

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد حطاب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électronique
Spécialité Instrumentation

Présenté par

Chemali Nassim

&

Bourahla Meziane

Contribution à l'Étalonnage et la Vérification d'une chaîne de mesure des paramètres tension et courant d'un banc d'essais électrique

Proposé par : Nadjemi Omar & El Merraoui Khadidja

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

Nous remercions Allah de nous avoir donné la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'étude.

Nous remercions sincèrement nos encadrateurs Mr Nadjemiomar et Mme ElmerraouiKhadidja pour avoir dirigé ce modeste travail et pour leur continuel suivi et continu tout au long de la réalisation et la correction de ce mémoire. ils nous ont présenté un excellent exemple de la compétence scientifique, discipline et générosité.

Nous adressons nos plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant la charge de juger ce travail.

En fin de compte, nous ne pourrions pas terminer ces remerciements sans remercier nos familles et tous nos amis, remerciez-les pour leur aide et leur compréhension, leurs encouragements et leur soutien Apporté dans notre processus d'apprentissage

Dédicaces

A ma maman,

La personne qui a sacrifié de tout pour faire de moi ce que je suis maintenant.

A mon papa,

A celui qui a fait de moi un homme.

A ma future femme,

Qui est toujours à mes côtés.

A mon ami Haouameamine ,

pour son aide.

A mon frère et ma sœur

A tous mes amies et mes collègues,

A tous mes enseignants,

Et avec une sincère fidélité et un profond amour que je vous dédie ce modeste travail.

Chemali. Nassim

Dédicaces

A ma chère mère

A mon cher père

Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour vos, soutien fut une lumière et vos encouragements dans tout mon parcours.

A mes frères

A mes sœurs

Qui me donne de l'amour et de la vivacité. Je vous dis merci et je vous souhaite bonheur, réussite et prospérité.

A tous mes amies et mes collègues,

A tous mes enseignants

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Bourahla Meziane

ملخص:

يتمحور مشروعنا حول معايرة سلسلة القياس التي تحتوي على محرك غير متزامن، كما أنه يحتوي على مجموعة من المستشعرات تحت hall تأثير، هذه الأخيرة مدمجة في علبة واحدة بالاستخدام اداة من نفس وحدة القياس نقوم بمعايرة هذه الحساسات عالية الدقة باستخدام بطاقة Dspace هذه مع شاشة عرض "كمبيوتر" لمعالجة والاستظهار البيانات تسمح لنا هذه الأخيرة بمعالجة و العثور على المعامل الدقيق للضبط الحساسات الشدة التيار أو الجهد.

كلمات المفاتيح: المعايرة - القياس - الضبط

Résumé : Notre projet de fin d'études consiste à faire l'étalonnage pour une chaîne de mesure, qui compose le banc d'essai du Labset (département d'électronique, Blida 1). Il englobe un moteur asynchrone, des capteurs de mesure à effet HALL, une carte d'acquisition Dspace DS1104. Celle dernière permet l'acquisition des données en sortie du capteur ; une unité de visualisation et de traitement des données est constituée d'un PC hôte. Afin de réaliser l'étalonnage de cette chaîne de mesure, un appareil de mesure étalon de marque C.A 8332B de Chauvin Arnoux, est utilisé. Ses données nous servent à trouver le gain pour ajuster chaque capteur de mesure soit du courant ou de la tension. Enfin fournir les incertitudes qui ont été obtenues.

Mots clés : l'étalonnage; chaîne de mesure ; ajuster.

Abstract : Our project graduation consists of calibrating a measurement chain which contains an asynchronous motor that makes up the labset test bench , it includes an asynchronous motor, HALL effect measuring sensors, a Dspace acquisition card, the latter allows the acquisition of data at the sensor output, A data display and processing unit consists consists of a host PC. In order to carry out the calibration of this measuring chain, a measuring device of the brand C.A8332B from "Chauvin Arnoux" is used. The data obtained from the calibration of the measuring chain is used to find the gain to adjust each measuring sensor either for current or voltage. Finally the uncertainty calculation has been obtained.

Keywords : calibration ; measure ; ajust

Listes des acronymes et abréviations

MAS: Moteur Asynchrone

n : nombre de mesures qui a effectué

S : la grandeur de sortie

E : la grandeur d'entrée (mesurande)

Δm : incertitude de mesure

K : le coefficient d'élargissement on le retient selon le niveau de confiance

E_r : Erreur de mesure

E_{rs} : L'erreur de mesure systématique

ER_{max} : L'erreur maximum

m: la valeur mesuré

m_{min} : la valeur minimum de mesure

m_{max} : la valeur maximum de mesure

\bar{m} : la valeur moyenne des mesures

m (vrai) : la valeur vraie de mesure

Er_a: l'erreur de mesure aléatoire

CC : *Courant Continue*

CA : *Courant Alternative*

u_e : Incertitude linéarité

q: quantume

a : la pente de la courbe d'étalonnage (gain de chaine de mesure)

d : la résolution

IN: indication de la chaine de mesure

u_q : Incertitude de quantification

u : Incertitude de mesure

U : Incertitude élargie avec un niveau de confiance

ΔM_{et} : Incertitude de l'étalon

ΔM_{eti} : Incertitude de l'étalon de chaque mesure

Table des matières

Chapitre 1	LA MÉTROLOGIE	3
1.1	Introduction	3
1.2	Définition	3
1.2.1	La métrologie	3
1.2.2	Mesurage	4
1.2.3	Mesurande	4
1.2.4	Mesure	4
1.2.5	Résultat d'une mesure	4
1.2.6	valeur vraie du mesurande	4
1.2.7	Grandeur d'influence	5
1.3	méthodes de mesure	5
1.3.1	Mesure directe	5
1.3.2	Mesure indirecte	5
1.4	Procédure de mesure	6
1.4.1	instrument de mesure	6
1.4.2	étalons	6
1.4.3	méthode de mesure	6
1.4.4	principe de mesure	6
1.4.5	Un opérateur	6
1.4.6	L'environnement	6
1.5	Erreur de mesure	7
1.5.1	Les types d'erreur de mesure	7
1.6	La chaîne de mesure	9
1.6.1	Définition	9
1.6.2	Moteur asynchrone	10
1.6.3	Capteur	12
1.7	Conclusion	14

Chapitre 2 : L'incertitude et l'étalonnage	15
2.1 Introduction	15
2.2 Incertitude	15
2.2.1 Définition.....	15
2.2.2 Évaluation de l'incertitude.....	15
2.2.3 Les sources d'incertitude	20
2.2.4 Détermination de l'incertitude d'étalonnage.....	21
2.3 L'étalonnage	22
2.3.1 L'étalonnage	22
2.3.2 Ajustage d'un système de mesure (VIM 3.11)	22
2.3.3 Etalon	23
2.3.4 Certificat d'étalonnage	23
2.3.5 Le ban de l'étalonnage	25
2.3.6 Déroulement l'opération de l'étalonnage	25
2.3.7 Tableau d'étalonnage.....	25
2.3.8 Courbe d'étalonnage.....	26
2.3.9 La méthodologie d'estimation de la fonction d'étalonnage et de l'incertitude associée.....	26
2.4 La vérification	27
2.4.1 La Vérification.....	27
2.4.2 Le constat de vérification	28
2.5 La différence entre l'étalonnage et la vérification	29
2.5.1 Le choix entre étalonnage et vérification	30
2.6 Conclusion	30
Chapitre 3 : Etude sur le banc d'essai	31
3.1 Introduction	31
3.2 Le logiciel d'acquisition des données de mesure.....	31
3.2.1 Analyseur de réseaux électriques triphasé, ChauvinArnoux.....	31

3.2.2	Présentation des logiciels	33
3.2.3	La carte d'acquisition DSPACE	34
3.2.4	Unité de visualisation (pc)	35
3.2.5	Les capteurs à effet hall	35
3.3	Description du banc de mesures.....	37
3.4	Résultats expérimentaux des essais	40
3.4.1	Capteur de courant ID	40
3.4.2	Capteur de courant IB	46
3.4.3	Capteur de courant IC	50
3.4.4	Capteur de tension VB	54
3.5	La vérification.....	58
3.6	Conclusion	61
	Conclusion Générale	63
	ANNEXE	65
	ANNEX A	65
	ANNEXE B.....	69
	BIBLIOGRAPHIE	80

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Mesure directe.....	5
Figure 1.2 : procédure de mesure	7
Figure 1.3 : la chaine de mesure.....	10
Figure 1.4 : schéma de principe	11
Figure 1.5 : symbole électrique	11
Figure 1.6 : constitution d'un moteur asynchrone triphasée	12
Figure 1.7 : la plaque signalétique d'un moteur	12

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : la méthode des 5M	21
Figure 2.2 : le ban d'étalonnage	25
Figure 2.3 : la courbe d'étalonnage	26
Figure 2.4 : la méthodologie d'estimation de la courbe d'étalonnage	26
Figure 2.5 : la différence entre l'étalonnage et la vérification	29
Figure 2.6 : le choix entre l'étalonnage te la vérification	30

Chapitre 3 :

Figure 3-1 : le model C.A 8332 de chauvin arnoux.....	32
Figure 3-2 : Présentation de l'interface de la carte dSPACE 1103.....	34
Figure 3.3 : capteur MCV3 de courant et tension	35

Figure 3.4 : capteur MV3 de tension	36
Figure 3.5 : capteur MV3 de courant	36
Figure 3 .6 : Schéma synoptique du banc de mesure.....	37
Figure 3.7 : Photo du banc d'essai.....	38
Figure 3.8 : capteur à effet hall.....	38
Figure 3.9: carte d'acquisition Dspace.....	38
Figure 3.10 : deux unités de visualisation.....	39
Figure 3.11 : les quatre résistances	39
Figure 3-12 : nuage de point pour réaliser la courbe d'étalonnage.....	41
Figure 3-13 : Courbe d'étalonnage pour le capteur ID.....	42
Figure 3-14 : Les incertitudes sur la droite d'étalonnage.....	43
Figure 3-15 : les erreurs du capteur ID	44
Figure 3-16 : nuage de point pour réaliser la courbe d'étalonnage.....	47
Figure 3-17 : Courbe d'étalonnage pour le capteur IB.....	47
Figure 3-18 : les erreurs du capteur IB	48
Figure 3-19 : La courbe d'étalonnage pour le capteur IC.....	51
Figure 3-20 : les erreurs du capteur IC	52
Figure 3-21 : la courbe d'étalonnage pour le capteur VB.....	54
Figure 3-22 :Les erreurs du capteur VB	56

ANNEXE :

Figure A-1 : les formes d'acquisition des données	65
---	----

Figure A-2: l'enregistrement à temps réel	66
Figure A-3 : les types de session d'enregistrement pour la surveillance	67
Figure B-1 : Constitution de l'interface série de la dSPACE1103.....	69

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Principales lois de probabilité, l'incertitude-type est exprimée en fonction de la demi-étendue α	19
Tableau 2.2. L'incertitude dans le cas d'une mesure indirect.....	20
Tableau 3- 1 :mesures du courant ID avec l'étalon et Dspace	41
Tableau 3- 2 : Les erreurs entre les 13 point de mesure et la droite d'étalonnage.....	43
Tableau 3-3 :mesures du courant IB avec l'étalon et Dspace	46
Tableau 3- 4 :les erreurs entre les 13 point de mesure et la droite d'étalonnage.....	48
Tableau 3-5 : les 15 mesures du capteur IC.....	50
Tableau 3-6 :Les erreurs entre les 15 point de mesure et la droite d'étalonnage.....	52
Tableau 3-7 :les 13 mesures du capteur VB	54
Tableau 3-8 :Les erreurs entre les 13 point de mesure et la droite d'étalonnage.....	56
ANNEXE :	
Tableau B-1. Caractéristiques de LADSPACE1103	79

Introduction générale

L'application de la mesure est très large dans le domaine industriel, la maîtrise du processus de mesure et de la qualité de la mesure est devenue un véritable enjeu économique, commercial et réglementaire.

Dans le domaine de l'électronique, la mesure la plus intéressante est la mesure du courant et de la tension. La connaissance de ces deux grandeurs permet de maîtriser les méthodes de mesure et d'utiliser des instruments de mesure pour développer des résultats.

La qualité des mesures se réfère à certains paramètres parmi lesquels figurent les conditions d'environnement (température, hygrométrie, pression atmosphérique, ...), et aussi des instruments qui dérivent dans le temps.

Ce phénomène de dérivation peut apparaître sur les instruments au fur à mesure de temps, pour vérifier ce phénomène il faudra un étalonnage de l'instrument par un autre instrument de haut calibre, en suite faire la comparaison entre l'instrument de mesure avec un étalon et déterminer à la fin les erreurs de l'instrument.

Dans notre projet on va étudier et on analyserons les différentes parties qui constituent notre chaîne de mesure de banc d'essais de la machine asynchrone, notre chaîne de mesure est constituée d'un moteur asynchrone et des capteurs qui vont mesurer ces différents paramètres (courant, tension), une carte d'acquisition Dspace qui enregistre les valeurs mesurées, un Pc pour une connexion vers une carte d'acquisition Dspace, on va étalonner les capteurs à l'aide des étalons, pour réaliser ceci il faut faire des choix de méthodes et d'instruments de mesure pour nos paramètres se mesurant.

Notre travail est constitué de la présente introduction et de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à définir les différents outils métrologiques associés à la mesure des paramètres, les méthodes de mesure et les différentes parties de la chaîne de mesure.

Le deuxième chapitre est consacré pour deux termes l'incertitude qu'on va faire une étude sur son évaluation et les différentes sources d'incertitude, la deuxième partie est sur l'étalonnage et les différentes procédures qu'il faut suivre pour être étalonné en final on va faire la différence entre l'erreur qu'on la définit dans le premier chapitre et l'incertitude, après cela on a fait la distinction entre l'étalonnage et la vérification.

Dans le dernier chapitre, nous l'avons conçu en deux parties. La première partie présente les matériaux que nous utilisons pour cette opération d'étalonnage. Il s'agit soit de la partie matérielle (instrument) pour la mesure, soit de la partie logicielle pour le traitement des données. La deuxième partie est dédiée aux différentes mesures effectuées pour la calibration, car nous verrons les différentes procédures qui seront suivies lors de la réalisation de l'étalonnage.

Chapitre 1 La métrologie

1.1 Introduction

La métrologie est la science de la mesure, qui joue un rôle indéniable pour le scientifique. Elle concerne donc toutes les étapes requises pour la quantification d'une grandeur au moyen d'une expérience. La métrologie touche tout l'aspect aussi bien théorique que pratique; elle s'intéresse à la détermination des caractéristiques appelées grandeurs qui peuvent être fondamentales comme par exemple une masse, une longueur... ou dérivées comme par exemple un courant, une tension, une vitesse... [1]

Mesurer une grandeur physique c'est rechercher la valeur de cette grandeur. Si l'on souhaite approfondir la notion de « mesure d'une grandeur », il est indispensable d'utiliser un vocabulaire particulier. Le langage de la métrologie est défini dans le « Vocabulaire International de la Métrologie » .[2]

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes parties constituant la chaîne de mesure présente au niveau du banc d'essai du LabSet. Ce dernier est utilisé dans le diagnostic et la commande de la machine asynchrone. Les méthodes de mesure de chaque grandeur physique (courant et tension) seront aussi abordées dans ce chapitre.

1.2 Définition

Les définitions suivantes sont tirées de l'ouvrage "Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie

1.2.1 METROLOGIE

Est la science de la mesure, ce terme traditionnel est utilisé dans le domaine des mesures pour déterminer les caractéristiques d'une grandeur physique (température, pression, vitesse ...)[1], la

spécificité de la discipline métrologie n'est pas dans la mesure elle-même, mais dans la validation du résultat.[3]

1.2.2 Mesurage :

Est un ensemble des Operations à effectuer pour déterminer la valeur d'une grandeur particulière à mesurer. En conséquence, un mesurage commence par une définition appropriée du mesurande du processus de mesure.[2]

1.2.3 Mesurande :

Le mesurande est un terme défini dans le VIM comme étant la grandeur que l'on veut mesurer (température, position, pression). Lorsqu'on réalise un mesurage, la première étape consiste à spécifier le mesurande c'est à dire la grandeur à mesurer. Le mesurande ne peut pas être spécifié par une valeur mais seulement par la description d'une grandeur.[2]

1.2.4 Mesure :

Est un résultat d'un mesurage ou c'est la valeur de mesurande.

1.2.5 Résultat d'une mesure

Ensemble de valeurs attribuées à un mesurande [2]

Note (VIM) :

- Le résultat de mesure est généralement exprimé par une valeur mesurée unique et une incertitude de mesure. Pour éviter toute confusion, nous appellerons m la valeur mesurée de la grandeur M (un nombre), et M le résultat de mesure, c'est à dire l'expression complète du résultat (un intervalle de valeurs, associé à un niveau de confiance). La mesure est directe lorsque l'instrument de mesure fournit directement la valeur m . Si le résultat est obtenu à partir de la valeur d'autres grandeurs ($m = f(x, y, z, \dots)$), on parle de mesure indirecte.[3]

1.2.6 Valeur vraie du mesurande

La valeur vraie (M_{vraie}) du mesurande est la valeur que l'on obtiendrait si le mesurage est parfait.[2]

1.2.7 Grandeur d'influence

Une grandeur d'influence est une grandeur étrangère peut provoquer sur la mesure, qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur la valeur mesurée. Citons en particulier [4] ; la température, la pression, l'humidité, l'alimentation électrique...

1.3 Méthodes de mesure.

Il existe deux méthodes pour déterminer la valeur d'une grandeur mesurée :

1.3.1 Mesure directe

Consiste à mesurer directement une grandeur au moyen d'un instrument de mesure tel qu'un multimètre, ou une machine à mesurer traditionnelle, le résultat de mesure est fourni directement par l'instrument

Exemple :

Mesure la tension électrique par voltmètre figure 1.1

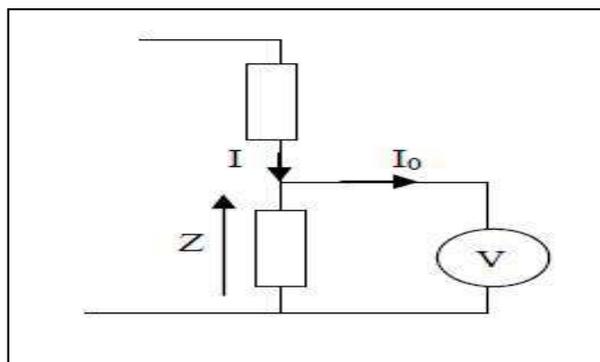


Figure 1.1. Mesure directe.

1.3.2 Mesure indirecte

Cette méthode Consiste à utiliser deux ou plusieurs appareils de mesure pour déterminer la valeur d'une grandeur inconnue souhaiter.

Exemple : Mesure de la puissance

On mesure la puissance par la mesure d'abord le courant I et la tension à l'aide d'ampèremètre et de voltmètre après on fait la mesure de puissance

$$P = IU \quad (1.1)$$

1.4 Procédure de mesure

Pour faire une mesure il faut un instrument de mesure qui est 1^{er} élément de processus d'obtention d'un résultat de mesurage, procédure de mesure est constitué de (voir figure1.2)

1.4.1 Instrument de mesure

On spécifie les appareils (un ampèremètre, voltmètre...) qu'on peut faire la mesure pour déterminer la grandeur physique (un courant, une vitesse, une masse), le choix de l'instrument de mesure dépend de la grandeur mesurée qui a des influences sur le résultat de mesure.

1.4.2 Des étalons

Les étalons sont des instruments de mesure mis en avant la comparaison d'une grandeur avec une valeur particulière de cette grandeur, prise comme une référence[2]

1.4.3 Méthode de mesure

Pour déterminer une grandeur de mesure il faut une méthode de mesure qu'on cite déjà, la méthode directe et indirecte le choix de méthode est très importante pour réduire les erreurs qui influencent sur les résultats de mesure.

1.4.4 Principe de mesure

Pour effectuer une opération de mesure il faut fournir des stratégies, des connaissances théoriques et pratiques, la bonne maîtrise de l'instrument de mesure par l'opérateur et avoir de bonnes conditions de l'environnement.

1.4.5 Opérateur

L'opérateur métrologue est un opérateur qui est chargé de l'étalonnage, du calibrage et du contrôle des pièces, outils ou systèmes de mesure selon les exigences clés et le vocabulaire de la métrologie et d'appliquer les notions utiles de la norme ISO 17025.

1.4.6 L'environnement :

C'est-à-dire les conditions pour faire une bonne mesure sans influencer sur le résultat de mesure comme la température, la pression, vibration...

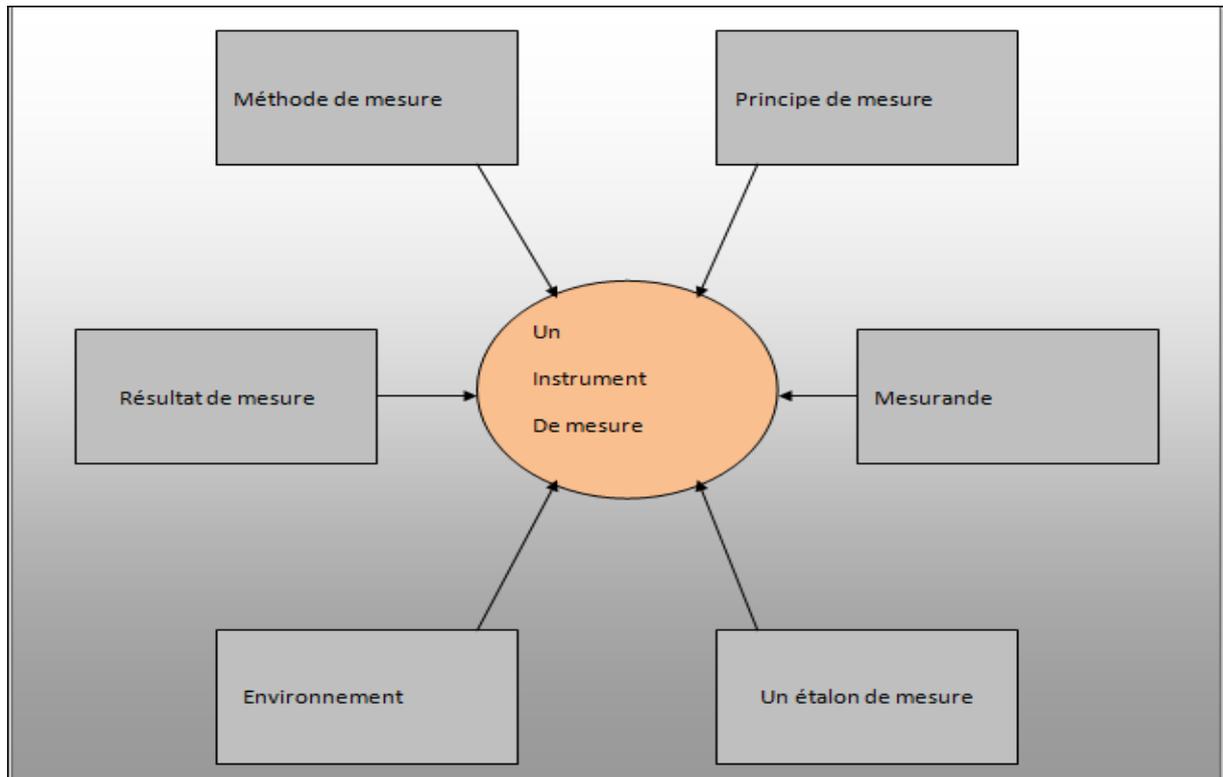


Figure 1.2. Procédure de mesure

1.5 Erreur de mesure

C'est l'écarte entre la valeur vraie et la valeur mesurée elle dépend en particulier des imperfections de la chaîne

L'erreur de mesure n'est jamais connue exactement sinon on pourrait corriger la mesure de son erreur pour retrouver la valeur réelle. En revanche, on peut dans la plupart des cas évaluer l'ordre de grandeur de l'erreur et en préciser un majorant, le but est bien entendu de les réduire au minimum.

1.5.1 Types d'erreur de mesure

Les erreurs de mesures se classent en trois principales catégories, en fonction de leur cause. Ces causes doivent être soigneusement identifiées afin de prévenir les erreurs.

a Erreur systématique

Ce sont des erreurs constantes ou qui changent lentement pour un mesurande donné, elles introduisent systématiquement le même décalage.

Leur origine provient généralement d'un dispositif inadapté ou mal utilisé le plus souvent, un examen attentif de la chaîne de mesure permet de les réduire.[5]

Par définition, l'erreur systématique

$$ERS = (\bar{m} - Mvrai) \quad (1.2)$$

Est une erreur qui prend la même valeur lors chaque mesure

Exemple :

- Erreur sur la caractéristique de l'instrument
- Erreur de l'exploitation des données brute de la mesure
- Erreur sur la valeur d'une grandeur de référence

Les principes origines de ces erreurs sont :

- Mauvaise référence
- Erreur sur les caractéristiques
- Mauvaise condition d'emploi
- Expression incorrecte des données

b Erreur aléatoire

Le meilleur estimateur de la valeur du mesurande est la valeur moyenne M_{moy} des N mesures. Mais une mesure mi parmi les N est en général différente de M_{moy} .

La différence $ERa = m - \bar{m}$ est appelée erreur aléatoire.[5]

Lors de chaque mesure l'erreur aléatoire peut prendre n'importe quelle valeur entre $(m_{max} - M_{moy})$ et $(m_{min} - \bar{m})$.

Est une erreur qui prend une valeur différente lors chaque mesure

Exemple :

- Erreur de lecture d'instrument à déviation
- Erreur de quantification d'un convertisseur A/N
- Erreur dues à la prise en compte par la chaine de mesure de signaux parasite de caractère aléatoire.

On peut évaluer l'effet de l'erreur aléatoire par la distribution statique de résultats de la série de mesurage m_i qui est caractérisée par l'écarte-type

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum(\bar{m} - m_i)^2}{n-1}} \quad (1.3)$$

$$\bar{m} = \frac{\sum m_i}{n} \quad (1.4)$$

La réduction des erreurs aléatoires passe par l'amélioration des composantes de la chaîne de mesure (convertisseur plus sensible, alimentations régulées) et par la protection de la chaîne (suspension anti vibration, filtrage des fréquences parasite, blindage électromagnétique).

c Erreurs accidentelles

L'apparition de ces erreurs comme leur amplitude et leur signe sont considérés comme des erreurs qui se produisent d'une manière aléatoire. Certaines des causes peuvent être connues mais les valeurs des erreurs qu'elles entraînent au moment de l'expérience sont inconnues.

Les causes de ces erreurs sont diverses, parmi ces erreurs on trouve :

- Erreurs liées aux indéterminations intrinsèques des caractéristiques instrumentales
- Erreur de mobilité, Erreur de lecture d'un appareil à déviation,
- Erreurs d'hystérésis, Erreurs de quantification d'un convertisseur analogique numérique.
- Erreurs dues à la prise en compte par la chaîne de mesure de signaux parasites de caractère aléatoire.
- Erreurs dues à des grandeurs d'influence.

L'importance de ces erreurs peut dans certains cas être réduite par des dispositifs ou des méthodes appropriées :

- ❖ Protection de la chaîne de mesure vis-à-vis des causes d'erreur.
- ❖ Utilisation de mode opératoire judicieux.

1.6 Chaîne de mesure

1.6.1 Définition

Est un ensemble d'éléments qui va intervenir pour traiter la grandeur physique avant qu'elle soit utilisée comme une information dans le processus, elle est nécessaire pour mesurer la valeur d'un mesurande ou l'évaluation d'un paramètre mesuré. Cette chaîne contient plusieurs appareils dans différentes étapes de traitement de l'information ou dans la captation la grandeur physique.

La chaîne de mesure est constituée par ces éléments :

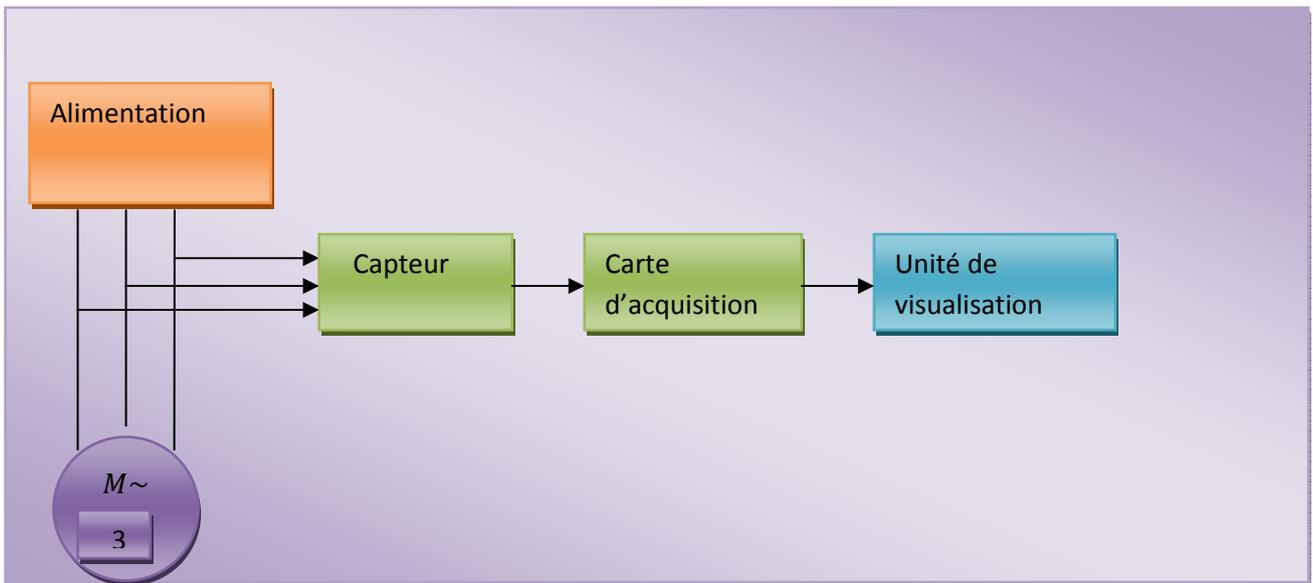


Figure 1.3. La chaine de mesure

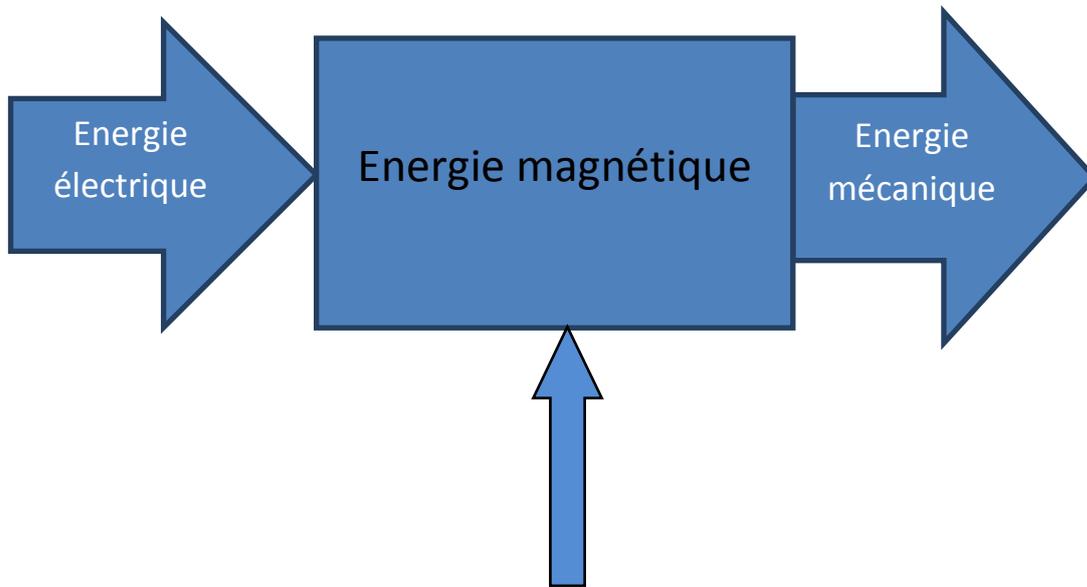
1.6.2 Moteur asynchrone

a Généralité

Les moteurs asynchrones triphasé sont des machines à courant alternative représentent plus 80% du parc moteur électrique, permettant de conversion d'énergie électrique en énergie mécanique « moteur », ou de permettre de transférer l'énergie mécanique en énergie électrique « générateur »[6]

Ces moteurs leurs utilisation est nombreuses dans les secteurs industriels et commerciale aussi dans le secteur domestique parce qu'il est facile à construire et parce qu'il est robuste, économique à l'achat, nécessitant que peu d'entretien de plus la vitesse de rotation est presque constante sur une large plage de puissance.

Le terme asynchrone vient du fait que la vitesse de rotation de rotors n'est pas fixée par la fréquence traversé le stator.



Moteur asynchrone

Figure 1.4. Schéma de principe.

b Symbole électrique

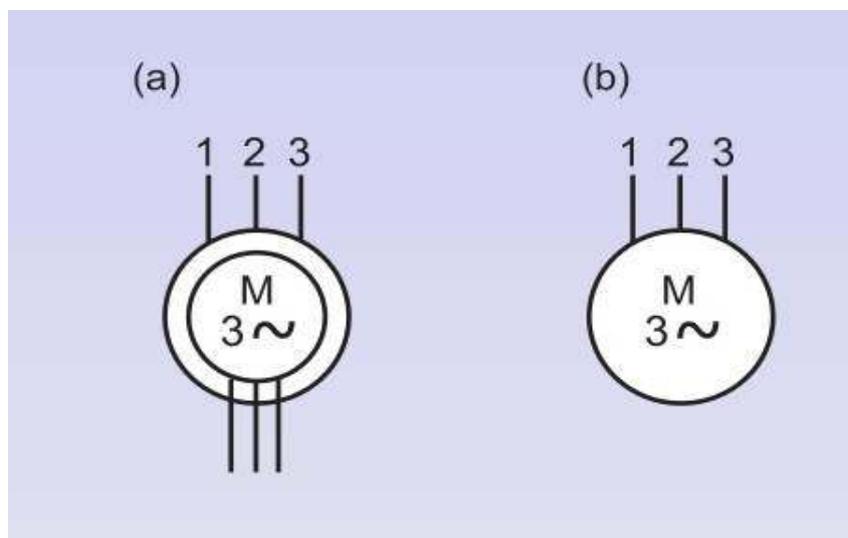


Figure 1.5. Symbole électrique

- (a): rotor bobiné. •(b) : rotor à cage d'écureuil.

c CONSTITUTION DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

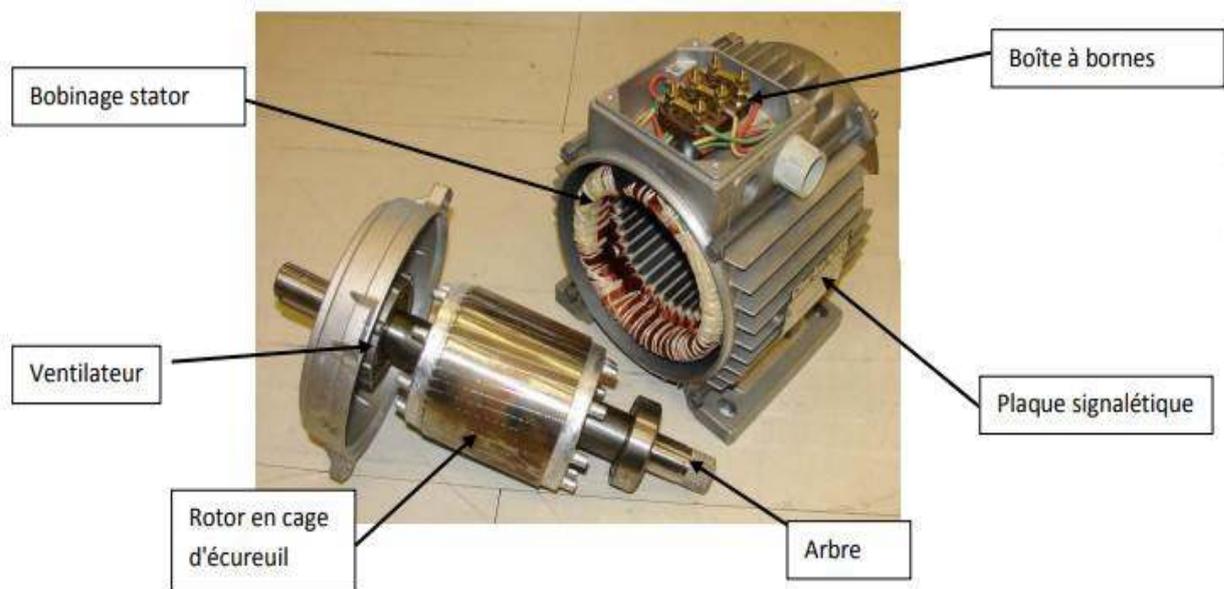


Figure 1.6. Constitution d'un moteur asynchrone triphasé

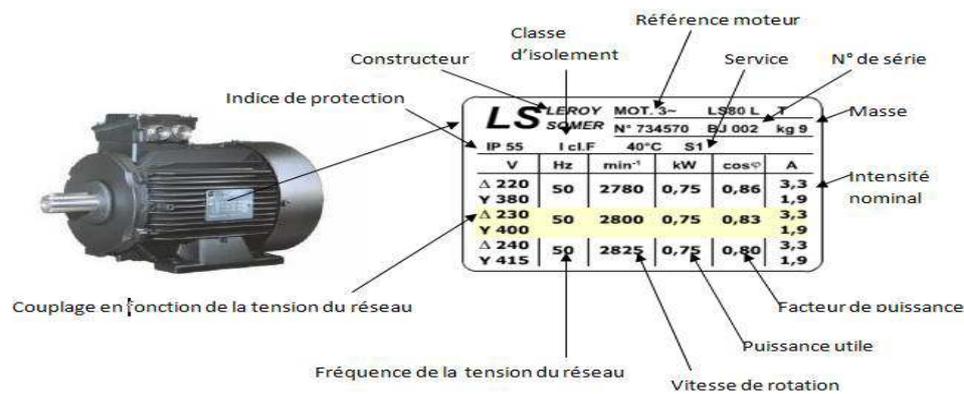


Figure 1.7. la plaque signalétique d'un moteur triphasé

1.6.3 Capteur

a Définition

Le capteur joue un rôle de plus en plus important car s'est eu qui permette de mesure la grandeur qu'on souhaite et aussi d'assurer la liaison entre le moteur asynchrone et la carte d'acquisition pour traiter la grandeur mesure.

b Caractéristique

B.1 Etendue de mesure (EM)

Ensemble des valeurs d'une grandeur à mesure pour lesquelles l'erreur de l'instrument de mesure est supposée maintenue entre des limites spécifiques. [7]

Exemple :

Un ampèremètre il peut avoir une étendue mesure entre 0,5 jusqu'à 3 A

$$EM = 3.5 A$$

b.2 Sensibilité :

La sensibilité est définie comme étant la variation de la grandeur de sortie par rapport la variation de la grandeur d'entrée (mesurande). [8]

$$Se = \frac{\Delta S}{\Delta E} \quad (1.5)$$

L'unité de la sensibilité est restée variante selon les grandeurs de sortie et d'entrée

Exemple :

Un ensemble des valeurs de mesure de la tension délivre par un instrument de mesure varié selon la température

Dans ce cas l'unité de la sensibilité est v/C° ((tension en v/température en C°)

B.3 Justesse

C'est l'amplitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique. [8]

B.4 Erreur de justesse de l'instrument

Erreur de justesse de l'instrument dépend de la qualité de fabrication de l'instrument [8]

B.5 Fidélité

C'est l'amplitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisinage lors d'application répétée de la même mesurande dans les mêmes conditions de mesure qui comprennent : [8]

- Même instrument
- Répétition d'une même période de temps
- Même environnement
- Même étalon
- Même méthode de mesure

b.6 Exactitude

- Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications proches de la valeur vraie d'une grandeur mesurée.
- L'exactitude est représentée la qualité globale de l'instrument, dans des conditions données.
[8]

b.7 Classe de précision

- C'est l'aptitude à satisfaire à certaines exigences d'applications métrologiques destiné à conserver les erreurs dans des limites spécifiques.
- La classe est désignée par un chiffre ou une lettre adoptée par convention.

b.8 Repetabilité

Ecart observé lors de mesurages successifs d'une même grandeur dans les conditions identiques

b.9 Reproductibilité

Ecart observé lors de mesurages successifs d'une même grandeur en faisant varier les conditions.

1.7 Conclusion :

Dans ce chapitre on a défini les termes fondamentaux de la métrologie et les différentes méthodes de mesure, en suite on a fait une étude sur les erreurs de la mesure, après on a présenté les différentes parties qui constituent notre chaîne de mesure et le banc d'essai de chaque grandeur mesurée.

Chapitre 2 L'incertitude et l'étalonnage

2.1 Introduction :

On a vu dans le premier chapitre les erreurs de mesure, dans la première partie de ce deuxième chapitre on va voir un autre terme qui est l'incertitude, ce terme plusieurs scientifiques le confondent avec l'erreur.

Dans la seconde partie on va définir l'étalonnage et les différentes procédures à suivre pour étalonner ensuite on va voir la différence entre la vérification et l'étalonnage.

2.2 Incertitude :

2.2.1 Définition :

Ce terme est lié au résultat de mesure, lorsque on fait une mesure la valeur vraie est inconnue qui implique l'utilisation de ce terme dans le mesurage, soit la mesure est faite avec un appareil numérique ou avec un appareil analogique, généralement pour déduire ou calculer le résultat de mesure on fait un intervalle pour la valeur mesurée en générale on écrit :

$$m - \Delta m < m < m + \Delta m \quad (2.1)$$

2.2.2 Évaluation de l'incertitude

Pour l'évaluation des incertitudes de mesure, on peut la faire l'opération avec des moyens statistiques, ce type est dit type A si ce n'est pas possible avec des moyens statistiques, donc dans ce cas on dit ce type est de B.

a. Incertitude type A

Dans ce type la grandeur est estimée à partir de faire une série statistique, on fait par exemple 20 mesures (m_1 jusqu'à m_{20}) pour la grandeur de mesure avec des mêmes conditions de mesure.[5]

Généralement on notera la série de mesure :

- la moyenne

$m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$, n enchantions de mesure (n nombre de mesure) après qu'on a fait une série de mesure de la grandeur, on suit on calcule la moyenne de cette série de mesure par cette formule 1.

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \quad (2.2)$$

- l'écarte type expérimentale.

Après qu'on a calculé la moyenne m_m on peut calculer une autre variance qui dit l'écarte type S_{exp} est calculé par formule 2.

$$S_{exp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

- l'incertitude type

3ème étape après qu'on termine les calculs de l'écarte type S_{exp} c'est l'incertitude type qui définit comme étant de l'écarte type σ sur la valeur moyennem m_m , on se calcule l'incertitude type S par la formule 3.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n}} S_{exp} \quad (2.4)$$

b. Incertitude de type B

- Quand on effectue une seule mesure, il faut estimer l'incertitude à partir de l'analyse des causes d'erreurs et évaluer l'incertitude associée à chaque source d'erreur.[5]

Certaines de ces erreurs aléatoires peuvent être estimées à partir de la notice du constructeur de l'appareil de mesure. On peut par exemple prendre en compte :

- La tolérance du constructeur
- La résolution de l'appareil (graduation, ou numérique)
- La précision de l'appareil

1-Mesure obtenue avec un appareil de tolérance connue

Lorsque la mesure est obtenue avec un appareil pour lequel le constructeur indique la tolérance t (notée t), l'incertitude peut se calculer de la façon suivante (*pour un niveau de confiance de 95%*) :

$$\Delta m = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot t \quad (2.5)$$

- **Incertitude de mesure de la lecture**

L'incertitude de lecture est due soit à une mauvaise vue, soit de mauvaises conditions de lecture ce genre d'incertitude est concernant les appareils analogiques, on peut distinguer deux types des incertitudes de lecture pour les appareils analogique et une seule incertitude de lecture pour les appareils de mesure numérique.[9]

-Appareils analogique

Lecture simple sur une échelle graduée

Lorsque la mesure est obtenue par lecture sur une échelle ou un cadran, l'incertitude de la mesure liée à la lecture est estimée à (*pour un niveau de confiance de 95%*) :

$$\Delta m = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot graduation \quad (2.6)$$

- **Lecture double sur une échelle graduée**

Lorsque la mesure nécessite une double lecture, les incertitudes liées à la lecture se cumulent ; l'incertitude de la mesure liée à la lecture est estimée à (*pour un niveau de confiance de 95%*) :[9]

$$\Delta m = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot graduation \quad (2.7)$$

Appareil numérique

- **Lecture sur un appareil numérique**

Pour un appareil numérique donnant une **précision p** de la mesure, on calcule l'incertitude à l'aide de la formule suivante (*pour un niveau de confiance de 95%*) :[9]

La précision correspond généralement à un pourcentage de la mesure lue sur l'écran

Et à un certain nombre de digit

$$\Delta m = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot p \quad (2.8)$$

Pour un appareil numérique n'indiquant pas la précision p, on calcule l'incertitude à l'aide de la formule suivante (pour un niveau de confiance de 95%)

$$\Delta m = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{digit}(2.9)$$

Quand un instrument est conforme à une classe $\pm a$, on aurait l'incertitude :

$$u_l = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

Lors d'un mesurage, il peut y avoir plusieurs sources d'erreurs, l'évaluation d'une incertitude dans le cas où ils à plusieurs erreurs se fait par :

$$u^2 = \sum u_1^2 + u_2^2 + \dots \quad (2.11)$$

S'il n'a pas d'indication il faut faire l'évaluation expérimentale de l'appareil.

Pour avoir l'incertitude élargie U (m), on applique cette relation :

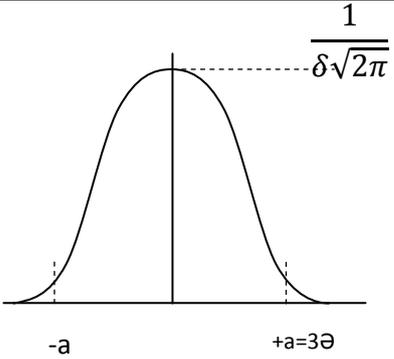
$$U(m) = K * u(m) \quad (2.12)$$

▪ **Facteur d'élargissement k**

NOTE : Le facteur d'élargissement *k* doit toujours être donné pour que l'incertitude-type de la grandeur mesurée puisse être retrouvée et utilisée dans le calcul de l'incertitude-type composée d'autres résultats de mesure qui pourraient dépendre de cette grandeur.

Dans la majorité des cas, lorsqu'on a une estimation de type B, on peut montrer que le coefficient d'élargissement *k* à retenir pour un niveau de confiance de 95 % est $k = 2$ et pour un niveau de confiance de 99 %, $k = 3$

▪ **Lois de probabilité usuelles : [10]**

Loi	Fonction du distribution	U(x)	Utilisation
Normale		$a/3$	Erreur dépendant d'un nombre important de paramètre, de faible effet individuel.

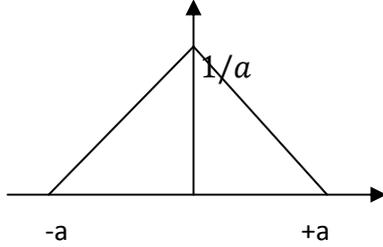
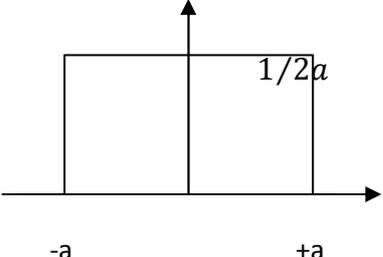
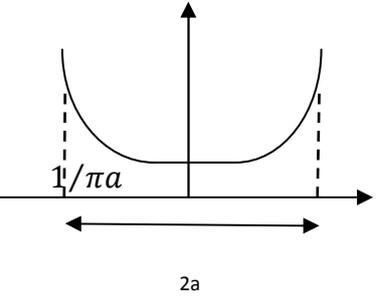
Triangulaire		$a/\sqrt{6}$	Erreur comprise entre deux limites avec faible probabilité d'atteindre ces limites.
Uniforme		$a/\sqrt{3}$	Résolution d'un indicateur numérique – hystérésis instruments vérifié conforme à une classe.
Dérivé Arc sinus		$a/\sqrt{2}$	Grandeur d'influence variant de façon sensiblement sinusoïdale entre d'extrémums

Tableau 2.1. Principales lois de probabilité, l'incertitude-type est exprimée en fonction de la demi-étendue α

c. Incertitude-type composée

Lorsque le résultat d'un mesurage est obtenu à partir des valeurs de plusieurs autres grandeurs, l'incertitude-type de ce résultat est appelée incertitude-type composée et notée u_c . C'est l'incertitude estimée associée au résultat et elle est égale à la racine carrée de la variance composée obtenue à partir de toutes les composantes de variances et covariances, de quelque manière qu'elles soient évaluées, en utilisant la loi de propagation de l'incertitude.[10]

d. Incertitude dans le cas d'une mesure indirect :

Dans le cas où la grandeur est obtenue par calcul, pour avoir l'incertitude on doit passer par les incertitudes des grandeurs utilisé dans le calcul.

Expression	Incertitude
$y = x_1 + x_2$	$\Delta y^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2$
$y = x_1 - x_2$	
$y = x_1 \times x_2$	$\left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 = \left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right)^2$
$y = \frac{x_1}{x_2}$	
$y = a x + b$	$\Delta y = a \times \Delta x$

Tableau 2.2. L'incertitude dans le cas d'une mesure indirect.

2.2.3 Sources d'incertitude

Nous pouvons résumer les sources des incertitudes comme suites :

- Disposition testée.
- Les étalons de référence.
- Méthodes de mesure.
- Processus de prise de mesure.
- Conditionnelles de l'environnement (la température, la pression ...).
- La qualité de mesure.

- **Evaluations les sources des incertitudes :**

Pour évaluer les incertitudes de mesures on utilise la méthode des 5M, cette méthode permet de ne rien oublier lors de l'intervenir.[11]

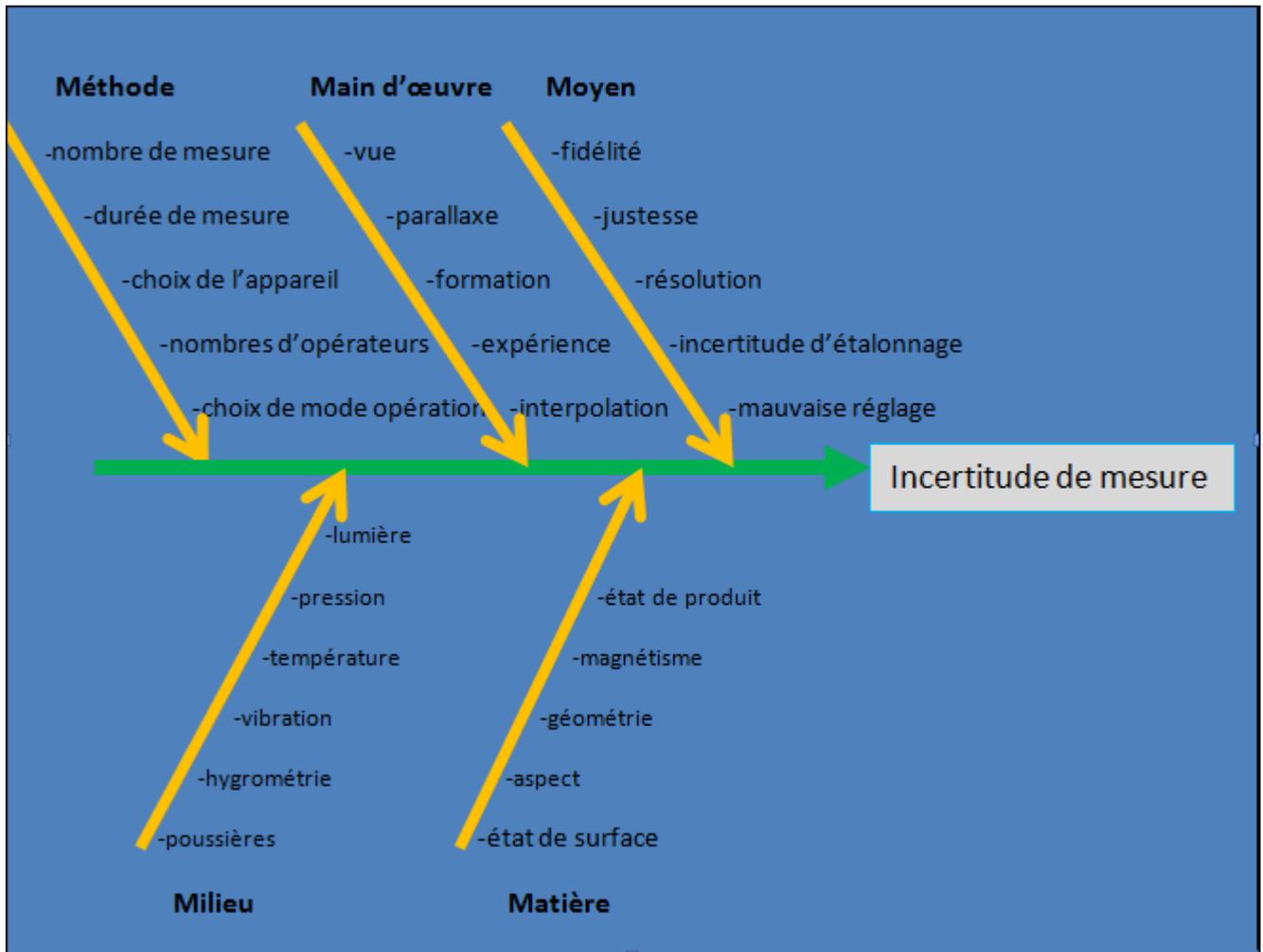


Figure 2.1. la méthode des 5M.

2.2.4 Détermination de l'incertitude d'étalonnage :

Il y a lieu de distinguer deux sources d'incertitudes

a Incertitude liée à la méthode et aux moyens d'étalonnage

Cette opération se fonde sur des essais techniques et sur une analyse objective des causes d'incertitudes. Cette incertitude est déterminée à partir de plusieurs composantes provenant notamment du montage, des étalons et des instruments utilisés, des conditions d'environnement.

b Incertitude liée à l'instrument à étalonner

Cette incertitude est déterminée à partir des caractéristiques propres de l'instrument dont notamment la fidélité et l'erreur de lecture ou de quantification.

En général, l'incertitude de mesure comprend plusieurs composantes. Certaines peuvent être estimées en se fondant sur la distribution statistique des résultats de séries de mesurage et peuvent

être caractérisées par un écart-type expérimental. L'estimation des autres composantes ne peut être fondée que sur l'expérience ou sur d'autres informations.

2.3 L'étalonnage :

Il est nécessaire de bien faire la distinction entre les termes étalonnage, ajustage et vérification. Les définitions du Vocabulaire International de Métrologie (VIM, 2012) sont reprises ci-après, afin de bien expliciter ces trois notions différentes. [2]

2.3.1 L'étalonnage :

C'est la comparaison des valeurs d'un instrument de mesure à celles d'un étalon, en associant les incertitudes. Cette comparaison permet d'estimer la justesse de l'instrument. Les valeurs obtenues par un étalonnage sont consignées dans un « certificat d'étalonnage ». Un étalonnage peut être réalisé à plusieurs points de l'étendue de mesure de l'équipement à étalonner. On obtient ainsi une courbe d'étalonnage.

Etalonnage selon la 3eme édition du vocabulaire international de métrologue (VIM) –concepts fondamentaux et génériques et terme associés [2]

Opération qui dans des conditions spécifiques, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associée qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication.

- Note 1 : Un étalonnage peut exprimer sous la forme d'un énoncé, d'une fonction d'étalonnage, d'un diagramme d'étalonnage, d'une courbe d'étalonnage ou d'une table d'étalonnage. Dans certains cas, il peut consister en correction additive ou multiplicative de l'indication avec une incertitude de mesure associée.
- Note 2 : il convient de ne pas confondre l'étalonnage avec l'ajustage d'un système de mesure, souvent appelé improprement « auto-étalonnage », ni avec la vérification de l'étalonnage.
- Note 3 : la seule première étape dans la définition est souvent perçue comme étant l'étalonnage.

2.3.2 Ajustage d'un système de mesure :

Ensemble d'opérations réalisées sur un système de mesure pour qu'il fournisse des indications prescrites correspondant à des valeurs données des grandeurs à mesurer [2]

- NOTE 1 Divers types d'ajustage d'un système de mesure sont le réglage de zéro, le réglage de décalage, le réglage d'étendue (appelé aussi réglage de gain).
- NOTE 2 Il convient de ne pas confondre l'ajustage d'un système de mesure avec son étalonnage, qui est un préalable à l'ajustage.
- NOTE 3 Après un ajustage d'un système de mesure, le système demande généralement à être réétalonné.

2.3.3 Etalon :

Un étalon est une matérialisation d'une grandeur donnée dont on connaît la valeur avec une grande exactitude. Un étalon sert à étalonner d'autres étalons ou des instruments qui mesurent la même grandeur, donc il existe pour chaque grandeur à mesure un étalon ; C'est une **référence**, avec une valeur et une incertitude, à laquelle on se compare pour établir la justesse et la traçabilité de ses résultats. Plus l'incertitude de l'étalon est faible, meilleure est sa qualité. On va de l'étalon de travail (grande incertitude) à l'étalon primaire (très faible incertitude). [12]

a Choix l'étalon utilisé

Le choix des étalons à utiliser pour vérifier l'étalonnage est important. Il est important de définir quel type d'étalon choisir, le nombre et les valeurs nominales de ces étalons. [12]

b Types d'étalon

Il existe plusieurs types d'étalon : [12]

- Etalon primaire : étalon établi à l'aide d'une procédure de mesure primaire ou créé comme objet par convention.
- Etalon secondaire : étalon établi par l'intermédiaire d'un étalonnage par rapport à un étalon primaire d'une grandeur de même nature.
- Etalon de travail : étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des instruments de mesure ou des systèmes de mesure.

2.3.4 Certificat d'étalonnage :

Un certificat d'étalonnage est un relevé de mesure par rapport à un étalon de référence utile fournit à l'utilisateur le résultat de son étalonnage, lui permettant de prendre en compte les écarts de justesse lors de son utilisation. En pratique, on compare l'instrument de mesure à un étalon. Pour

chaque point de test on note la valeur affichée par l'appareil, la valeur fournie par l'étalon et l'incertitude sur la valeur fournie par l'étalon.

Chaque étalon acheté doit être accompagnée d'un certificat. Les informations sur un certificat doivent inclure à minima :

- La valeur nominale de l'étalon avec son incertitude associée en%
- La date de péremption
- L'organisme accréditeur si la préparation de la solution est réalisée sous accréditation
- La traçabilité métrologique
- Le matériau de référence utilisé pour le raccordement au système international des unités (SI)
- Les conditions d'étalonnage
- Les résultats de l'étalonnage : valeur et incertitude (dans la même unité), autre indication pertinente comme la température de référence pour la conductivité

Le certificat peut aussi inclure en plus des informations sur :

- Les tests d'homogénéité.
- La composition de l'étalon.
- La préparation de l'étalon.
- Les conditions de stockage.
- Les conditions d'utilisation conseillée.
- Les coefficients de température à appliquer si nécessaire (par exemple pour la conductivité).

Dans le cas de la préparation des étalons par l'opérateur, un mode opératoire doit être disponible et toutes les opérations, ainsi que les réactifs avec leur niveau de pureté utilisés, doivent être consignés sur un support adapté (cahier de laboratoire par exemple).

Idéalement, des étalons secondaires, qui permettent le raccordement au système international des unités (SI), doivent être préférentiellement utilisés s'ils sont disponibles à un coût acceptable.

Cependant, des étalons de travail peuvent être utilisés pour les vérifications de routine afin d'optimiser les coûts.

2.3.5 Ban d'étalonnage

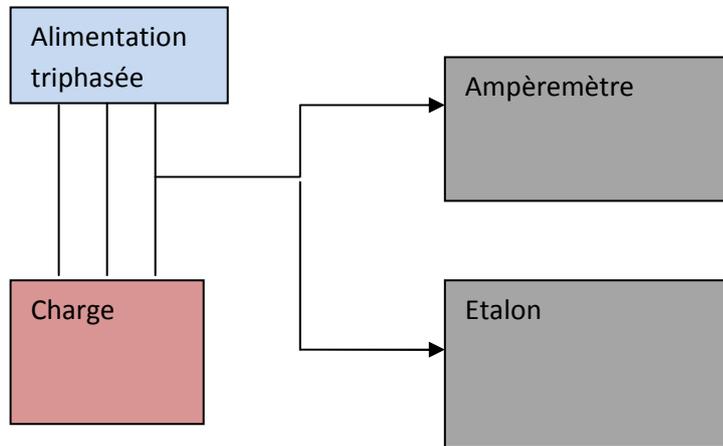


Figure 2.2. Le ban d'étalonnage.

2.3.6 Déroulement l'opération de l'étalonnage

L'étalonnage consiste à appliquer une série de mesure du courant par exemple d'A1 jusqu'à A10 par un étalon de référence à un instrument de mesure (ampèremètre) et à relever les indications correspondantes a_1 jusqu'à a_{10} , mesurée par ampèremètre une fonction FF est alors choisie comme approximation de la relation entre étalon et ampèremètre. Cette fonction est choisie soit :

- Par la théorie si une relation physique entre étalon et l'ampèremètre.
- À partir de la répartition des points (x_i, y_i) représentés sur une courbe de dispersion s'il n'y a pas de théorie permettant de relier entre étalon et ampèremètre.

Cette fonction qui lie entre les points de mesures de l'étalon et l'ampèremètre s'exprime sous la forme :

$$y = f(x_i) + b$$

2.3.7 Tableau d'étalonnage :

La table d'étalonnage est constituée par deux colonnes ou deux lignes. Une pour les valeurs de l'étalon x_i et l'autre pour les mesures de l'instrument qu'on veut l'étalonner. Chaque fois que l'opérateur fait une mesure il les note dans un tableau pour faciliter de traçage de la courbe.

2.3.8 Courbe d'étalonnage :

Après que l'opérateur ait terminé l'opération de mesure et de créé un tableau de mesure, il est facile de tracer la courbe d'étalonnage, voir figure (2.3). Pour tracer cette courbe, on met sur l'axe d'abscisse les valeurs des indications x_i acquises par l'instrument qu'on veut l'étalonner et sur l'axe ordonné l'étalon y_i . Pour créer la courbe d'étalonnage on utilise l'Excel. Finalement, on détermine l'équation de la droite.

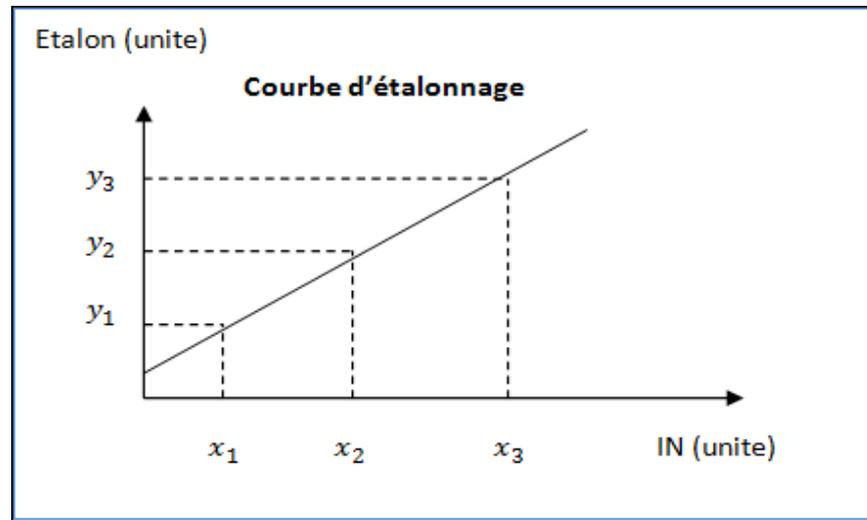


Figure 2.3. La courbe d'étalonnage.

2.3.9 méthodologie d'estimation de la fonction d'étalonnage et de l'incertitude associée :

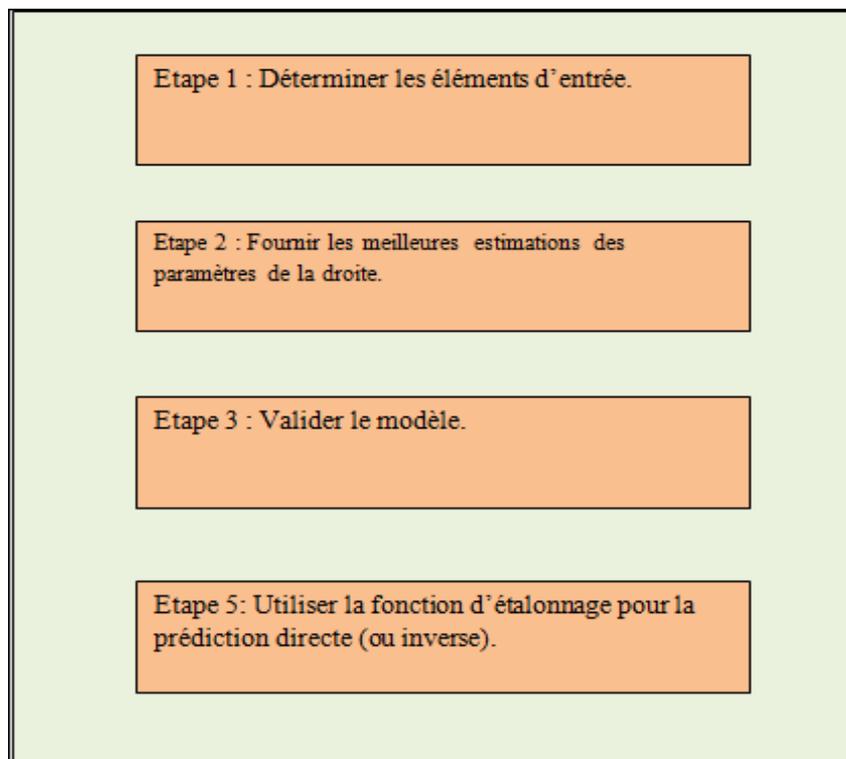


Figure 2.4. La méthodologie d'estimation de la courbe d'étalonnage.

La norme XP ISO/TS 28037 :2010 est applicable dans le cas de modèles linéaires. Nous tenterons, néanmoins, dans la suite de l'article de s'inspirer de cette méthodologie pour les autres types de modélisation. [19]

Les fonctions d'étalonnage linéaire, c'est-à-dire une droite, qui décrivent la relation entre deux variables X et Y , notamment les fonctions de la forme $Y = A + BX$. Bien que de nombreux principes s'appliquent à des types de fonction d'étalonnage plus généraux, les approches décrites utilisent dans la mesure du possible cette forme simple de la fonction d'étalonnage linéaire.

2.4 Vérification

Confirmation par examen et établissement de preuves que les exigences spécifiées ont été satisfaites. Le résultat d'une vérification se traduit par une décision de remise en service, d'ajustage, de réparation, de déclassement ou de réforme ».

La vérification permet de s'assurer que les écarts entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure et les valeurs connues correspondantes d'une grandeur mesurée sont toutes inférieures aux erreurs maximales tolérées (EMT).

2.4.1 Vérification :

Fourniture de preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées.[2]

- NOTE 1 S'il y a lieu, il convient de prendre en compte l'incertitude de mesure.
- NOTE 2 L'entité peut être, par exemple, un processus, une procédure de mesure, un matériau, un composé ou un système de mesure.
- NOTE 3 Les exigences spécifiées peuvent être, par exemple, les spécifications d'un fabricant.
- NOTE 3 La vérification en métrologie légale, comme définie dans le VIML, et plus généralement en évaluation de la conformité, comporte l'examen et le marquage et/ou la délivrance d'un certificat de vérification pour un système de mesure.
- NOTE 5 Il convient de ne pas confondre la vérification avec l'étalonnage. Toute vérification n'est pas une validation.

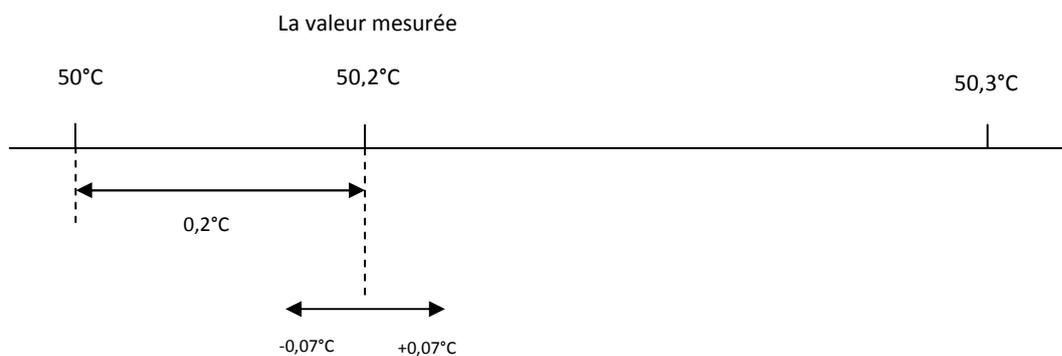
Voici quelques exemples sur la vérification :

- Confirmer qu'un matériau de référence donné est bien conforme aux déclarations.

- Confirmation que des propriétés relatives aux performances ou des exigences légales sont satisfaites par un système de mesure.
- Confirmation qu'une incertitude cible peut être atteinte.

On donne un autre exemple plus détaillé sur la vérification :

Un exemple sur la calcul de la température avec un thermomètre ; on a un liquide qui se fait chauffer par un chauffage à une température qui doit être de $50^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ (Erreur maximale toléré est de 0.3°C). On veut savoir s'il est conforme ou non ? On vérifie la température à l'aide de notre thermomètre qui est étalonné et qui a une incertitude de $0,07^{\circ}\text{C}$, la valeur affichée sur le thermomètre est de $50,2^{\circ}\text{C}$.



Pour vérifier la conformité à l'EMT, il faut vérifier que la somme de valeurs absolues de l'erreur de mesure et de l'incertitude est inférieure à la valeur de l'erreur maximale tolérée.

$$|\text{Erreur de mesure}| + \text{Incertitude d'étalonnage} < \text{EMT}$$

$0.2 + 0.07 < 0.3$ donc le chauffage est conforme

2.4.2 constat de vérification

Le constat de vérification est le document qui atteste de cette vérification de l'instrument de mesure. Le constat de vérification inclut la conformité des résultats par rapport à des exigences définies ainsi que d'autres informations importantes relevant de l'étalonnage, comme les équipements utilisés, les conditions environnementales, les incertitudes de mesures, la date d'étalonnage, le numéro du document, etc. La présentation des valeurs d'étalonnage n'est pas une obligation dans le constat de vérification.[13]

2.5 Différence entre l'étalonnage et la vérification

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

Dans l'étalonnage on connaît quelques caractéristiques de l'instrument, cependant dans la vérification on connaît que notre instrument à une erreur petite qu'une valeur définie a priori.

L'étalonnage ne permet pas de prendre une décision de conformité par contre la vérification c'est la seule qui le permet.[13]

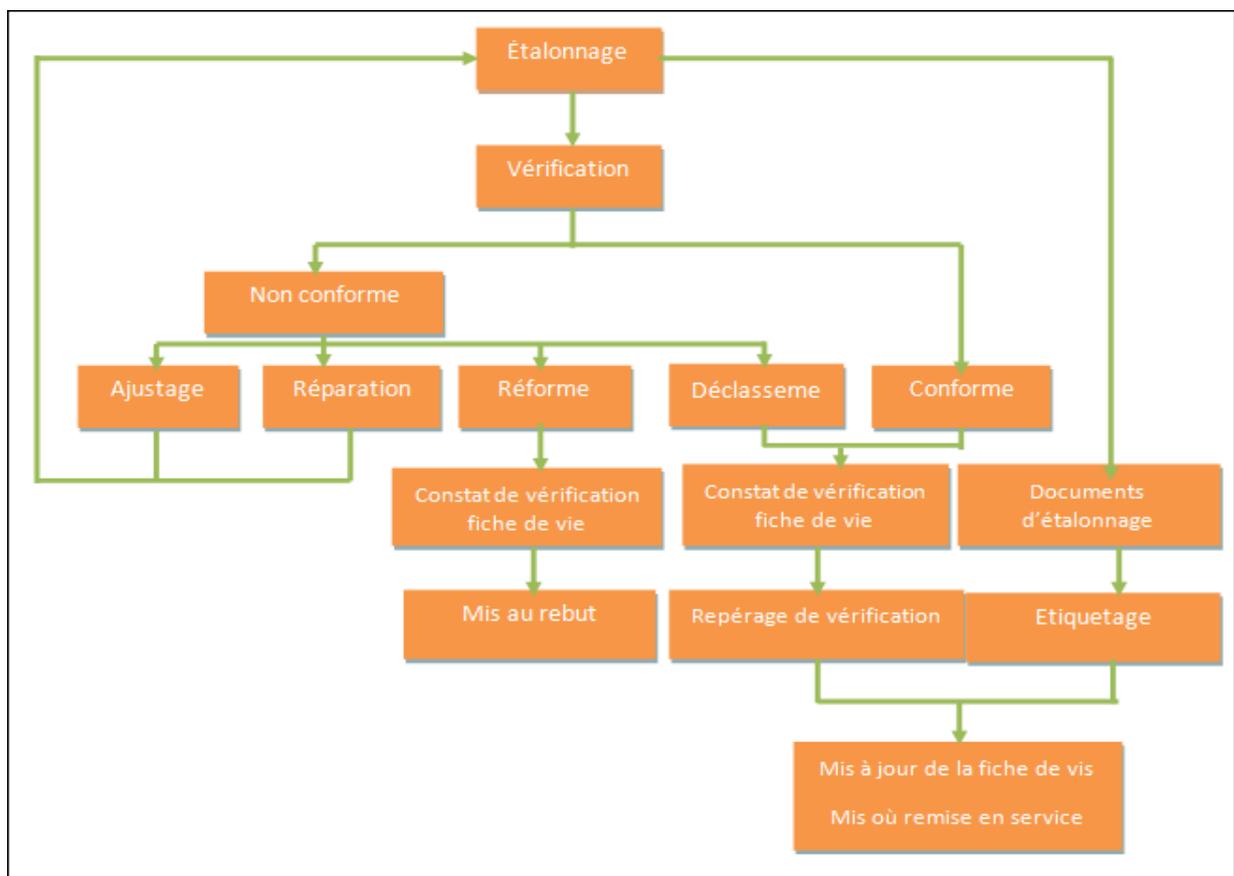


Figure 2.5. La différence entre l'étalonnage et la vérification.

2.5.1 choix entre étalonnage et vérification

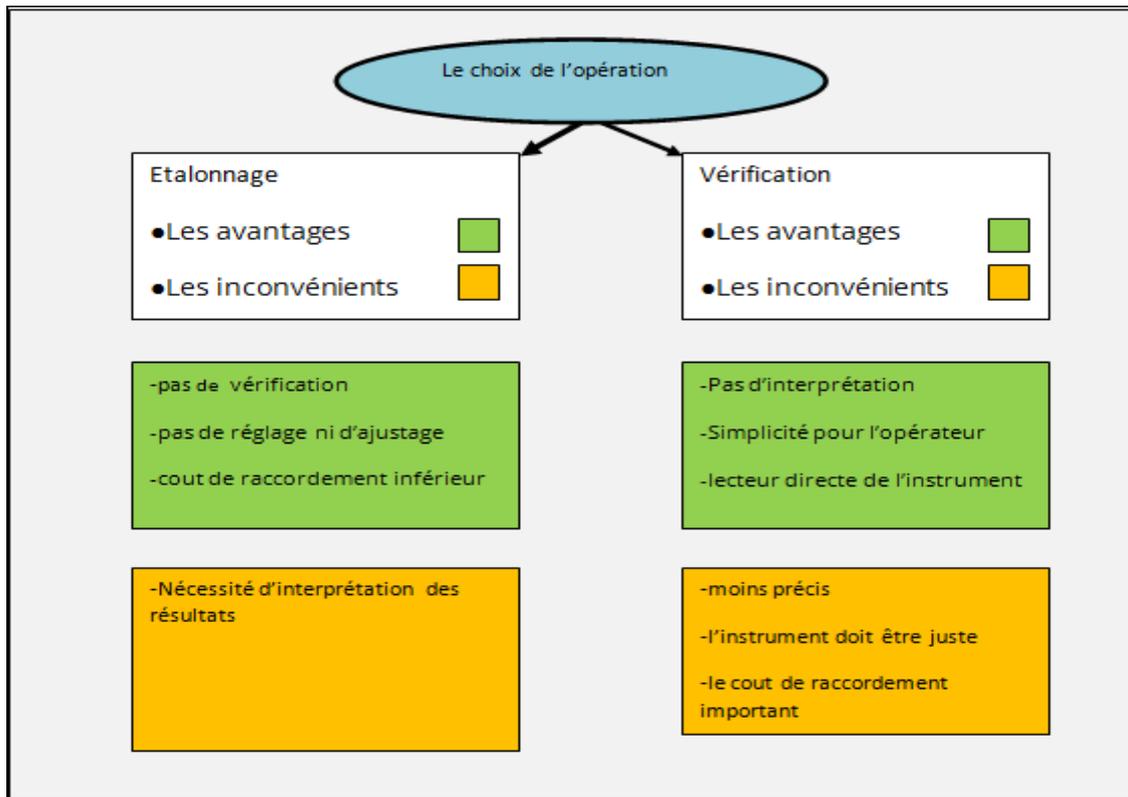


Figure 2.6. Le choix entre l'étalonnage et la vérification.

2.6 Conclusion :

Un étalonnage permet d'estimer l'erreur de l'instrument, et en cas de défaut de justesse, de la compenser en appliquant une correction.

La vérification permet de confirmer que l'erreur de mesure reste plus petite qu'une tolérance appelée erreur maximale tolérée (EMT). L'erreur maximale tolérée est définie par l'utilisateur comme étant la plus grande erreur qu'il est prêt à accepter.

Certains font la distinction entre l'étalonnage qui est du domaine de la connaissance (on connaît certaines caractéristiques de l'instrument) et la vérification qui est du domaine de la confiance (on sait que l'instrument a une erreur plus faible qu'une valeur définie a priori).

Un étalonnage conduit à l'émission d'un certificat d'étalonnage, et la vérification à l'émission d'un constat de vérification.

L'étalonnage ne donne pas lieu à une décision de conformité, seule la vérification permet un jugement, une décision

Chapitre 3 Etude du banc d'essai

3.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre c'est de faire l'étalonnage de notre chaine mesure.

Initialement, nous présentons les trois composants essentiels de notre banc d'essai du Labset et l'appareil d'étalonnage. Une brève description de la carte d'acquisition "Dspace" et du capteur à effet Hall qui a pour rôle de mesurer les courants et les tensions, a été donné. Ensuite, l'analyseur de réseau électrique de type chauvin Arnoux 8332, qui constitue l'appareil étalon,est présenté.

Aux cours de ce chapitre, on va expliquer les démarches pour faire l'étalonnage afin d'ajuster les différents capteurs. A partir des relevés de mesure, on effectue une illustration graphique des courbes d'étalonnage à l'aide d'un tableur Excel.

3.2 Logiciel d'acquisition des données de mesure

Cette partie est consacré pour définir le logiciel d'acquisition des données de mesure de l'instrument d'étalonnage et la carte d'acquisition qui va lier entre différents capteurs et le pc.

3.2.1 Analyseur de réseaux électrique triphasé, Chauvin Arnoux

C'est un outil de mesure de plusieurs paramètres tension, courant et la puissance.Onpeut capturer l'écran et enregistrer en temps réel tous les paramètres, pour exploiter les résultats de mesure sous forme d'histogrammes, de tableau et de graphe selon les besoins de l'utilisateur par logiciel qualistarview v2.6 [14].

On a utilisé un analyseur de modèle C.A 8332b qui est facile à utiliser, compact et résistant aux chocs ; il permet aux techniciens et aux ingénieurs de mesurer etd'effectuer des diagnostics et

des travaux de qualité de l'énergie sur un réseau monophasé, biphasé ou triphasé. L'instrument est selon la norme IEC 663-1 classe B. Quelques caractéristiques de cet appareil sont données ci-dessous.

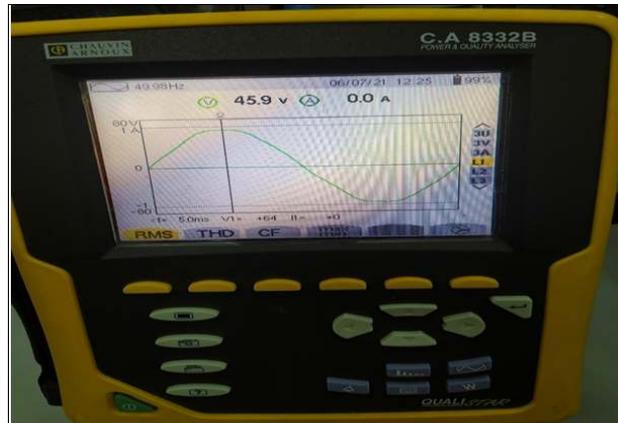


Figure 3.1. le modèle C.A 8332B de Chauvin Arnoux

a Caractéristiques des grandeurs de mesure [14]

- Tension TRMS AC+DC
- Tension simple jusqu'à 480 V
- Tension composée jusqu'à 830 V
- Courant TRMS AC+DC jusqu'à 3000 A selon capteurs utilisés
- Tension et courant Perak
- Fréquence de 40 à 70 Hz
- Harmonique en tension, courant ou puissance jusqu'au rang
- Courant mesure selon le capteur utilisé :
 - Pince MN : de 2 A jusqu'à 230 A
 - Pince C : de 3 A jusqu'à 1300 A
 - PAC :
 - de 10 A jusqu'à 1000 A courant alternatif (AC).
 - ❖ De 10 A jusqu'à 1300 A courant continu (DC).

b Taches de l'appareil [14]

- Traitement graphique.
- Enregistrement, datation et caractéristiques des perturbations.
- Stockage des données.
- Mémorisation d'écran.
- Communication filaire optique.

Une connexion de l'instrument CA8332 à un ordinateur est exécutée. Nous configurons, ensuite l'instrument et les données sont affichés en temps réel. Une session d'enregistrement, de téléchargement des enregistrements et de création des rapports à partir de ces données sont effectués.

3.2.2 Présentation des logiciels

Dans cette partie nous présentons le logiciel data view et power analyzer transfer et leurs principales fonctionnalités.

a) logiciel Data View

Le logiciel DataView est un outil puissant de configuration, de transfert et de traitement des données de mesure pour une gamme étendue d'appareils de mesure Chauvin Arnoux. La suite DataView regroupe l'éditeur de rapport DataView, ainsi que les applicatifs Data Logger, PEL Transfer, PAT, PAT2, GTC, GTT, ICT, DTR, SLII, MEG et MOT.

Avec DATA VIEW on peut :

- ❖ Connecter un pc à l'instrument.
- ❖ Télécharger les données précédemment enregistrées à partir de l'instrument.
- ❖ Afficher et analyser les données sur le pc via une interface de style cadres.
- ❖ Générer des rapports pour visualiser et imprimer les données, en utilisant des modèles standard ou ceux que nous personnalisons selon nous besoin.
- ❖ Exporter les données vers une feuille de calcul compatible Microsoft Excel.
- ❖ Data view nous permet également de configurer l'instrument à partir du pc, via une interface de panneaux de commande dédiée.

DATA view comprends un ensemble de fonctionnalités de base utilisée par tous les instruments, ces fonctionnalités sont conçues pour afficher des données et pour ouvrir, créé et enregistrer des

rapports DATA VIEW.

DATA VIEW comprends également des panneaux de contrôle pour interagir avec l'instrument. Le panneau de commande nous permet de se connecter à l'instrument, de télécharger des données et de configurer les paramètres de l'instrument à partir du pc. [15]

b) Logiciel Power analyzertrensfer, PAT-v3.08.0018

C'est un logiciel informatique pour d'acquisition des données de mesure soit des graphes, des courbes ou des tableaux pour les traités selon l'opérateur, et aussi on peut visualiser sur la fenêtre de logiciel au lieu sur l'appareil de mesure.[15]

3.2.3 Carte d'acquisition DSPACE

A) GENERALITE

La carte Dspace est une interface entre le pc de commande et le circuit d'attaque et les systèmes de convertisseur, interface série capteur...etc. Les systèmes DSPACE sont utilisés dans plusieurs applications nécessitant un pilotage en temps réel, leur programmation se fait à l'aide de l'outil de modélisation SIMULINK, Elle dispose d'une interface logicielle pour la carte contrôleur basé sur MATLAB Simulink. Une fois le modèle Simulink est terminée, le logiciel DSPACE pourra le convertir en code DSP.Puis il télécharge le code de la carte contrôleur, et exécute le programme en temps réel. Le logiciel DSPACE dispose également d'outils à afficher et à stocker des données et paramètres de changement [16].



logiciel de MATLAB/Simulink, on peut visualiser les différentes grandeurs mesurées par les capteurs.

3.2.5 Capteurs à effet hall

On a trois appareils de mesure de courant et de tension :

➤ **MCV3 MESURE DE COURANT/VOLTAGE POUR CONTROLE MOTEUR AVEC DSPACE:**

Le MCV3 est un appareil de mesure de courant et de tension qui utilise deux capteurs à effet Hall isolés, capable de mesurer unetension et deuxcourants CA et CC très élevé.



Figure 3.3.Capteur MCV3 de courant et tension

Le MCV3 dispose des capteurs nécessaires pour le convertisseur électronique de puissance (VOC, DPC ...) et le contrôle de moteur triphasé (FOC, DTC ...). Le MCV3 possède des sorties de signaux de tension analogiques qui varient linéairement avec la tension et le courant détectés. L'appareil est également compatible avec uTECH-SRT, toutes les cartes uTECH MCU (ARM, DSP, FPGA ...) et les cartes dSPACE (DS1103, DS1103 ...)

➤ **MV3 MESURE DE VOLTAGE POUR LA CARTE CONTROLEUSE DSPACE R&D**

Le MV3 est un appareil de mesure isolé de tension qui utilise un capteur à triple Hall-effect. Il est capable de mesurer jusqu'a trois hautes tensions.



Figure 3.4.Capteur MV3 de tension

Le MV3 a des sorties de signal de tension analogique qui varient linéairement avec la tension détectée. L'appareil est également compatible avec uTECH-SRT, toutes les cartes uTECH MCU (ARM, DSP, FPGA ...) et les cartes Dspace (DS1103, DS1103 ...).

➤ **MC3 MESURE DE COURANT POUR CARTE CONTROLEUSE DSPAC :**

Le MC3 est une carte de capteur de courant à triple Hall-effect capable de mesurer le flux bidirectionnel du courant.



Figure 3.5.Capteur MV3 de courant

Ce capteur peut être utilisé dans les systèmes CA et CC nécessitant une isolation du circuit mesuré. L'appareil peut survivre jusqu'à 5 fois à des conditions de surintensité. Le MC3 possède des sorties de signal de tension analogique qui varient linéairement avec le courant détecté. L'appareil est également compatible avec uTECH-SRT, toutes les cartes uTECH MCU (ARM, DSP, FPGA ...) et les cartes Dspace (DS1103, DS1103).

3.3 Description du banc de mesures :

Le schéma synoptique du banc de mesures réalisé est donné par la figure suivante :

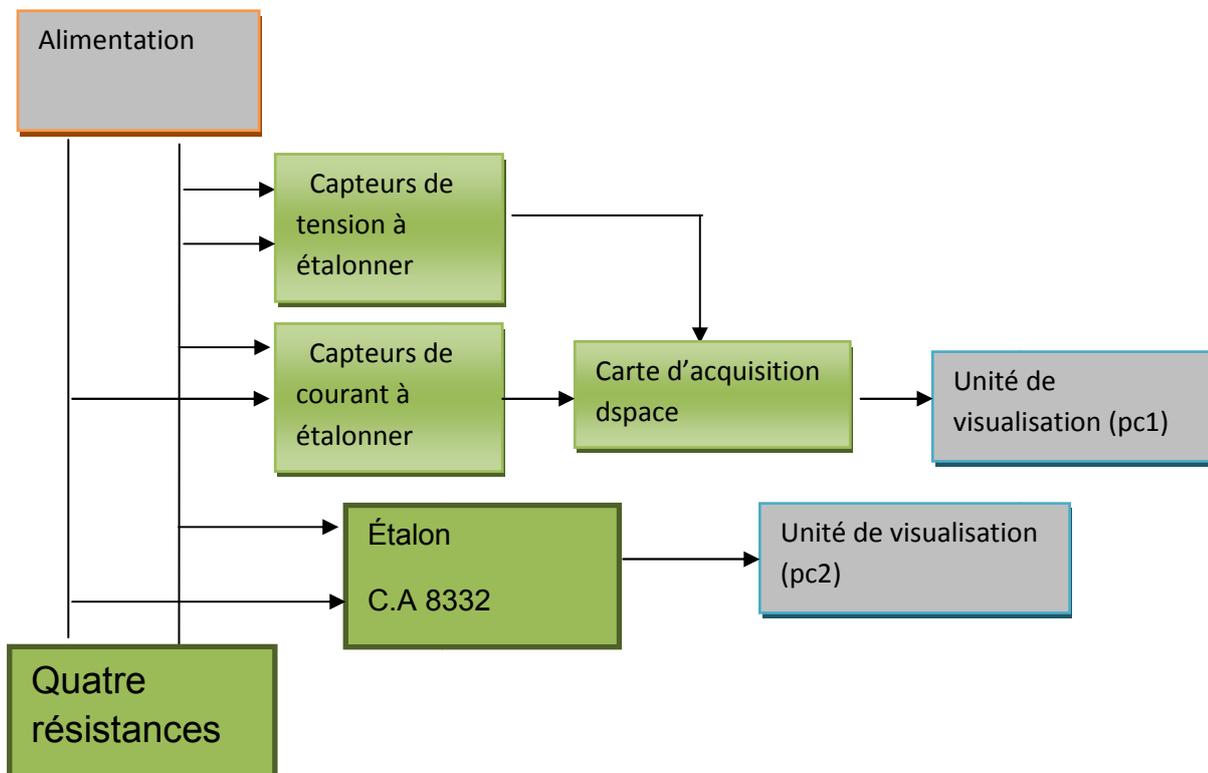


Figure 3 .6. Schéma synoptique du banc de mesure

Le banc d'essai est composé des parties suivantes voir figure (3.7):



Figure3.7 Photo du banc d'essai

➤ Une source triphasée :

L'alimentation est en régime sinusoïdale permanent. La fréquence d'alimentation est de 50 Hz.

❖ Capteurs à étalonner :

C'est les capteurs à effet hall qui permet de mesurer les courants et les tensions, voir figure (3.8).

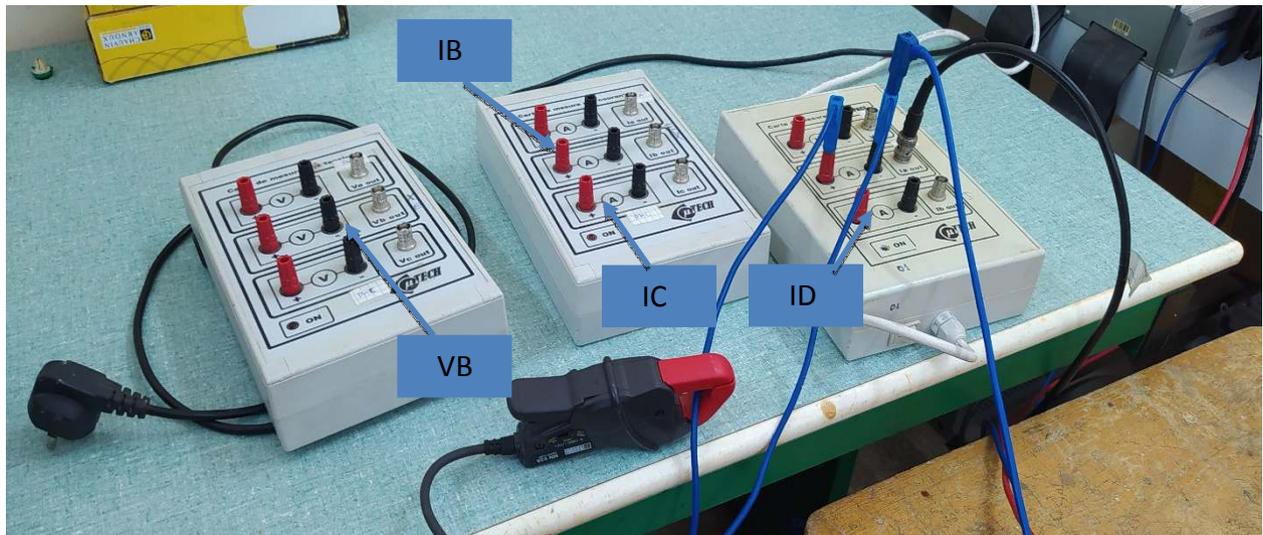


Figure3.8 :capteur à effet hall

❖ Carte d'acquisition Dspace :

Une interface entre le pc de visualisation et le capteur à effet hall, voir figure (3.9).



Figure3.9 :carte d'acquisition Dspace

❖ Etalon :

C'est le modèle C.A 8332B de chauvin Arnoux qu'on l'utilise comme capteur pour mesurer la tension et le courant, voir figure (3.7).

❖ Les deux unités de visualisation

Les deux pcs ont pour rôle d'analyser, de traiter et d'afficher les résultats, voir figure (3.10).

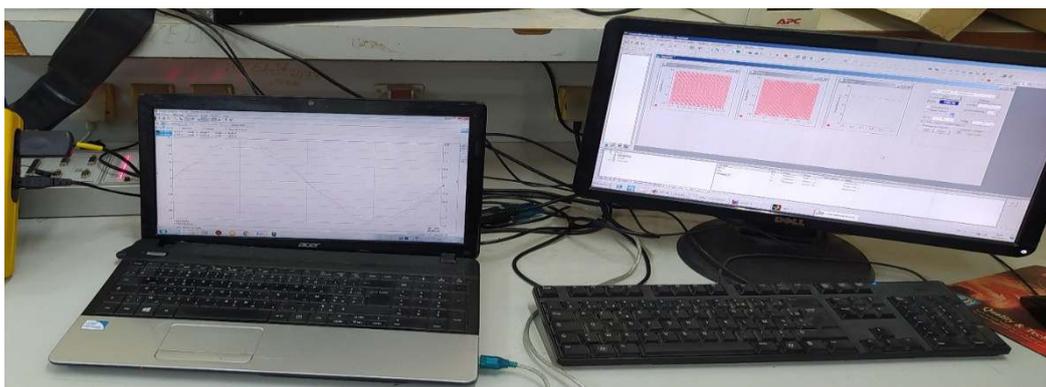


Figure 3.10 : deux unités de visualisation

- ❖ Les quatre résistances :
 - Les quatre résistances remplacent le moteur asynchrone, pour augmenter l'étendue de mesure.
 - Courant maximale de cette résistance est de 13A.
 - Le raccordement entre ces résistances est deux en série avec un raccordement en parallèle avec les deux autres résistances qui sont en série entre eux, voir figure (3.11).



Figure 3.11 : les quatre résistances

3.4 Résultats expérimentaux des essais

Dans cette partie les séries de mesures des courants et des tensions sont relevés via Dspace et via l'analyseur Chauvin Arnoux. Ces données sont transférées vers Excel pour entamer les étapes de calcul pour l'étalonnage des différents capteurs. Les résultats de calcul des erreurs sont élaborés.

Après avoir mesuré les valeurs courant ou tension via les différents capteurs de tension ou de courant, la carte Dspace convertira ces valeurs de l'analogique au numérique. Nous suivons un programme que nous avons réalisé sur Matlab pour importer les données et les traiter. Chaque mesure faite, la carte Dspace nous fournira 1000valeurs, selon notre besoin on prend une seule valeur qui correspond à la valeur maximale de la mesure. D'un autre côté on a les valeurs mesurées simultanément trouvé par l'analyseur Chauvin Arnoux, cet analyseur nous fournit dans une seule mesure 256 valeur, la valeur qui nous intéresse et aussi celle qui correspond à la valeur maximale.

3.4.1 Capteur de courant ID :

Notre but c'est d'étalonner un instrument de mesure. On commence par une série de mesures, une fois collecté, on représente ces derniers dans un nuage de points, afin de mettre une hypothèse de modélisation. Pour étalonner le capteur ID, on a fait 13 mesures. On a pris les mesures relevées via la carte Dspace (correspond aux mesures de la chaîne que l'on souhaite étalonner) et simultanément on a pris aussi les mesures à partir de Chauvin Arnoux que l'on prendra comme étalons.

a) L'étalonnage et modélisation :

Le tableau (3.1) donne les 13 mesures effectuées ; ce tableau affiche les valeurs maximales de chaque mesure.

etalon	Valeur de l'indication de capteur ID
--------	--------------------------------------

0	0
1,4133	0,0791
2,79429	0,1514
4,1536	0,2226
5,5669	0,2978
6,991	0,373
8,3935	0,4463
9,7097	0,5142
11,1015	0,5952
12,5903	0,6694
13,9389	0,7412
15,363	0,8164
16,7007	0,8882
18,1464	0,9639

Tableau 3- 1 mesures du courant ID avec l'étalon et Dspace

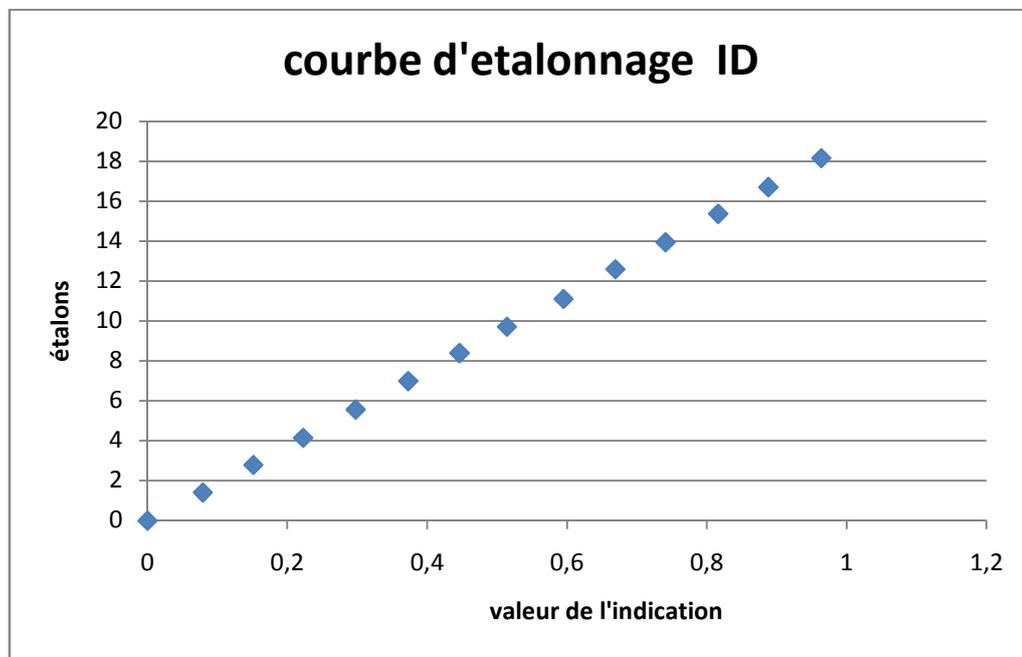


Figure 3-12 : nuage de point pour réaliser la courbe d'étalonnage

On suppose une droite pour trouver un ajustement pour ce nuage de points et on calcule l'équation de cette droite qu'on l'appelle une courbe d'étalonnage.

Courbe d'étalonnage : c'est l'expression de la relation entre une indication et la valeur mesurée correspondante. Une courbe d'étalonnage exprime une relation biunivoque qui ne fournit pas un résultat de mesure puisqu'elle ne contient aucune information sur l'incertitude de mesure

On modélise alors ce nuage de points sous la forme $m = a \cdot IN + b$

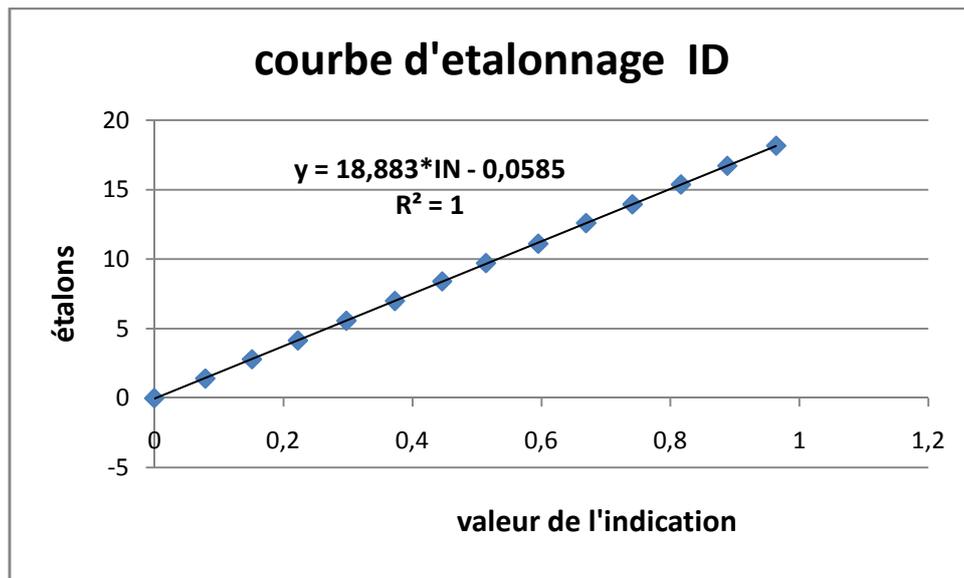


Figure 3-13 Courbe d'étalonnage pour le capteur ID

On obtient le gain: $G_{ID} = a = 18,886$

L'équation de la courbe d'étalonnage est :

$$m = 18,883 * IN - 0,0585(3.1)$$

L'estimation de la sensibilité S , est donné par la pente de la droite obtenue et $S = 18,883$

Remarque

Les incertitudes associées aux valeurs des étalons sont infiniment plus faibles que les incertitudes associées aux indications, donc on peut dire que les valeurs des étalons sont connues sans erreur.

b) Evaluation de l'incertitude de mesure d'une chaîne de mesure numérique étalonnée

On trace une courbe des incertitudes en fonction des valeurs de l'étalon par Excel 2019, qui offre cette option. L'écart peut être positif si le point est en bas de la courbe où il peut être négatif s'il est au-dessus de la courbe d'étalonnage.

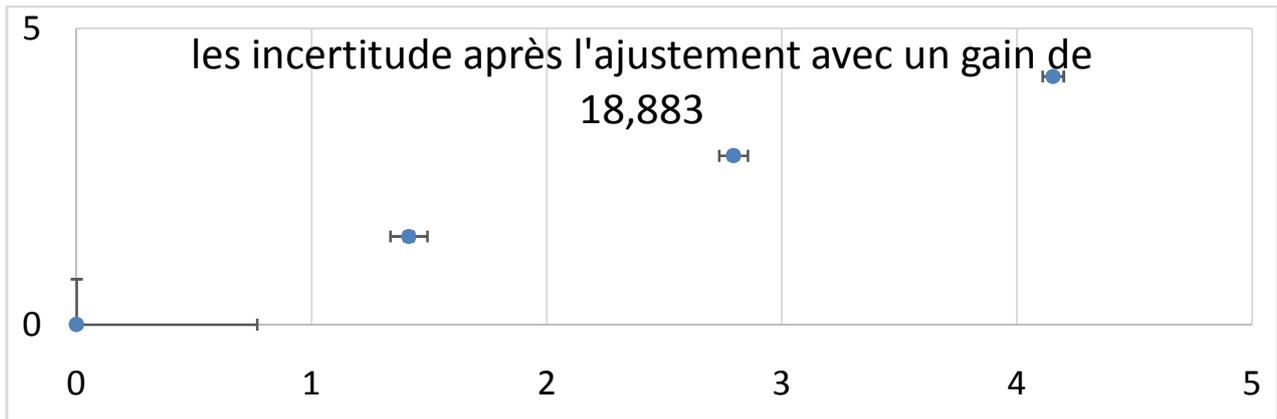


Figure 3.14. Les incertitudes sur la droite d'étalonnage

Notre chaîne de mesure est numérique on la modélise sous la forme $M = gain \times In + b$, l'indication In dépendra que de la valeur vraie, M_{vrai} , du mesurande. Pour conduire l'évaluation de l'incertitude ΔM , les notions de résolution de l'afficheur et de quantum de la chaîne de mesure sont indispensables.

Voici le tableau (3.2) qui constitue les différentes erreurs pour chaque mesure

Étalon	val de IN ID	m=gain*IN+b	erreur
1,4133	0,0791	1,448426	0,035126
2,79429	0,1514	2,812004	0,017714
4,1536	0,2226	4,154836	0,001236
5,5669	0,2978	5,573108	0,006208
6,991	0,373	6,99138	0,00038
8,3935	0,4463	8,373818	-0,019682
9,7097	0,5142	9,654412	-0,055288
11,1015	0,5952	11,182072	0,080572
12,5903	0,6694	12,581484	-0,008816
13,9389	0,7412	13,935632	-0,003268
15,363	0,8164	15,353904	-0,009096
16,7007	0,8882	16,708052	0,007352
18,1464	0,9639	18,135754	-0,010646

Tableau 3- 2 : les erreurs entre les 13 point de mesure et la droite d'étalonnage

Ces erreurs sont données dans la figure (3.15) ci-dessous :

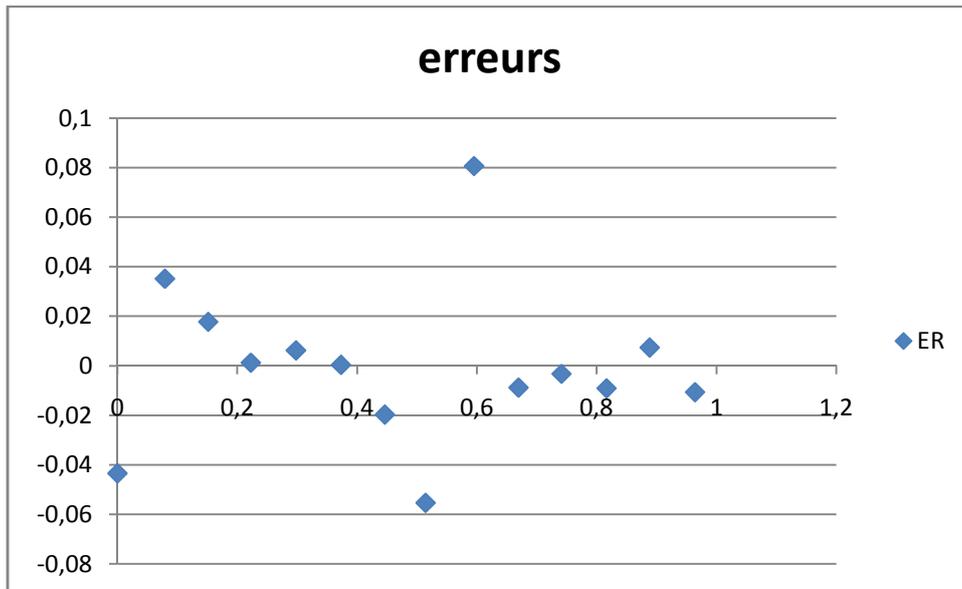


Figure 3-15 : les erreurs du capteur ID.

On remarque que les erreurs ER de la figure (3.15) sont distribuées autour de zéro, on peut dire que l'étalonnage de meilleure qualité.

❖ Erreur maximum

A travers le modèle mathématique de la courbe d'étalonnage (3.13) on peut calculer le différent nuage de points (table 3.1)

$$ER_{max} = 0.0806 \text{ A}$$

❖ Erreur de quantification

$$q = a * d$$

Déterminer la valeur de d

On a un convertisseur numérique de 12 bites

$$d = \frac{1}{nb \text{ de bite}}$$

Application numérique

$$d = \frac{1}{2048} = 0.0005$$

$$q = 18.883 * 0.0005 = 0.0094 \text{ A}$$

$$u_q = \frac{q}{2\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

On remplace la valeur d dans la relation (3.2)

$$u_q = 0.0027 \text{ A}$$

❖ Erreur de l'étalon ΔM_{et}

Le constructeur de l'appareil Chauvin Arnoux il nous a donné une incertitude de $\pm(0.5\% \text{ } 0.2 \text{ A})$ [17]

On va calculer ΔM_{eti} de chaque mesure et en suite on va calculer la moyenne des incertitudes de l'étalon.

$$\Delta M_{eti} = \frac{0.5}{100} * 18,1464 + 0.02 \text{ A}$$

$$\Delta M_{et} = 0.0907 \text{ A}$$

Evaluation de l'incertitude

$$U^2 = \sqrt{1.16^2 * 2 * (u_q^2) + (ER_{max})^2 + (\Delta M_{et})^2}$$

$$U^2 = \sqrt{1.16^2 * 2 * (0.5 * q)^2 + (ER_{max})^2 + (\Delta M_{et})^2}$$

$$U^2 = \sqrt{(1.16^2) * ((2 * (0.5 * 0.0094))^2 + (0.081)^2 + (0.11)^2) \text{ A}}$$

L'incertitude élargie pour cette chaîne de mesure pour un niveau de confiance de 95% est :

$$U = 0.16 \text{ A}$$

$$U = \pm 0.16 \text{ A}$$

On écrit le résultat de mesure de la chaîne de mesure comme suite :

$$M = m \pm U$$

$$ID = (m \pm 0.16) A$$

Pour les capteurs IB, IC et VC on suit les mêmes étapes que le capteur ID.

3.4.2 Capteur de courant IB

Pour étalonner le capteur IB, on a fait 13 mesures. On a pris les mesures relevées via la carte Dspace (correspond aux mesures de la chaîne que l'on souhaite étalonner) et simultanément on a pris aussi les mesures à partir de Chauvin Arnoux que l'on prendra comme étalons.

a) L'étalonnage et modélisation :

Le tableau (3.4) donne les 13 mesures effectuées ; ce tableau affiche les valeurs maximales de chaque mesure.

ETALON	Les valeurs de l'indication capteur IB
1,4025	0,0781
2,7079	0,1465
4,1752	0,2251
5,5777	0,2993
6,991	0,3745
8,318	0,4453
9,6989	0,519
11,1986	0,5977
12,4824	0,6675
13,9281	0,7456
15,3198	0,8213
16,7115	0,8931

Tableau 3- 4 mesures du courant IB avec l'étalon et Dspace

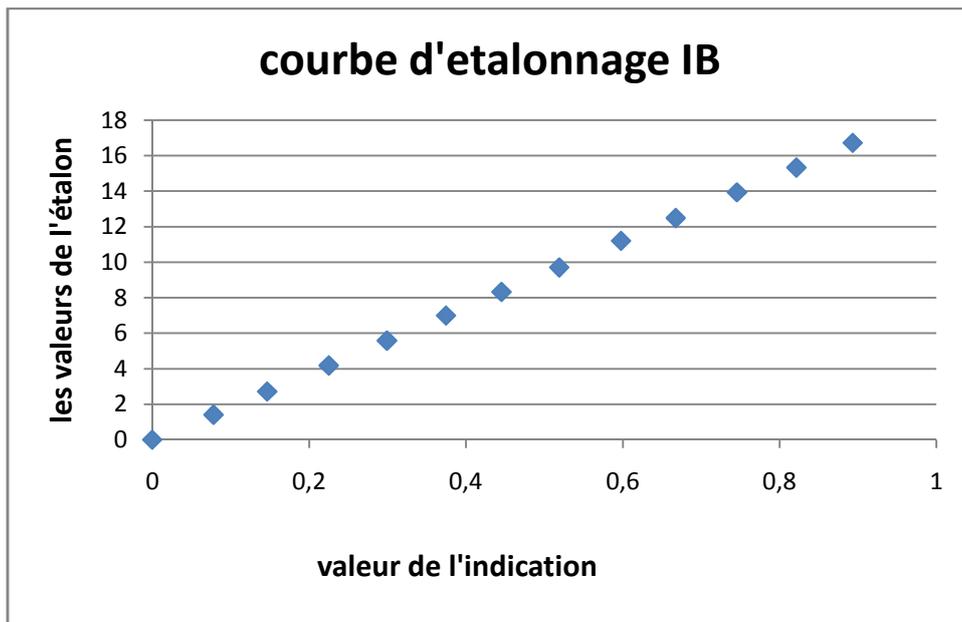


Figure 3-16 nuage de point pour réaliser la courbe d'étalonnage

On modélise alors ce nuage de points sous la forme $m = a \cdot IN + b$

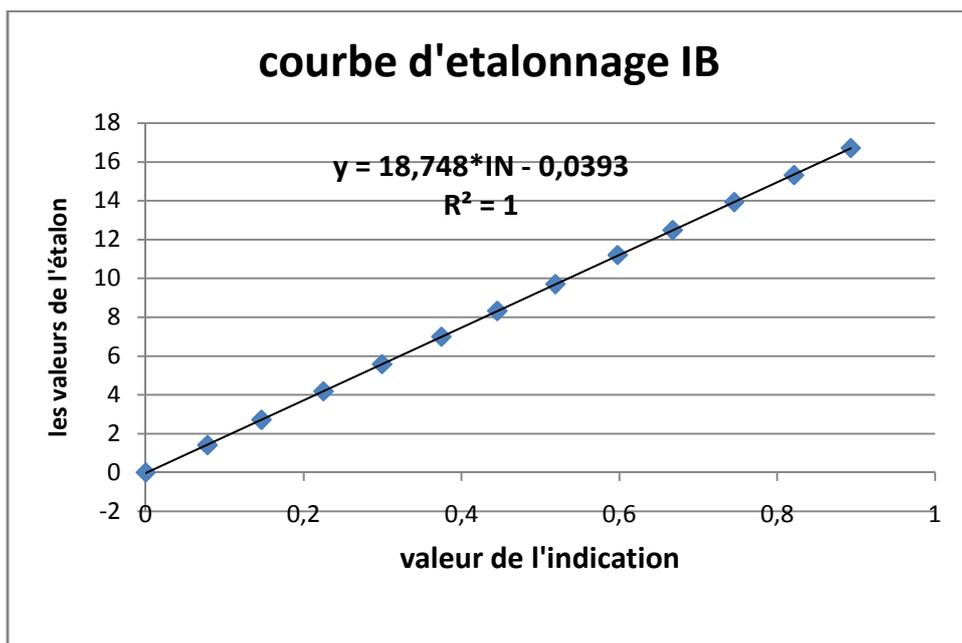


Figure 3-17 Courbe d'étalonnage pour le capteur IB

On obtient le gain: $G_{IB} = a = 18,748$

L'équation de la courbe d'étalonnage est :

$$m = (18,748 * IN - 0,0393) A \quad (3.3)$$

L'estimation de la sensibilité S , est donné par la pente de la droite obtenue et $S = 18,748$

Remarque

Les incertitudes associées aux valeurs des étalons sont infiniment plus faibles que les incertitudes associées aux indications, donc on peut dire que les valeurs des étalons sont connues sans erreur.

b) Evaluation de l'incertitude de mesure d'une chaîne de mesure numérique étalonnée

Voici le tableau (3.5) qui constitue les différentes erreurs pour chaque mesure

ETALON	La val IN IB	m=a*IN+b	ERREUR
1,4025	0,0781	1,4343911	0,0318911
2,7079	0,1465	2,7155915	0,0076915
4,1752	0,2251	4,1878481	0,0126481
5,5777	0,2993	5,5776883	-1,17E-05
6,991	0,3745	6,9862595	-0,0047405
8,318	0,4453	8,3124143	-0,0055857
9,6989	0,519	9,692889	-0,006011
11,1986	0,5977	11,1670187	-0,0315813
12,4824	0,6675	12,4744425	-0,0079575
13,9281	0,7456	13,9373336	0,0092336
15,3198	0,8213	15,3552703	0,0354703
16,7115	0,8931	16,7001561	-0,0113439

Tableau 3-5 les erreurs entre les 13 point de mesure et la droite d'étalonnage
Ces erreurs sont données dans la figure (3.18) ci-dessous :

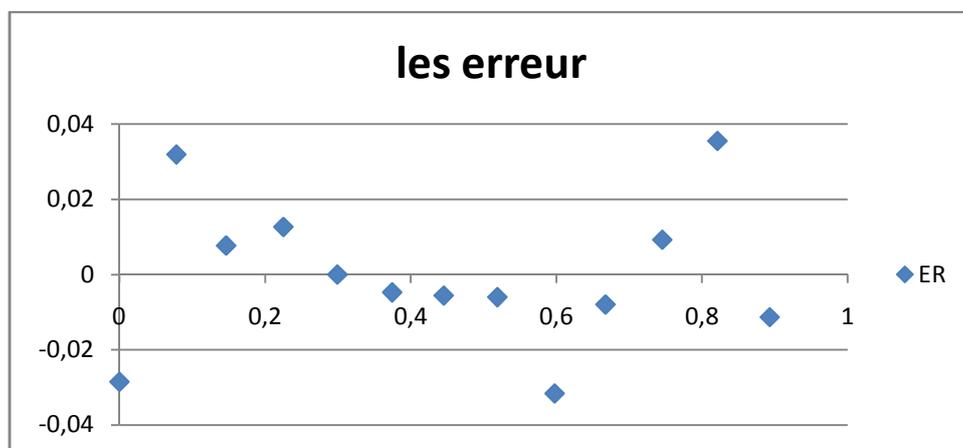


Figure 3.18 : les erreurs du capteur IB.

On remarque que les erreurs ER de la figure (3.18) sont distribuées autour de zéro, on peut dire que l'étalonnage de meilleure qualité.

❖ Erreur maximum

A travers le modèle mathématique de la courbe d'étalonnage (3.17) on peut calculer les différentes erreurs (table 3.5)

$$ER_{max} = 0.0354$$

❖ Erreur de quantification

$$q = a * d$$

On a calculé la valeur de la résolution dans 1^{er} capteur ID elle est même dans toutes les mesures :

$$d = 0.0005$$

$$q = 18.748 * 0.0005 = 0.0094$$

$$u_q = \frac{q}{2\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

On remplace la valeur d dans la relation (3.2)

$$u_q = 0.0027$$

❖ Erreur de l'étalon ΔM_{et}

Le constructeur de l'appareil Chauvin Arnoux il nous a donné une incertitude de $\pm(0.5\% + 0.2 A)$ [17]

$$\Delta M_{et} = \pm(0.5\% + 0.2 A)$$

On va calculer ΔM_{et} de la valeur max de l'étendu de.

$$\Delta M_{et} = \left(\frac{0.5}{100} * 16,7115 + 0.02 \right) A$$

$$\Delta M_{et} = 0.1 A$$

Evaluation de l'incertitude

$$U = \sqrt{(1.16^2) * ((2 * (0.5 * q))^2) + (ER_{max})^2 + (\Delta M_{et})^2}$$

Application numérique

$$U = \sqrt{(1.16^2) * (2 * (0.5 * 0.0094))^2 + (0.0354)^2 + (0.1)^2} = 0.2990$$

L'incertitude élargie de cette chaîne de mesure et pour un niveau de confiance de 95% est :

$$U = \pm 0.3 \text{ A}$$

On écrit le résultat de mesure de la chaîne de mesure comme suite :

$$M = m \pm U$$

$$IB = (m \pm 0.3) \text{ A}$$

3.4.3 Capteur de courant IC :

a) L'étalonnage et modélisation :

Voici le tableau des 15 mesures effectuées, ce tableau affiche les valeurs maximales de chaque mesure.

ETALON	Les val de IN d IC
1,381	0,0732
2,708	0,1392
4,2076	0,2148
5,534	0,2817
6,9802	0,3545
8,2964	0,4214
9,699	0,4917
11,177	0,5679
12,5148	0,6348
13,8741	0,7036
15,2982	0,7744
16,6576	0,8423
18,1141	0,9175
19,3655	0,981

Tableau 3-7 : les 15 mesures du capteur IC

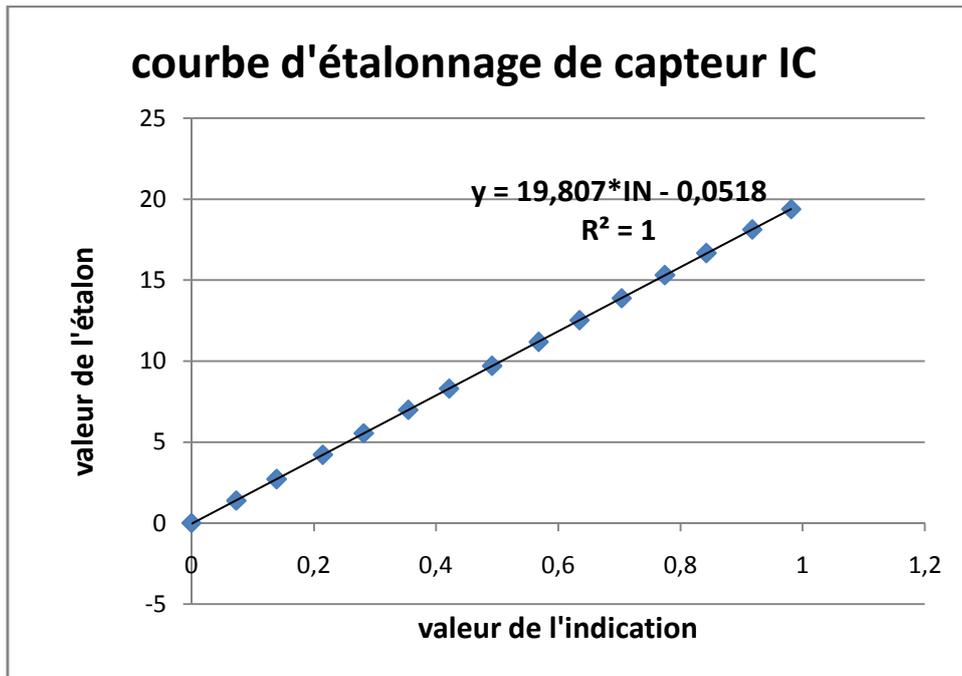


Figure 3-19 La courbe d'étalonnage pour le capteur IC.

On obtient le gain : $G_{IC} = 19,807$

L'équation de la courbe d'étalonnage est :

$$m = 19,807 * IN - 0,0518 \quad (3.4)$$

L'estimation de la sensibilité S , est donné par la pente de la droite obtenue et $S = 19,807$

Remarque

Les incertitudes associées aux valeurs des étalons sont infiniment plus faibles que les incertitudes associées aux indications, donc on peut dire que les valeurs des étalons sont connues sans erreur.

b) Evaluation de l'incertitude de mesure d'une chaîne de mesure numérique étalonnée

Voici le tableau (3.8) qui constitue les différentes erreurs pour chaque mesure

ETALON	Les val de IN IC	$m = a \cdot IN + b$	Erreur
1,381	0,0732	1,4093548	0,0283548
2,708	0,1392	2,7154288	0,0074288
4,2076	0,2148	4,2114772	0,0038772
5,534	0,2817	5,5353613	0,0013613
6,9802	0,3545	6,9760005	-0,0041995
8,2964	0,4214	8,2998846	0,0034846
9,699	0,4917	9,6910513	-0,0079487
11,177	0,5679	11,1989731	0,0219731
12,5148	0,6348	12,5228572	0,0080572
13,8741	0,7036	13,8843404	0,0102404
15,2982	0,7744	15,2854016	-0,0127984
16,6576	0,8423	16,6290747	-0,0285253
18,1141	0,9175	18,1172075	0,0031075
19,3655	0,981	19,373809	0,008309

Tableau 3.8. Les erreurs entre les 15 point de mesure et la droite d'étalonnage
Ces erreurs sont données dans la figure (3.20) ci-dessous :

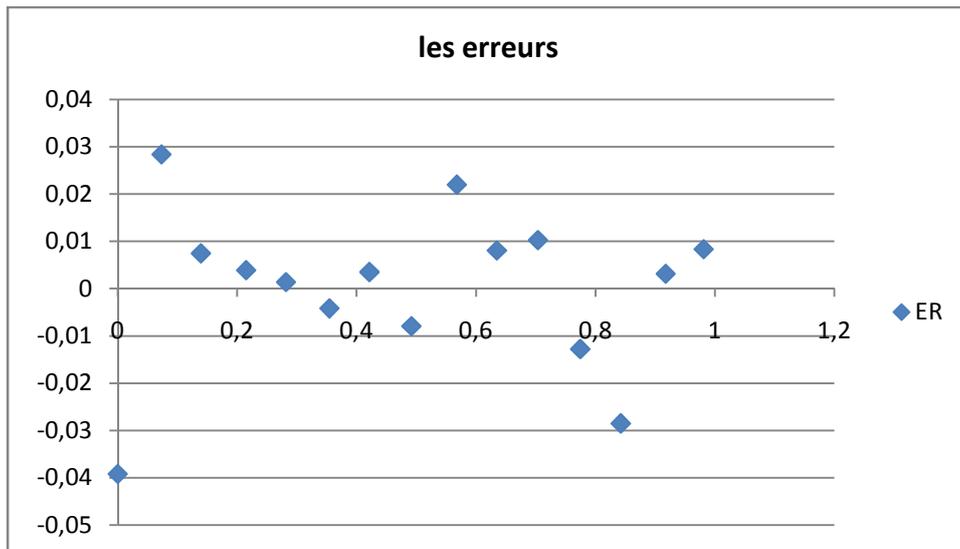


Figure 3-20 les erreurs du capteur IC.

On remarque que les erreurs ER de la figure (3.20) sont distribuées autour de zéro, on peut dire que l'étalonnage de meilleure qualité.

❖ Erreur maximum

A travers le modèle mathématique de la courbe d'étalonnage (3.19) on peut calculer les erreurs (table 3.8)

$$ER_{max} = 0.0285 \text{ A}$$

❖ Erreur de quantification

$$q = a * d$$

On a : $d = 0.0005$

$$q = 19.807 * 0.0005$$

$$q = 0.0099$$

$$u_q = \frac{q}{2\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

On remplace la valeur d dans la relation (3.2)

$$u_q = 0.0029$$

❖ Erreur de l'étalon ΔM_{et}

Le constructeur de l'appareil Chauvin Arnoux il nous a donné une incertitude de $0.5\% + 0.2\text{A}$ [17]

On va calculer ΔM_{et} de la valeur max de la mesure de l'étalon

$$\Delta M_{et} = \left(\frac{0.5}{100} * 19.3655 + 0.02 \right) \text{ A}$$

L'incertitude de l'étalon

$$\Delta M_{et} = 0.12 \text{ A}$$

Evaluation de l'incertitude

$$U = \sqrt{(1.16^2) * (2 * (0.5 * q^2) + (ER_{max})^2 + (\Delta M_{et})^2)}$$

Application numérique

$$U = \sqrt{(1.16^2) * (2 * (0.5 * 0.010)^2 + (0.0285)^2 + (0.12)^2)}$$

$$U = 0.14 \text{ A}$$

L'incertitude élargie pour cette chaîne de mesure pour un niveau de confiance de 95% est :

$$U = \pm 0.14 A$$

On peut écrire le résultat de mesure de la chaîne de mesure comme suite :

$$M = m \pm U$$

$$IC = (m \pm 0.14) A$$

3.4.4 Capteur de tension VB :

a) L'étalonnage et modélisation :

Voici le tableau (3.10) des 13 mesures effectuées, il affiche les valeurs maximales de chaque mesure.

ETALON	Val IN de VB
8,1621	0,0122
27,9252	0,0332
56,8447	0,0645
84,3971	0,0938
110,6235	0,1221
139,2116	0,1528
165,0652	0,1807
192,949	0,2109
221,2056	0,2417
249,4623	0,272
275,3159	0,3022
302,9096	0,3301
313,4334	0,3428

Tableau 3-10 les 13 mesures du capteur VB

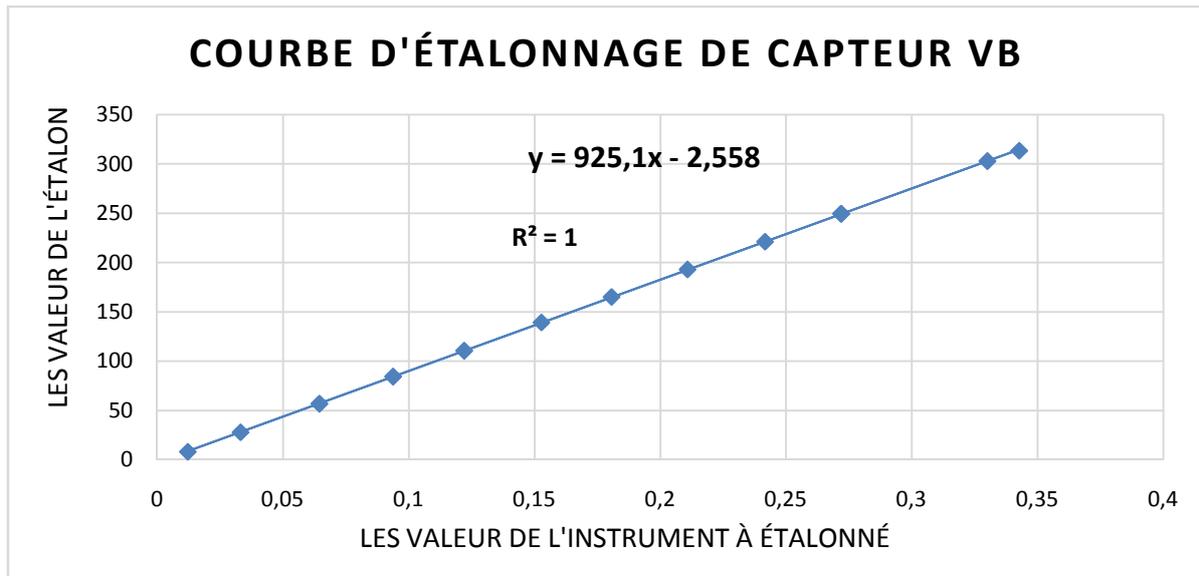


Figure 3.21. la courbe d'étalonnage pour le capteur VB.

On obtient le gain : $G_{VB} = 925,17$

L'équation de la courbe d'étalonnage est :

$$m = 925,17 * IN - 2,5582 \text{ V} \quad (3.5)$$

L'estimation de la sensibilité S , est donné par la pente de la droite obtenue et $S = 925,17$

Remarque

Les incertitudes associées aux valeurs des étalons sont infiniment plus faibles que les incertitudes associées aux indications, donc on peut dire que les valeurs des étalons sont connues sans erreur.

a) Evaluation de l'incertitude de mesure d'une chaîne de mesure numérique étalonnée

Voici le tableau (3.11) qui constitue les différentes erreurs pour chaque mesure

ETALON	Val IN de VB	$m=a*IN+b$	ERREUR
8,1621	0,0122	8,728874	0,566774
27,9252	0,0332	28,15744	0,232244
56,8447	0,0645	57,11527	0,270565
84,3971	0,0938	84,22275	-0,17435
110,6235	0,1221	110,4051	-0,21844
139,2116	0,1528	138,8078	-0,40382
165,0652	0,1807	164,62	-0,44518
192,949	0,2109	192,5602	-0,38885
221,2056	0,2417	221,0554	-0,15021
249,4623	0,272	249,088	-0,37426
275,3159	0,3022	302,8404	-0,06918
302,9096	0,3301	314,5901	1,156676
313,4334	0,3428	8,728874	0,566774

Tableau 3-11 Les erreurs entre les 13 point de mesure et la droite d'étalonnage

Ces erreurs sont données dans la figure (3.22) ci-dessous :

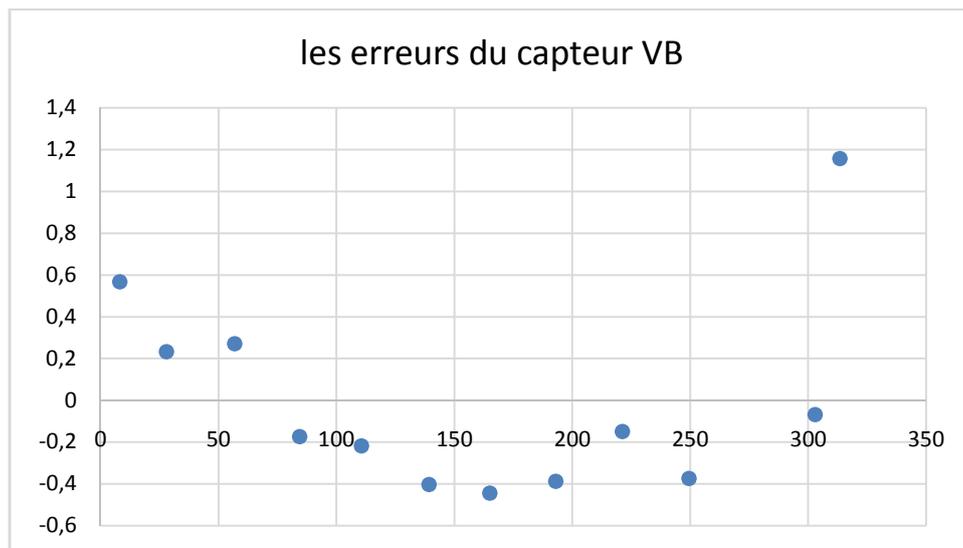


Figure 3-22 Les erreurs du capteur VB.

On remarque que les erreurs ER de la figure (3.22) sont distribuées autour de zéro, on peut dire que l'étalonnage de meilleure qualité.

b) Evaluation de l'incertitude de mesure d'une chaîne de mesure numérique étalonnée

❖ Erreur maximum

A travers le modèle mathématique de la courbe d'étalonnage (3.8) on peut calculer les erreurs (table 3.11)

$$ER_{max} = 0.556 A$$

❖ Erreur de quantification

$$q = a * d$$

Déterminer la valeur de d

La valeur d correspond au chiffre moins significatif de la carte de dspace

Donc on a :

$$d = 0.0005$$

$$q = 925.17 * 0.0005 = 0.4642 A$$

$$q = 0.4642 A$$

$$u_q = \frac{q}{2\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

On remplace la valeur d dans la relation (3.2)

$$u_q = 0.4$$

❖ Erreur de l'étalon ΔM_{et}

Le constructeur de l'appareil Chauvin Arnoux il nous a donné une incertitude de 0.5% + 0.2 V[17]

On va calculer ΔM_{et} de la valeur maximum de l'étalon.

$$\Delta M_{et} = \left(\frac{0.5}{100} * 313,4334 + 0.2 \right) V$$

$$\Delta M_{et} = 1.7672 V$$

Evaluation de l'incertitude

$$U = \sqrt{(1,16^2) * (2 * (0,5 * q^2) + (ER_{max})^2 + (\Delta M_{et})^2)}$$

Application numérique

$$U = \sqrt{(1,16^2) * (2 * (0,5 * 0,464)^2 + (0,556^2) + (1,7672^2)}$$

$$U = 2,2 \text{ V}$$

L'incertitude élargie pour cette chaîne de mesure pour un niveau de confiance de 95% est :

$$U = \pm 2,2 \text{ V}$$

On peut écrire le résultat de mesure de la chaîne de mesure comme suite :

$$m = a * IN \pm U$$

$$VB = (m \pm 2,2) \text{ V}$$

3.5 La vérification :

Dans cette partie, nous vérifierons pour confirmer notre étalonnage et s'il répond aux exigences spécifiées.

Sur la base des résultats de la vérification, il sera déterminé si la chaîne de mesure doit être remise en service, doit être ajustée, réparée, mise hors service ou modifiée.

Nous veillerons également à ce que l'écart correspondant soit inférieur à l'erreur maximale tolérée (EMT).

Afin de vérifier, nous mesurons au même intervalle de l'étalonnage. Nous comparons la valeur mesurée affichée par Dspace avec la valeur mesurée affichée par Chauvin Arnoux et la valeur mesurée de l'ampèremètre pour le courant et du voltmètre pour la tension.

Pour vérifier la chaîne de mesure nous avons ajouté deux instruments de mesure (l'ampèremètre et le voltmètre)

3.5.1 Vérification de la chaîne de mesure pour le capteur de tension IC

Pour vérifier le capteur de courant IC, nous allons effectuer deux types de mesures ; la première consiste à utiliser Chauvin Arnoux et Dspace pour effectuer des mesures et fournir leurs incertitudes. On compare les résultats obtenus si les valeurs affichées par Chauvin Arnoux est comprises dans l'intervalle de Dspace $[m-U ; m+U]$.

Le deuxième type de mesure c'est de mesurer avec l'ampèremètre et de fournir son incertitude et de comparer avec les résultats fournis par Dspace.

On a l'équation de la courbe d'étalonnage sous la forme :

$$m = a \cdot In + b \quad (1)$$

a : La pente (le gain de la chaîne de mesure)

In : Indication de la chaîne de mesure

La relation pour vérifier que les résultats de mesure pour le capteur IC s'écrit sous cette forme:

$$M = m \pm U \quad (2)$$

M : la valeur vraie

U : l'incertitude de mesure

La relation (2) ça-veut-dire qu'on a 95% de chance que la valeur vraie de l'étalon M tombe dans l'intervalle $[m - U ; m + U]$

On calcule l'incertitude de l'ampèremètre :

Pour l'ampèremètre son incertitude est donnée par l'expression suivante :

$$U_2 = \frac{\text{classe} * \text{calibre}}{100}$$

Donc pour notre ampèremètre son incertitude absolue est de :

$$U_2 = \frac{2*1}{100} = 0,02 \text{ A}$$

Tableau de vérification des résultats :

Etalon (A)	Indication	$(m \pm U)A$
0,7767	0,0421	$0,7820747 \pm 0,14$
1,2838	0,0701	$1,3366707 \pm 0,14$
1,1504	0,0612	$1,1603884 \pm 0,14$

Table de vérification des résultats

Valeur de l'ampèremètre x1	$x1 \pm U2$	indication de Dspace	$m \pm U$
1A	$(1 \pm 0,02)A$	0,0522	$(0,9818 \pm 0,14)A$

Selon les 3 mesures avec chauvin Arnoux, on voit clairement que les résultats fournis par chauvin Arnoux sont compris dans l'intervalle des résultats de mesures de Dspace.

Dans la deuxième partie, la vérification avec l'ampèremètre indique que la valeur obtenue par l'ampèremètre est incluse dans l'intervalle de la mesure obtenue par Dspace.

On conclut de ces résultats que le capteur de courant est bien étalonné et l'écart est inférieur à l'erreur maximale toléré, donc la chaîne de mesure peut être remise en service.

Remarque

La vérification pour les 3 capteurs qui reste, c'est la même méthode avec le capteur IC.

3.5.2 Vérification de la chaîne de mesure pour le capteur de tension Vb

On calcule l'incertitude de voltmètre :

Notre voltmètre est un instrument numérique dont l'incertitude selon la relation (2.8)

$$\Delta m = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot p \quad (2.8)$$

Selon le constructeur il nous a fourni la précision comme suite :

$$p = 1\% \text{ of reading} + 4 \text{ digit}$$

$$p = \frac{1 * 220}{100} + 4 * 0,01$$

$$p = 2,24$$

On remplace p dans l'équation (2.8) :

$$U1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 2,24$$

$$U1 = 2,5865v$$

L'incertitude de voltmètre est :

$$U1 = 2,5865 v$$

Tableau de vérification du résultat

U	Etalon v	Indication	(m±U) v
2,48 v	202,1469	0,2218	202,6445±2,48
	280,4535	0,3068	281,2839±2,48
	303,8045	0,3332	305,7084±2,48

Table de vérification des résultats

Valeur de voltmètre x2	(X2±U1) v	indication de Dspace	(m±U) v
220 v	(220±2,5865)	0,2405	(222,49±2,48)

Selon les trois mesures avec Chauvin Arnoux, on voit clairement que les résultats fournis par Chauvin Arnoux sont compris dans l'intervalle des résultats de mesures de Dspace.

Dans la deuxième partie, la vérification avec le voltmètre indique que la valeur obtenue par le voltmètre est incluse dans l'intervalle de la mesure obtenue par Dspace.

On conclut de ces résultats que la chaîne de mesure des différents capteurs sont bien étalonnés et l'écart est inférieur à l'erreur maximale tolérée, donc la chaîne de mesure peut être remise en service.

Remarque

On a tous les valeurs vraies de l'étalon compris dans l'intervalle $[m - U ; m + U]$.

3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu les trois parties essentielles de notre banc d'essai, et aussi on a défini la méthode à utiliser pour acquérir les données en temps réel des mesures de chaque capteur à effet Hall.

Sachant que les résultats obtenus sont extraits des deux différents capteurs (Dspace, Chauvin Arnoux).

Nous avons extrait les résultats des mesures de Chauvin Arnoux et de la carte de capture Dspace, ces résultats ont été transférés sous Excel, afin que nous puissions illustrer le diagramme du nuage de points.

Nous utilisons la méthode des moindres carrés, via Excel, sur le nuage de points pour obtenir une courbe linéaire, appelée courbe d'étalonnage. Cette courbe permet de trouver le gain de chaîne de mesure pour différents capteurs sur l'intervalle de mesure, en suite on a évalué l'incertitude élargie

pour un niveau de confiance 95% ,a fin que de trouvé le modèle mathématique pour différentes chaines de mesure .

Conclusion générale

Le travail que nous avons présenté dans notre mémoire de fine étude, entre dans l'expérience de l'opération de l'étalonnage, qu'on a réalisée dans le laboratoire de la faculté technologie, cette opération elle pour étalonnés des capteurs de tension et du courant à l'aide d'un étalon de haute précision et pour cela on a construit une chaîne de mesure pour faire cette expérience, on a utilisé une carte Dspace DS1103 pour traiter les données de différents capteurs à étalonné et un Pc pour visualiser la grandeur de sortie du capteur à l'aide de Matlab , on a programmé d'étalonner le courant d'un MAC par capteur du courant mais des raisons techniques on change le MCC par des charges pour augmenter l'étendue de mesure du courant.

Des résultats expérimentaux qu'on a obtenus après les analyses des données de chaîne de mesure du différent capteur et avec la comparaison avec l'instrument de mesure Chauvin qu'on a utilisés comme étalons on est arrivé pour ajuster les différents capteurs par un gain qu'on peut un intégré dans Simulink de Matlab pour obtenir un résultat de mesure qu'elle ressemble à celle de l'étalon Chauvin.

Notre projet nous a permis de rentrer dans le vaste et passionnant domaine de la métrologie et l'électronique, pour savoir comment évaluer l'instrument de mesure et de trouver les moyennes pour ajuster cet instrument, pour obtenir une mesure plus précise que nous souhaitons.

Le plus important fruit de notre travail reste toujours les idées et les connaissances que nous avons acquises tout au long chemin de notre parcours d'étude.

La documentation des livres sur les sites internet nous a permis d'enrichir et d'élargir nos connaissances et de renforcer notre formation et de développer l'aspect de la recherche scientifique.

En dernier on espère que notre travail va subir des améliorations dans l'avenir de côté matériel.

Finalemant on souhaite que tout ce qu'on a fait puisse être utilisé une source d'information dans l'avenir pour la continuité dans ce projet et de proposer d'autres méthodes pour les futurs PPE.

Annexe A :

A.1 FONCTION DU LOGICIEL

❖ L'acquisition des données :

L'acquisition des données peut être sous forme d'onde, tableau, on peut nous donner une valeur max et min selon l'utilisateur

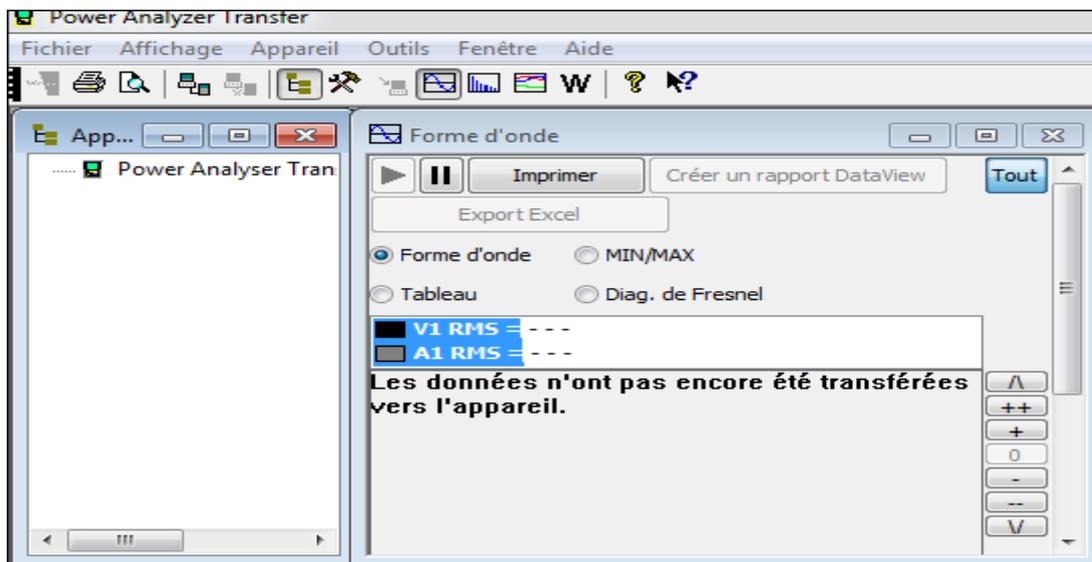


Figure A-1 : les formes d'acquisition des données

❖ Enregistrement en temps réelle

On peut enregistrer les données de mesure de l'instrument de qualistar en temps réel à travers ce logiciel directement sur le pc

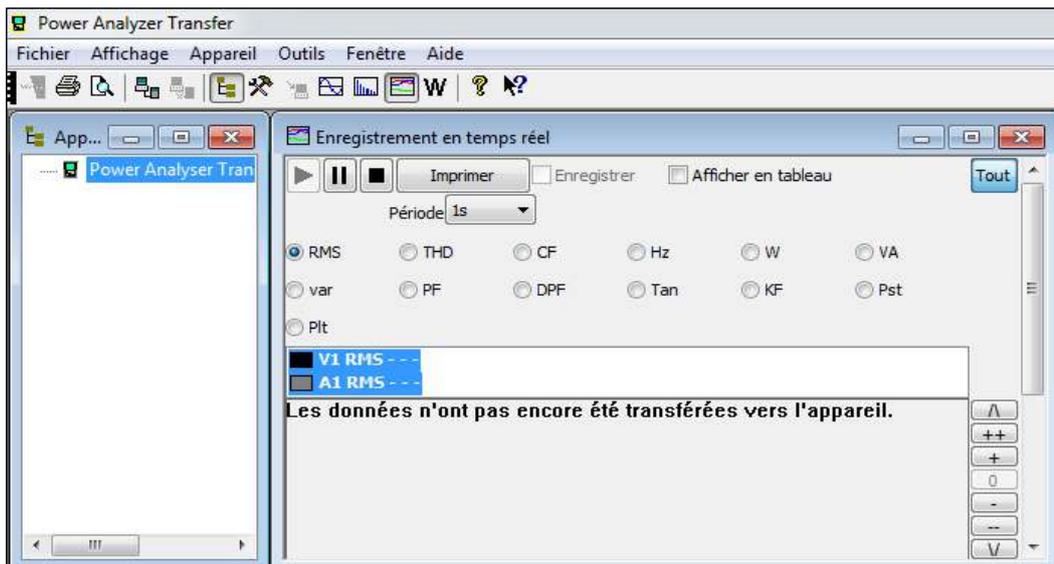


Figure A-2: l'enregistrement à temps réel

❖ Configuration de l'appareil :

A travers le logiciel **PAT-v3.08.0018** qui est installé sur le pc on peut configurer l'appareil de qualistar selon le basion de la mesure. Pour cela, cliquez sur Appareil dans la barre de menu et sélectionnez Configuration. La boîte de dialogue Configurer l'appareil s'affiche. Notez que vous pouvez également ouvrir cette boîte de dialogue en cliquant sur l'icône Configuration de la barre d'outils ou sur le bouton Configuration (lorsqu'il est affiché) en haut du volet de données.

La boîte de dialogue (Configurer l'appareil) comporte sept onglets :

- **Général** : sélectionne le type de branchement électrique et d'autres variables associées au système mesuré.
- **Affichage** : définit les variables de l'écran LCD de l'appareil tels que, entre autres, la langue, les couleurs et le format des données
- **Alarme** : définit les paramètres de surveillance des alarmes de l'appareil.
- **Enregistrements** : définit quelles données sont capturées lors des enregistrements par l'appareil.
- **Transitoires** : définit les conditions de capture des transitoires sur le système mesuré.
- **Courant d'appel** : définit les paramètres d'enregistrement des événements de courant d'appel sur le système mesuré.

- **Surveillance** : définit le début et la fin des différents types de sessions d'enregistrement sur l'appareil.

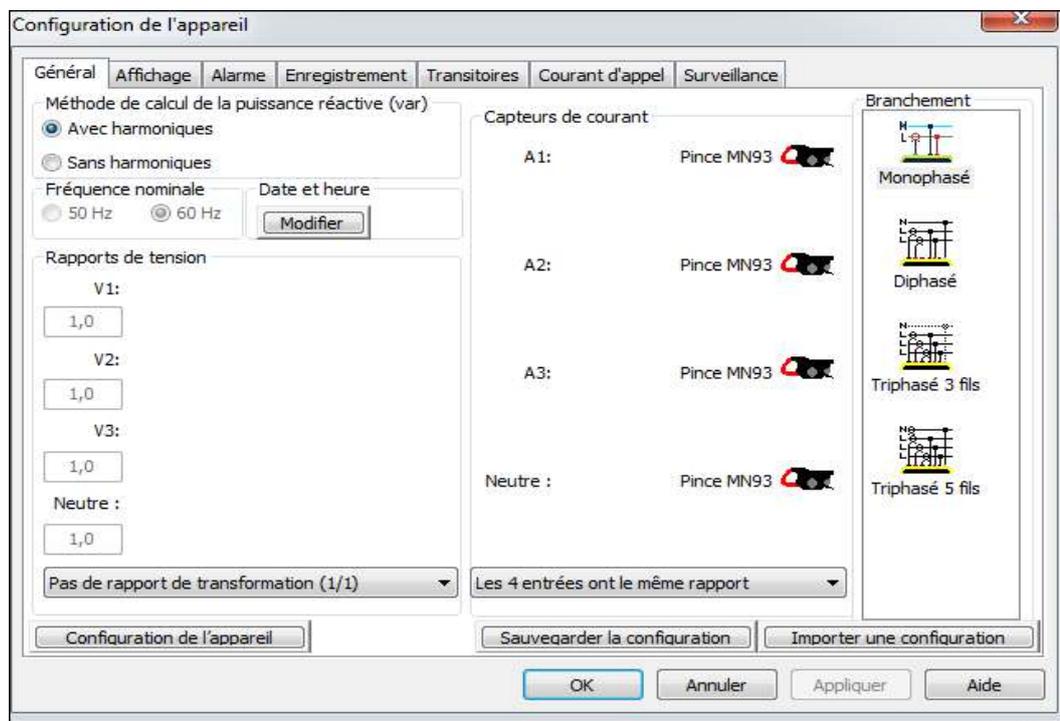


Figure A-3 : les types de session d'enregistrement pour la surveillance

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

Un dispositif électronique qui convertit les signaux analogiques en format numérique équivalent. Le convertisseur analogique-numérique est au cœur de la plupart des systèmes d'acquisition de données.

- **Convertisseur numérique-analogique (N/A)**

Un composant électronique qui se trouve dans de nombreux dispositifs d'acquisition de données qui produisent un signal de sortie analogique.

- **Entrée/sortie numérique (E/S)**

Fait référence à un type de signal d'acquisition de données. Les E/S numériques sont des signaux discrets qui démontrent une configuration par rapport à l'autre : ces configurations peuvent être sous/hors tension, haut/bas, 1/0, etc. Les E/S numériques sont également appelés binaires E/S.

- **Entrée simple**

Fait référence à la manière dont un signal est raccordé à un module d'acquisition de données. Avec le câblage à entrer unique, chaque entrée analogique dispose d'une connexion unique élevée, mais tous les canaux partagent une connexion de mise à la terre commune. Les systèmes d'acquisition de données ont des entrées asymétriques ou différentielles ; de nombreux appareils prennent en charge les deux configurations.

- **Entrée différentielle**

Fait référence à la manière dont un signal est raccordé à un dispositif d'acquisition de données. Les entrées différentielles ont une connexion haute unique et une connexion basse unique pour chaque canal. Les dispositifs d'acquisition de données possèdent des entrées asymétriques ou différentielles ; de nombreux appareils prennent en charge les deux configurations.

- **General Purpose Interface Bus (GPIB)**

Synonyme de HPIB (pour Hewlett-Packard), ceci est le bus standard qui est utilisé pour contrôler les instruments électroniques avec un ordinateur. Également appelé IEEE 388 en référence à la définition de la norme ANSI / IEEE.

- **Résolution**

Le plus petit incrément de signal qui peut être détecté par un système d'acquisition de données. La résolution peut être exprimée en bits, proportions, ou en pourcentage de la pleine échelle. Par exemple, un système possède une résolution de 12-bit, une partie de résolution 3096, et 0,0233 pour cent de la pleine échelle.

- **RS232**

Une norme pour les communications série qui se trouve dans de nombreux systèmes d'acquisition de données. RS232 est la communication de série la plus courante ; cependant, elle est quelque peu limitée en ce qu'elle ne supporte que la communication à un seul dispositif connecté au bus à un moment et elle est spécifiée pour des distances de transmission allant jusqu'à 15 mètres, même si dans la pratique de nombreuses applications fonctionnent sur des distances beaucoup plus longues.

- **RS385**

Une norme pour les communications série qui se trouve dans de nombreux systèmes d'acquisition de données. RS385 n'est pas aussi populaire que RS232 ; cependant, il est plus flexible en ce qu'il prend en charge la communication avec un maximum de 32 périphériques sur le bus à un moment (et davantage avec l'aide des répéteurs) et des distances de transmission d'environ 1500 mètres.

- **Fréquenced'échantillonnage**

La vitesse à laquelle un système d'acquisition de données recueille les données. La vitesse est normalement exprimée en échantillons par seconde. Pour les modules d'acquisition de données multicanaux, la fréquence d'échantillonnage est généralement donnée en tant que la vitesse du

convertisseur analogique-numérique (A/N). Pour obtenir le taux d'échantillonnage des canaux individuels, vous devez diviser la vitesse de l'A/N par le nombre de canaux étant échantillonnés.

Annexe B :

b Les différentes entrées/sorties de la DSPACE 1103 :

L'interface de la carte dSPACE1103 comprend plusieurs modules d'entrées/sorties montrés sur la figure ci-dessous :[16]

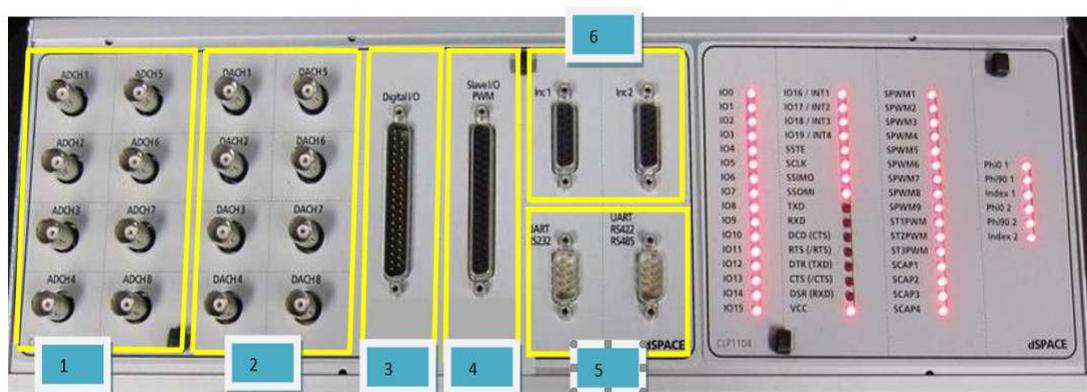


Figure B-1 : Constitution de l'interface série de la dSPACE1103

- 8 convertisseurs analogiques numériques (CAN), 3 en 16 bits, 3 en 12 bits : utilisés pour la récupération de données analogiques à partir d'un système puis leur conversion au numérique et leur affichage sur PC.
- 8 convertisseurs numériques analogiques (CNA) de 16 bits pouvant délivrer une tension $\pm 10V$, utilisés pour la conversion de données numériques introduites à partir du PC en données analogiques, puis leur injection à un système externe.
- Entrée/sortie numérique utilisée lorsque nous avons affaire à un langage de programmation.
- Entrée/sortie du DSP esclave chargé de générer les signaux MLI pour la commande de l'onduleur.
- Les ports séries (RS232, RS322 et RS385) : utilisés pour avoir une communication série entre la DSPACE 1103 et les différents appareils électroniques

(Automate, appareil de mesure, etc.). Ils assurent également la communication entre deux cartes DSPACE.

- Codeurs incrémentaux pour la récupération de données

c QUELQUES CARACTERISTIQUES DE LA CARTE DSPACE 1103 **[18]**

Désignation	Caractéristiques
Processeur	<ul style="list-style-type: none"> • MPC8230 processeur avec le noyau PPC603 et périphériques sur puce • 63-bit virgule flottante du processeur • 250MHz CPU • 2x16Ko de cache ; sur puce • Pont sur- puce PCI(33MHz)
Mémoire	<ul style="list-style-type: none"> • Mémoire globale: 32 Mode SDRAM • Mémoire Flash: 8Mo
Minuteur	<ul style="list-style-type: none"> • 1 minuterie taux d'échantillonnage (décrémentant): 32-bit décompteur, recharge par le logiciel, une résolution de 30ns • 3 temporisateurs à usage général : 32-bit décompteur, recharger en matériel, résolution de 80ns • 1 basé décompteur de temps.
DSP Esclave	<ul style="list-style-type: none"> • DSP Texas Instruments TMS320F230 • 20MHz de fréquence d'horloge • 1x3-sortie PWM • 3x1-phases sortie PWM • 3 entrées de capture • SPI (Serial Peripheral Interface). • Max. 13-bit digital I/O • TTL entrée/ sortie pour tous les niveaux E/S numériques broches • ±13 mA de courant de sortie maximum
Interface Série	<ul style="list-style-type: none"> • 1 port série UART • Mode émetteur-récepteur sélectionnable : RS232/RS322/RS385 • Max. baudrate RS232: 115,2k Baud • Max. RS322/RS385 baudrate: 1M Baud
Refroidissement	Le refroidissement actif par ventilateur
Alimentation	<ul style="list-style-type: none"> • +5 V ±5%, 2,5 A • +10 V ±5%, 0,3 A • -10V ± 5%, 0,2A
Consommation	<ul style="list-style-type: none"> • 18,5 W

Tableau B-1. Caractéristiques de LADSPACE1103

Bibliographie

- [1] F. Taillade, Notions de métrologie 3rd cycle, 2005.
- [2] VIM 3, JCGM 200,. « *Vocabulaire international de métrologie – Concept fondamentaux et généraux et termes associés* », 2012
- [3] VIDAL, A. BERNARD et J-L. *Lycée des Catalins MONTELIMAR*. s.l. : Lycée des Catalins MONTELIMAR.
- [4] keyence. [Online]. Available: www.keyence.fr/ss/products/measure-sys/measurement-selection/basic/error.jsp.
- [5] M. Dursapt, « Aide-mémoire Métrologie dimensionnelle ». Edition Dunod,, Paris,.
- [6] "moteur_asynchrone,," lycees.ac-rouen, [Online]. Available: http://lycees.ac-rouen.fr/maupassant/site2/BEPME/sujet03_04/com_tech/moteur_asynchrone.pdf.
- [7] "COURS_DE_MESURE_ET_INSTRUMENTATION," [Online]. Available: http://www.enit.rnu.tn/fr/Minds/mes_instru/COURS_DE_MESURE_ET_INSTRUMENTATION.pdf.
- [8] Meyne, Philippe. *Généralités sur les capteurs*. s.l. : université paris 12, 2008/09.
- [9] Vince, Tristan Rondepierre et Jacques. *Mesures et incertitudes*. Lyon : ens-lyon, décembre 2019.
- [10] "Evaluation des incertitudes de mesure," SCIRN - PRN de l'Université du Maine, 2009 . [Online]. Available: http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M07_C01/co/Contenu_03.html.
- [11] "Diagramme des 5M en métrologie dimensionnelle," [Online]. Available: https://campus.mines-douai.fr/pluginfile.php/27733/mod_resource/content/1/co/6_4_Diagramme_5M_metrologie_dimensionnelle.html.

- [12] C. Ferrero, "Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie (VIM)," INRIM, mars 2009 . [Online]. Available: file:///C:/Users/User/Downloads/EU630TUNISIESistemaInternazionalediunitSImarzo2009.pdf .
- [13] «Vérification et étalonnage : que doit-on savoir ? – Fascicule,» [En ligne].
- [14] chauvin-arnoux groupe , [Online]. Available: http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/download/nf-ca_8332_ca_8334.pdf.
- [15] "Data View," chauvin-arnoux groupe, [Online]. Available: https://catalog.chauvin-arnoux.com/fr_fr/dataview.html.
- [16] A. Darkawi., ""Initiation au système dSPACE, de l'interface RTI dans Simulink et de ControlDesk Next Generation 5.4 version 2.0", Support de cours - système Dspace,, " polytechniques Département Génie Électrique université de Nantes, 2015.
- [17] C. A. Groupe, "ANALYSEUR DE RÉSEAUX ÉLECTRIQUES TRIPHASÉS," [Online]. Available: <https://docplayer.fr/76283495-C-a-8332-c-a-l-analyse-reseau-tout-en-images-observer-diagnostiquer-surveiller-analyseurs-de-reseaux-electriques-triphases.html>.
- [18] B. Kamal, ""Conception de la commande d'une machine asynchrone", " Université des Sciences et de la Technologie , Oran , 2015.
- [19] ISO/TS 28037 :2010 Détermination et utilisation des fonctions d'étalonnage linéaire.[Online]. Available:<https://www.iso.org/fr/standard/44473.html#:~:text=L'ISO%2F%2028037%3A2010%20d%C3%A9crit%20aussi%20l',avec%20son%20incertitude%2Dtype%20associ%C3%A9e>.

