2(\delta T) \end{aligned} \quad (5.4)$$

## 5.4 Calcul de l'incertitude-type composée

A partir de la relation (5.2), il est possible de calculer la variance associée à l'incertitude sur  $L$ , en appliquant la **loi de propagation des incertitude**

$$\delta l = f(\text{lecteurs}, C_L, C_{qi}, C_{g\acute{e}om}, \Delta_{Tcale}, \delta T, \alpha_{cale}, \alpha_{PaC}, C_{force}) \quad (5.5)$$

$$u^2(\delta L) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial l_i} \right)^2 u^2(l_i) + u^2(C_L) + u^2(C_{q1}) + u^2(C_{q2}) + u^2(C_{g\acute{e}om}) + u^2(C_{force})$$

$$+ L^2 \alpha_{PaC}^2 u^2(\delta T) + L^2 (\alpha_{cale} - \alpha_{PaC})^2 u^2(\Delta_{Tcale}) + L^2 (\Delta_{Tcale} + \delta T)^2 u^2(\alpha_{PaC}) + L^2 \Delta_{Tcale}^2 u^2(\alpha_{cale})$$

$$+ L^2 u^2(\Delta_{Tcale}) u^2(\alpha_{PaC}) + L^2 u^2(\Delta_{Tcale}) u^2(\alpha_{cale}) + L^2 u^2(\alpha_{cale}) u^2(\delta T) \quad (5.6)$$

## 5.5 Calcul de l'incertitude-type composée calcul complet










	source d'incertitude	type d'évaluation	demi-étendue	Loi	Incertitude type	Coef de sensibilité	Incertitude $C_i \cdot u_i$
1	Répétabilité ( $C_{geom}$ $C_{force}$ fidélité des lecteurs)	A	-		$3,4\mu m$	1	$3,40\mu m$
2	classe de la cale étalon	B	$1,6\mu m$		$\frac{1,6}{\sqrt{3}}\mu m$	1	$0,92\mu m$
3	quantification du PaC : 02 lectures avec $q = 0.01mm$	B	$\frac{q}{2}$ , $q = 10\mu m$		$\sqrt{\frac{2q^2}{12}}$	1	$4,08\mu m$
4	Ecart de température entre le PaC et la cale	B	$2^\circ C$		$\frac{2}{\sqrt{3}}^\circ C$	$L\alpha_{PaC}$	$13,28 \cdot 10^{-6} L$
5	Ecart de température à $20^\circ C$ de la cale	B	$1^\circ C$		$\frac{1}{\sqrt{2}}^\circ C$	0	-
6	Incertitude sur la connaissance du coefficient de dilatation de PaC	B	$1 \cdot 10^{-6}^\circ C^{-1}$		$\frac{1}{3} 10^{-6}^\circ C^{-1}$	0	-
7	Incertitude sur la connaissance de coefficient de dilatation de la cale	B	$1 \cdot 10^{-6}^\circ C^{-1}$		$\frac{1}{3} 10^{-6}^\circ C^{-1}$	0	-
8	Incertitude liée aux coefficients de dilatation et à la fluctuation de température autour de $20^\circ C$	B	$1 \cdot 10^{-6}^\circ C^{-1}$ $3^\circ C$		$3,4\mu m$	L	$0,577 \cdot 10^{-6} L$
9	Incertitude liée aux coefficients de dilatation et à la fluctuation de température autour de $20^\circ C$		$1 \cdot 10^{-6}^\circ C^{-1}$ $1^\circ C$			L	$0,236 \cdot 10^{-6} L$
10	Incertitude liée aux coefficients de dilatation et à l'écart de température entre produit	B	$1 \cdot 10^{-6}^\circ C^{-1}$ $2^\circ C$		$3,4\mu m$	L	$0,385 \cdot 10^{-6} L$

TABLE 5.2 – Calcul complet

Comme il n'y a pas de covariance, le tableau exprime les variances liées à chaque source d'incertitude et le calcul de l'incertitude-type composée sera alors :

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 \cdot u_i^2}$$

$$u_c = \sqrt{3,40^2 + 0,92^2 + 4,08^2 + (13,28^2 + 0,577^2 + 0,238^2 + 0,385^2) (200000 * 10^{-6})^2}$$

$$u_c = 6,57 \mu m$$

## 5.6 Calcul simplifié de l'incertitude sur l'erreur de justesse

il est logique de ne pas prendre en compte les termes des lignes (8) à (10) qui sont négligeables devant le terme  $13,28 \cdot 10^{-6} L$  de la ligne (4).

Le calcul donne une incertitude quasiment identique à la précédente, soit

$$u_c = \sqrt{3,40^2 + 0,92^2 + 4,08^2 + (13,28 * 10^{-6} \cdot 200000)^2}$$

$$u_c = 6,56 \mu m$$

Le tableau de calcul se résume alors à 4 lignes :




	source d'incertitude	type d'évaluation	demi-étendue	Loi	Incertitude type	Coef de sensibilité	Incertitude $C_i \cdot u_i$
1	Répétabilité ( $C_{geom}$ $C_{force}$ fidélité des lecteurs)	A	-		$3,4 \mu m$	1	$3,40 \mu m$
2	classe de la cale étalon	B	$1,6 \mu m$		$\frac{1,6}{\sqrt{3}} \mu m$	1	$0,92 \mu m$
3	quantification du PaC : 02 lectures avec $q = 0.01 mm$	B	$\frac{q}{2}, q = 10 \mu m$		$\sqrt{\frac{2q^2}{12}}$	1	$4,08 \mu m$
4	Ecart de température entre le PaC et la cale	B	$2C$		$\frac{2}{\sqrt{3}} C$	$L \alpha_{PaC}$	$13,28 \cdot 10^{-6} L$

TABLE 5.3 – Traitement simplifié.

## 5.7 Expression finale du résultat

L'incertitude élargie sera calculée pour un facteur d'élargissement  $k = 2$ .

Soit :

$$U = 13\mu m$$

Préciser que cette incertitude s'applique dans le cas de l'étalonnage de l'erreur de justesse d'un pied à coulisse à affichage numérique au 1/100 de  $mm$  et une capacité de mesure de 200  $mm$ .

## 5.8 Classes de précisions

Selon la norme NF E 11-091 :

Dans le cadre des pieds à coulisse, les quatre classes 0, I, II, III, définies dans la norme NF E 11-200, sont retenues.

Les Limites d'usure pour ces classes sont données dans le tableau (5.4) pour des pieds à coulisse 1/500  $mm$  et 1/100  $mm$ .

un pied à coulisse ne peut appartenir à l'une des quatre classe que si chacune de ses caractéristiques reste dans les limites fixées.

Longueur de mesurages (mm)	Classe	Limites d'usure		
		justesse ( $\mu m$ )	Fidélité ( $\mu m$ )	Différence maximale des moyennes ( $\mu m$ )
0 (becs des joints)	0	$\pm 20$	-	-
	I	$\pm 30$	-	-
	II	$\pm 40$	-	-
	III	$\pm 60$	-	-
Étendue de mesure : 0 - 150 mm				
0 à 150 mm	0	$\pm 20$	$\pm 20$	20
	I	$\pm 30$	$\pm 30$	30
	II	$\pm 40$	$\pm 40$	40
	III	$\pm 60$	$\pm 60$	60
Étendue de mesure : 0 - 300 mm				
0 à 150 mm	0	$\pm 20$	$\pm 20$	20
	I	$\pm 30$	$\pm 30$	30
	II	$\pm 40$	$\pm 40$	40
	III	$\pm 60$	$\pm 60$	60
150 à 300 mm	0	$\pm 30$	$\pm 30$	20
	I	$\pm 40$	$\pm 40$	30
	II	$\pm 60$	$\pm 60$	40
	III	$\pm 90$	$\pm 90$	60

TABLE 5.4 – Les limites des pieds à coulisse au 1/50  $mm$  et au 1/100  $mm$ .

## 5.9 Exemple pratique 1

Un pied à coulisse doit porter et inscrit de façon lisible et permanente :

- La valeur de l'échelon (par exemple :  $1/50$  mm ou 0.02mm).
- un numéro d'identification individuel.
- le nom ou ma marque de fabricant.

Soit un pied à coulisse à cadran au  $1/50$  mm d'étendue de mesure 300mm, soumis à une vérification périodique.

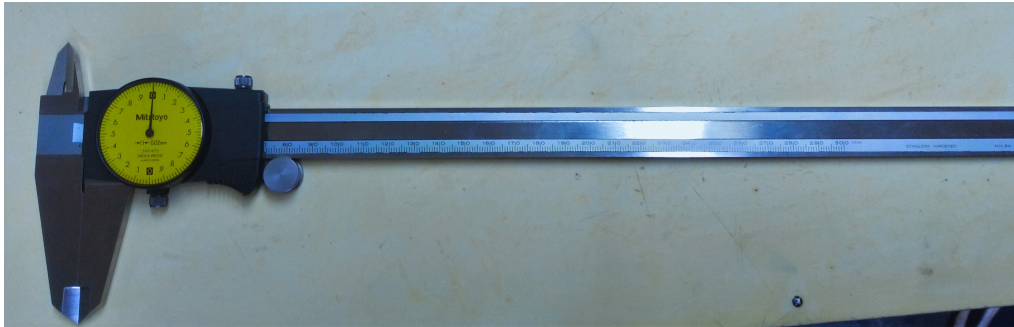


FIGURE 5.2 – Pied à coulisse  $1/50$  mm d'étendue de mesure 300 mm.

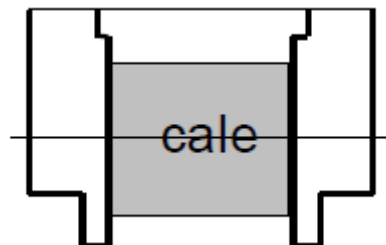
### 5.9.1 Détermination de l'erreur de justesse

Elle doit être contrôlée à l'aide de cales étalons de longueurs choisies de façon à mettre en évidence les erreurs de justesse du vernier (valeurs numériques non entières).

Le pied à coulisse repose à plat sur deux supports situés aux points de moindre déformation, et les cales sont placées en contact avec les becs, suivant la longueur de leurs faces mesurantes et telles que leur axe de mesure soit au milieu de la longueur des becs.

On utilise des cales étalons de classe 1.

Nous avons effectué cinq mesurage en trois points de l'étendue de mesure : 80,10 ; 160,20 et 240,30



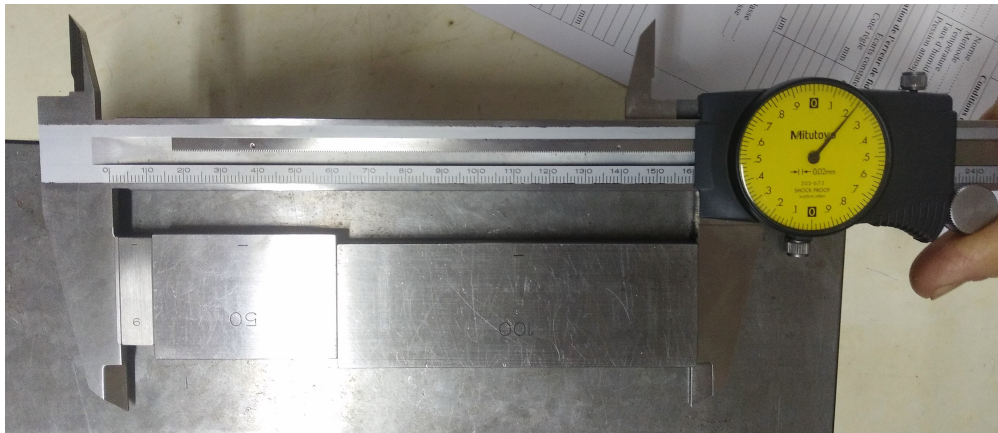


FIGURE 5.3 – Détermination de l'erreur de justesse [ P a C 1/50 ].

mesure n°	écarts constatés en $\mu m$		
	80.10 mm	160.20 mm	240.30 mm
1	0	+20	+20
2	0	0	0
3	0	0	+10
4	0	+20	+10
5	0	+20	+20
$Ej$	0 $\mu m$	+12 $\mu m$	+12 $\mu m$

TABLE 5.5 – Détermination de l'erreur de justesse [ P a C 1/50 ].

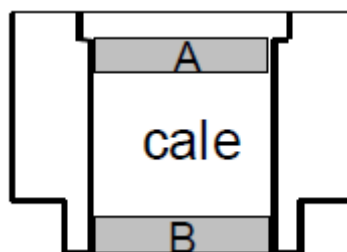
## Vérification

L'erreur de justesse maximale , (  $Ej = +12\mu m$  ) est inférieur à l'erreur maximale tolérée pour la classe 0 ( $\pm 30\mu m$ ).

### 5.9.2 Détermination de l'erreur de fidélité

Le pied à coulisse est placée dans les même conditions que celle du contrôle de l'erreur de justesse, mais les cales sont utilisées suivant la largeur de leurs faces mesurantes.

Pour déterminer l'erreur de fidélité, on fait cinq mesure en un point (150.40mm) dans le coté règle (A) puis dans le coté extrémité (B) .



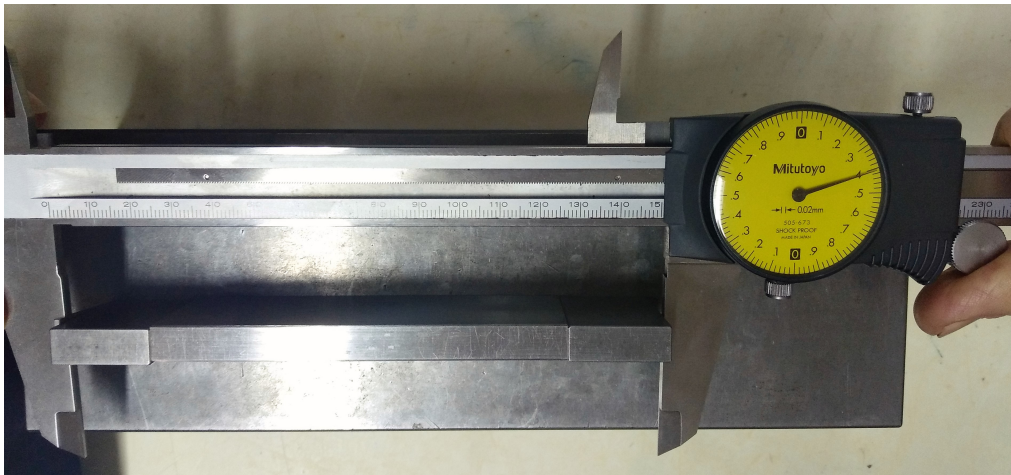


FIGURE 5.4 – Détermination de l'erreur de fidélité côté règle [ P a C 1/50 ] .

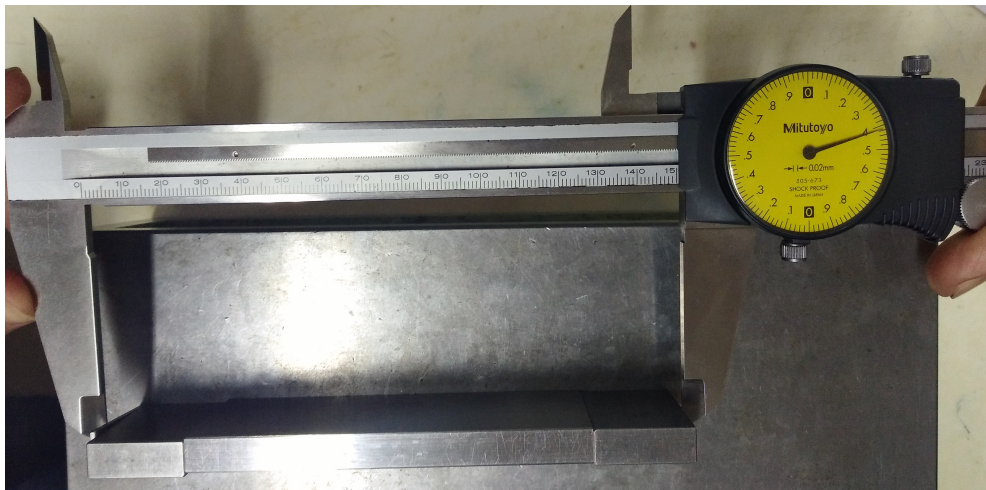


FIGURE 5.5 – Détermination de l'erreur de fidélité côté extrémités [ P a C 1/50 ] .

mesure n°	Écarts constatés en $\mu m$	
	côté règle	côté extrémité
	150.40 mm	150.40 mm
1	+10	+10
2	0	+10
3	0	-20
4	+20	-20
5	0	0
$E_f$	+6 $\mu m$	-4 $\mu m$

TABLE 5.6 – Détermination de l'erreur de fidélité [ P a C 1/50 ] .

### Vérification

L'erreur de justesse fidélité (  $E_f = +6\mu m$  ), est inférieure à l'erreur maximale tolérée pour la classe 0 ( $\pm 30\mu m$ ).

— *L'erreur intrinsèque :*

$$E_i = \pm \sqrt{E_j^2 + \frac{E_j^2}{n}}$$

$$E_i = \pm \sqrt{12^2 + \frac{6^2}{5}} = \pm 12.29 \mu m$$



	source d'incertitude	type d'évaluation	demi-étendue	Loi	Incertitude type	Coef de sensibilité	Incertitude $C_i \cdot u_i$
1	Répétabilité ( $C_{geom}$ $C_{force}$ fidélité des lecteurs)	A	-		$12.29 \mu m$	1	$12.29 \mu m$
2	Classe de la cale étalon	B	$1,6 \mu m$		$\frac{1,6}{\sqrt{3}} \mu m$	1	$0,92 \mu m$
3	Quantification du PaC : 02 lectures avec $q =$ $0.02 mm$	B	$\frac{q}{2}, q =$ $20 \mu m$		$\sqrt{\frac{2q^2}{12}}$	1	$8,16 \mu m$

TABLE 5.7 – Traitement simplifié.

Calcul de l'incertitude sur l'erreur de justesse :

$$u_c = \sqrt{(12,29)^2 + (1,4)^2 + (8,16)^2}$$

$$u_c = 14,81 \mu m$$

L'incertitude élargie sera calculée pour un facteur d'élargissement  $K = 2$ .

$$U = 29,63 \mu m$$

## 5.10 Exemple pratique 2

Soit un pied à coulisse à vernier au  $1/20 mm$  d'étendue de mesure  $150 mm$ , soumis à une vérification périodique.

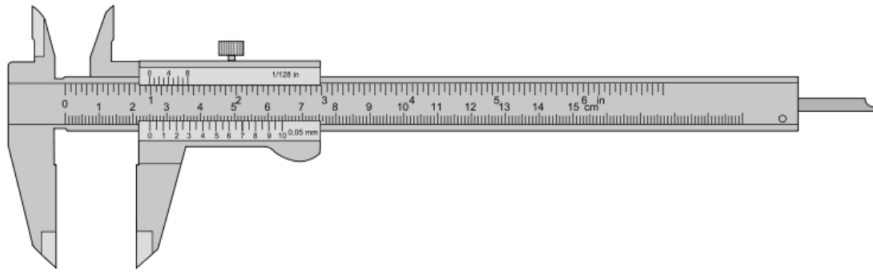


FIGURE 5.6 – Pied à coulisse 1/20 mm d'étendue de mesure 150 mm.

### 5.10.1 Détermination de l'erreur de justesse

On utilise des cales étalons de classe 1.

Nous avons effectué cinq mesurage en trois points de l'étendue de mesure :120,3; 80,2; 40,1

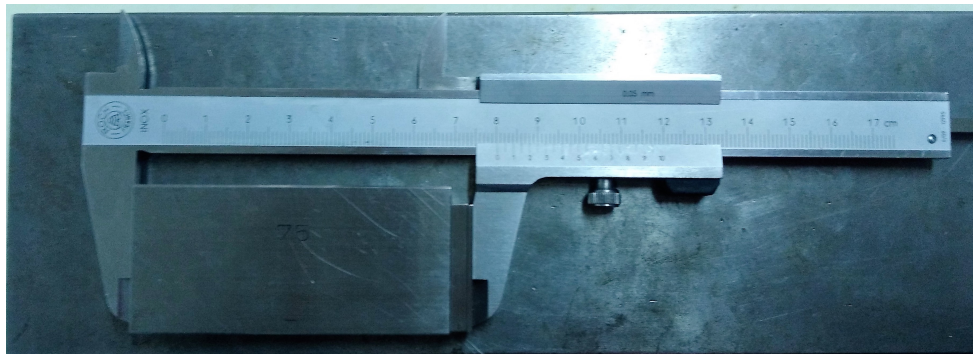


FIGURE 5.7 – Détermination de l'erreur de justesse [ PaC 1/20 ].

mesure n°	écarts constatés en $\mu m$		
	40.10 mm	80.20 mm	120.30 mm
1	+10	+25	+30
2	+10	+25	+20
3	+10	+25	+20
4	+10	+25	+20
5	+10	+25	+20
$E_j$	+10 $\mu m$	+25 $\mu m$	+22 $\mu m$

TABLE 5.8 – Détermination de l'erreur de justesse [ P a C 1/20 ].

### Vérification

L'erreur de justesse maximale , (  $E_j = +25\mu m$  ) est inférieure à l'erreur maximale tolérée pour la classe 0 ( $\pm 30\mu m$ ).

### 5.10.2 Détermination de l'erreur de fidélité

Pour déterminer l'erreur de fidélité, on fait cinq mesure en un point (90.50mm) dans le coté règle puis dans le coté extrémité.

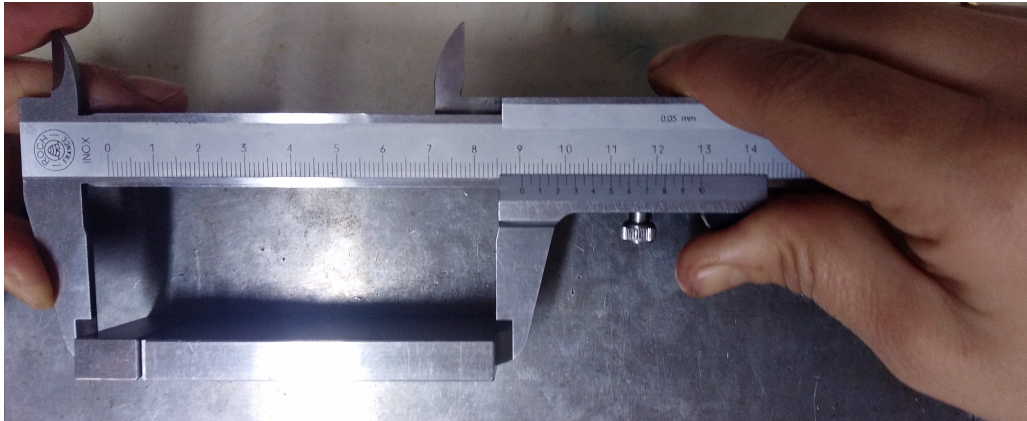


FIGURE 5.8 – Détermination de l'erreur de fidélité côté extrémité [ PaC 1/20 ].

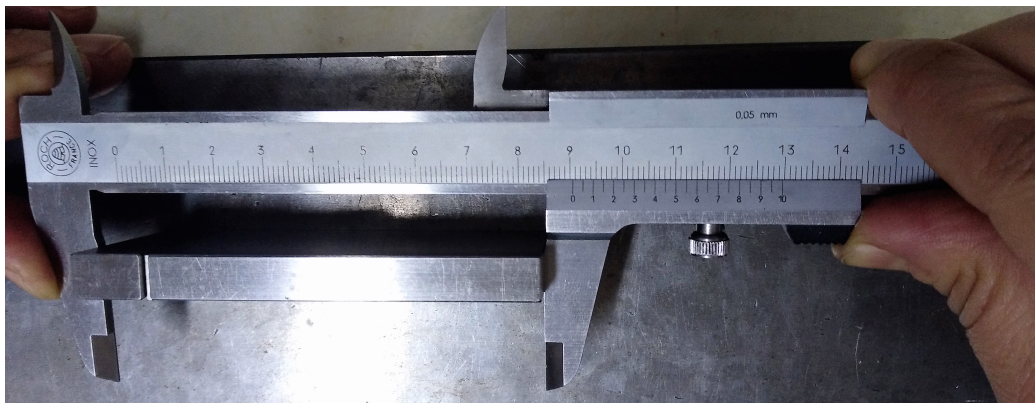


FIGURE 5.9 – Détermination de l'erreur de fidélité côté règle [ PaC 1/20 ].

mesure n°	Écarts constatées en $\mu m$	
	côté règle	côté extrémité
	90.50 mm	90.50 mm
1	+20	+10
2	+20	0
3	+20	+10
4	+20	0
5	+20	+10
<i>Ef</i>	+20 $\mu m$	+6 $\mu m$

TABLE 5.9 – Détermination de l'erreur de fidélité [ P a C 1/20 ].

## Vérification

L'erreur de justesse maximale (  $E_f = +20\mu m$  ), est inférieure à l'erreur maximale tolérée pour la classe 0 ( $\pm 30\mu m$ ).

— *L'erreur intrinsèque :*

$$E_i = \pm \sqrt{25^2 + \frac{20^2}{5}} = \pm 26.55\mu m$$



	source d'incertitude	type d'évaluation	demi-étendue	Loi	Incertitude type	Coef de sensibilité	Incertitude $C_i \cdot u_i$
1	Répétabilité ( $C_{geom}$ $C_{force}$ fidélité des lecteurs)	A	-		$26.55\mu m$	1	$26.55\mu m$
2	Classe de la cale étalon	B	$1,6\mu m$		$\frac{1,6}{\sqrt{3}}\mu m$	1	$0,92\mu m$
3	Quantification du PaC : 02 lectures avec q = 0.05mm	B	$\frac{q}{2}$ , $q =$ $50\mu m$		$\sqrt{\frac{2q^2}{12}}$	1	$20.41\mu m$

TABLE 5.10 – Traitement simplifié.

Calcul de l'incertitude sur l'erreur de justesse :

$$u_c = \sqrt{(26,55)^2 + (0,80)^2 + (20,41)^2}$$

$$u_c = 33.49\mu m$$

L'incertitude élargie sera calculée pour un facteur d'élargissement  $K = 2$ .

$$U = 67\mu m$$

# Conclusion générale

Le projet de fin d'études est une phase importante dans le cycle de formation de Master, et c'est la meilleure occasion pour les étudiants de mettre en évidence leurs connaissances théoriques acquises durant plusieurs années et de développer l'esprit de la recherche.

J'ai étudié dans ce projet, les méthodes de calcul des incertitudes qui peut avoir un instrument de mesure.

Pour déterminer une incertitude sur un mesurage, il faut :

- Choisir une méthode de mesurage.
  - Modéliser le mesurage :
- Déterminer les différentes variables qui entrent dans le mesurage.
    - Déterminer les grandeurs d'influence.
    - Déterminer la fonction mathématique qui lie ces variables.
      - Déterminer les composantes de l'erreur sur chacune des variables :
  - Lister les composantes aléatoires et les composantes systématiques.
    - Déterminer les incertitudes-types sur chacune des variables :
  - Estimations de type A ou de type B.
    - Éventuelle Incertitude – type composée sur chaque variable.
      - Déterminer l'incertitude – type composée sur le mesurage.
      - Déterminer le facteur d'élargissement (associé à la loi supposée représenter la répartition des valeurs prises par le mesurande).
      - Donner l'incertitude élargie sur le mesurage avec ses caractéristiques.

Notons enfin, que ce projet qui présente pour nous une première expérience pratique est très bénéfique, et j'espère que ce travail sera un bon guide pour les promotions futures.

# Bibliographie

- [1] Tiré du site <http://www.metrodiff.org>
- [2] Tiré du site <http://www.metas.ch>
- [3] L.BERGOUX Maitre de Conférences.POLYTECH' Marseille-Département Mécanique Energétique 2<sup>ème</sup> Année SIIC
- [4] Leila GHARBI ERNEZ,École Nationale d'Ingénieurs de Tunis,Cours de Mesure et Instrumentation,Février 2005.
- [5] Préface de Jean-Pierre Desgeorges, CENTRES TECHNIQUES INDUSTRIELS. La métrologie en PME-PMI. Pratique de la mesure dans l'industrie Février 1998.
- [6] Tran Tien Lang,Électronique des systèmes de mesures : mise en œuvre des procédés analogique, Masson,1992.
- [7] Wartil et Schmidt, Controle, mesure et régulation sur PC, Édition Radio.
- [8] Nuilly (M.),Modélisation et estimation des erreurs de mesure, Tec & Doc Lavoisier, 1993