

# **INTRODUCTION AUX METHODES EXPERIMENTALES**

Dr BENSaad Bourassia



2.1. Le mesurande.....	17
2.2. Le mesurage :.....	17
2.3. La mesure.....	17
2.4. L'instrument de mesure ou le capteur.....	17
2.5. La chaîne de mesure.....	17
3. Les Caractéristiques des instruments de mesure [8], [9] .....	18
3.1. Gamme de mesure- étendue de mesure [9] .....	18
3.2. Rangeabilité .....	18
3.3. Courbe d'étalonnage [8].....	18
3.4. Classe de précision [9] .....	19
3.5. La résolution [9].....	19
3.6. Finesse [9].....	20
3.7. Rapidité, temps de réponse [9] .....	20
3.8. Bande passante .....	20
3.9. La sensibilité .....	21
3.10. Grandeur d'influence et compensation .....	22
3.11. La fidélité.....	22
3.12. La répétabilité.....	22
4. les erreurs de mesure [9], [11] .....	23
4.1. Rappels de définitions .....	23
4.2. Les types d'erreurs classiques .....	24
5. Calcul d'incertitudes de mesures .....	25
5.1. Incertitude absolue instrumentale .....	26
4.2. Incertitude absolue de la méthode $\Delta X_{méth}$ .....	26
5.3. Incertitude absolue totale .....	26
5.4. Présentation d'un résultat de mesure .....	26
6. Une Vue d'ensemble d'un processus expérimental.....	27
Bibliographie.....	29

## **Préambule**

Ce document se veut une introduction aux méthodes et aux outils spécifiques à l'approche expérimentale en génie mécanique. Il est destiné, essentiellement, aux étudiants en graduation, car il introduit les concepts et sert à développer un savoir-faire qui leur sera utile lors des travaux de laboratoire. Il apportera également une formation importante pour la vie professionnelle du futur ingénieur, et du doctorant, et qu'il pourra ainsi aborder avec compétence les différents problèmes de mesure et d'analyse des résultats expérimentaux.

Le recueil est divisé en deux parties :

Dans le premier chapitre de la première partie, on s'intéresse à la notion de la méthode expérimentale et l'organisation du travail expérimental. Le second chapitre est dédié à la théorie de la mesure.

La deuxième partie est consacrée à la présentation des appareils de mesure et des méthodes expérimentales en :

- Mécanique des fluides
- Mécanique du solide
- Transfert thermique

# Chapitre I :

## La méthode expérimentale

1. Introduction
2. La méthode et la démarche expérimentale
3. Principe de la méthode expérimentale :
4. Les effets en méthodes expérimentales [7]
5. Les principes de base dans la conduite d'une expérimentation [5]
6. Traitement des difficultés expérimentales [8]
7. L'organisation du travail expérimental
8. Aperçu aux plans d'expériences
9. Conclusion

### 1. Introduction

La méthode expérimentale et l'analyse théorique sont deux approches qui permettent de faire avancer les connaissances scientifiques en interrogeant la nature. En industrie, la mesure est aussi indispensable pour la fabrication des pièces, le contrôle des procédés, le contrôle de qualité, la facturation et bien d'autres fonctions. Il est donc essentiel pour un ingénieur d'en connaître les principes et applications.

## 2. La méthode et la démarche expérimentale

### 2.1. La méthode expérimentale

Dans la littérature, le terme "méthode expérimentale" est défini comme suit [1] :

- l'idée de méthode (du grec meta "vers" et hodos "chemin") caractérise une direction définissable et régulièrement suivie dans une opération de l'esprit. C'est une suite d'opérations à accomplir et signalant certains errements à éviter. Méthode a donné sens à méthodique.
- l'idée d'expérience renvoie par contre à l'idée d'hypothèse.

### 2.2. Méthode ou démarche expérimentale...

L'expérimental exige l'existence d'une hypothèse donnant lieu à un certain nombre d'entités imaginaires dont on postule l'existence et qui constitueront la théorie une fois l'hypothèse vérifiée. On trouve que l'épistémologie de la méthode expérimentale est en cause à travers deux approches contraires [1] :

- Soit la méthode expérimentale est du côté du méthodique, d'une préconception réfléchie d'un plan à suivre.
- Soit la méthode expérimentale ne peut être connue qu'à travers une opération effective, qui ne peut se trouver qu'en marchant.

C'est un débat important ne cessant de faire l'actualité dans la communauté scientifique [1]. Dans la communauté enseignante, les divergences de ce débat sont traduites en utilisant des termes tels que méthode (ou démarche) expérimentale ou scientifique, expérience, expérimentation, manipulation et même manip, pour envisager cette activité de construction du savoir dont C. Bernard disait que *"plus qu'une activité qui montre, elle est une activité qui instruit"* [2].

La méthode renvoie à un parcours balisé par des étapes prévisibles dans un chemin intellectuel ; c'est d'abord un concept philosophique. La démarche renvoie à un cheminement, à une tentative pour réussir une entreprise, sans a priori d'étapes prédéterminées. La démarche est principalement du côté du tâtonnement [2].

Ainsi, sur le plan pédagogique, on parle de **méthode expérimentale** quand l'itinéraire que les étudiants auront à emprunter est largement prédéterminé. Une **démarche expérimentale** à l'inverse rendrait compte d'une conduite de la pensée plus vagabonde, et donc moins contrainte par des indications d'actions de la part de l'enseignant.

### 2.3. A noter...

Lors d'une méthode/démarche expérimentale on distingue [4]:

- **L'expérimentation** constitue une étape au cours de la méthode ou de la démarche expérimentale. Lors de l'expérimentation, une expérience est mise en train. L'expérimentation est un processus conduisant à partir de l'émission de l'hypothèse à la réalisation d'une expérience et à l'analyse de ses résultats.

- **L'expérience** est une épreuve destinée à vérifier une hypothèse ou à étudier des phénomènes. Lors d'une expérience on met à l'essai ce qui est nouveau dans son usage et dans sa pratique. C'est une connaissance acquise par la pratique.
- **La manipulation** met l'accent sur le caractère manuel de l'activité ; donc elle valorise la dimension psycho-motrice de l'expérimentation. Ainsi, lorsque dans les séances de travaux pratiques on parle de manipulation, on ramène bien l'activité de l'apprenant à une dimension d'exécution.

La démarche expérimentale au niveau méthodologique peut être caractérisée par diverses étapes, identifiées tout autant par leur situation dans une chronologie que par l'ensemble des interactions qui les unissent en un système cohérent.

### 3. Principe de la méthode expérimentale :

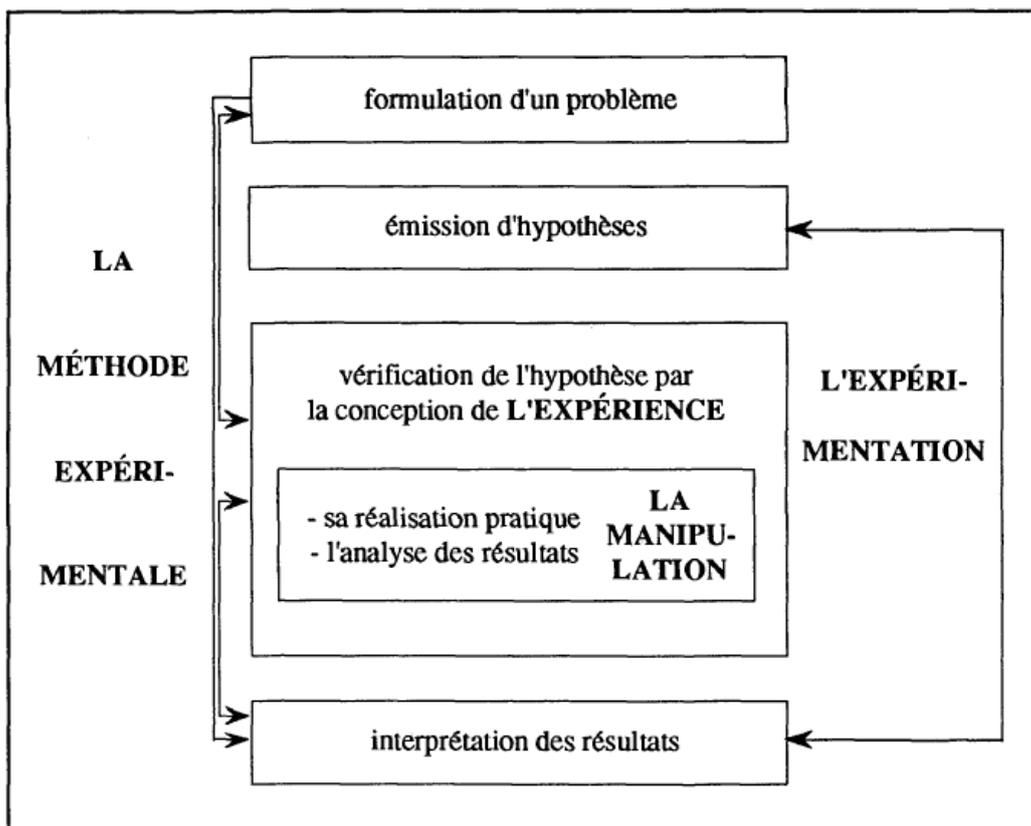
Dans une recherche expérimentale, un programme pour la préparation et l'exécution de l'expérimentation est indispensable ; idéalement, il faut accomplir plusieurs étapes dans l'ordre [5] :

1. Reconnaissance du problème et formulation d'un objectif
2. Recherche d'information dans les travaux passés
3. Formulation d'une procédure pour la résolution d'un problème
4. Réalisation du montage expérimentale
5. Définition des variables à mesurer, les mesurande
6. Choix de l'instrumentation
7. Analyse des résultats
8. Programme de mesure

#### 3.1. Les différentes étapes

La méthode expérimentale se déroule en 4 temps [6] :

1. On pose un **problème** qui est le plus souvent une **question**.
2. Elaboration d'une **hypothèse** par induction ou par déduction ; une hypothèse est formulée comme une affirmation et non comme une question. L'hypothèse est en fait la réponse proposée au problème de la première étape.
3. Réalisation d'une ou plusieurs **expériences** ou **observations** pour tester l'hypothèse. Les conditions expérimentales doivent être précises. Un témoin est indispensable. Une expérience doit conduire à des résultats qui sont interprétés.
4. **Jugement** sur la validité de l'hypothèse : suite à l'analyse des résultats expérimentaux, l'hypothèse est confirmée, validée ou au contraire est infirmée ou invalidée. On en déduit une déclaration d'une **affirmation** ou **loi** qui généralise l'hypothèse ; les lois sont ensuite regroupées dans des **théories** scientifiques (**modèle**). La figure 01 résume les étapes principales de la méthode expérimentale.



**Figure 1 principe de la méthode expérimentale [6]**

### **3.2. Comment interfèrent question, hypothèse et expérience [11]**

D'abord, les expériences ne vérifient jamais complètement une hypothèse. On peut toujours réaliser une expérience qui ira à l'encontre de l'hypothèse. Une expérience peut seulement réfuter une hypothèse si le résultat contredit ce qui était prévu. Tant que l'hypothèse tient, on dit plutôt que l'expérience "corrobore" l'hypothèse. Si l'on voulait être encore plus précis, il faudrait dire l'expérience corrobore les conséquences de l'hypothèse. Si des moisissures apparaissent sur le pain à l'humidité, l'expérience ne corrobore pas l'humidité, mais le fait que l'humidité a pour conséquence de provoquer le développement de moisissures.

En fait, dans la vie du laboratoire, une expérience ne réfute jamais totalement une hypothèse, la plupart du temps, l'hypothèse résiste. Elle se transforme le plus souvent en s'adaptant aux circonstances. Plusieurs expériences convergentes sont indispensables pour conduire à l'abandon de l'hypothèse.

De plus, question, hypothèse et expérience ne sont jamais successifs, elles ne sont jamais uniques. Une situation signifie plusieurs problèmes qui entraînent à leur tour une série de questions. Face à un problème plusieurs hypothèses peuvent être émises...

Au départ la question peut ne pas être précise, elle peut même être implicite ("une expérience pour voir"). La formulation d'une hypothèse va affiner la question, celle qui est publiée est rarement la question que se posait le chercheur à l'origine. C'est une nouvelle formulation qui résulte des discussions résultant de l'expérimentation. Il en est de même pour l'hypothèse, les

résultats d'une première série d'expériences conduit à la retravailler, à l'affiner ou carrément à en proposer une autre.

En retour, l'expérimentation reste toujours un artifice. Elle n'apporte aucune information en soi. Elle ne prend sens que par interaction avec d'autres expériences et surtout en relation avec l'hypothèse qui lui procure son cadre de questionnement et d'interprétation. À la limite un fait n'existe pas en soi. Il n'est perçu déjà que si on a une grille d'analyse qui permet de l'enregistrer. Pour expérimenter sur "la chaleur", il faut avoir défini des grandeurs (température, degrés hygrométrique) sur lesquels sont construits les instruments de mesure. Les qualités sensibles ("chaud"- "froid", "sec"- "humide") sont nettement insuffisantes. Ainsi une démarche expérimentale doit être envisagée comme un processus dans le temps où question, hypothèse et expérience interfèrent mutuellement.

### **3.3.Objectifs possibles à travers une démarche expérimentale [11]**

La démarche expérimentale s'avère très porteuse sur le plan pédagogique car elle permet d'acquérir et de développer une multitude de qualités et d'investigations. Les objectifs de la démarche expérimentale peuvent être catégorisés en deux groupes : attitudes et démarches.

#### 1. Attitudes

- avoir envie de se poser des questions (curiosité),
- avoir confiance en soi,
- être critique (esprit critique),
- être créatif (imagination créatrice),
- avoir envie de chercher par soi-même,
- avoir envie de communiquer,
- avoir envie de travailler en groupe,

#### 2. Démarches

- savoir entreprendre une activité pour répondre à ses propres questions, à celles de ses camarades ou de l'animateur,
- savoir énoncer sa propre formulation du problème,
- savoir rechercher une relation causale (savoir établir une corrélation ou un système causal),
- savoir formuler plusieurs hypothèses,
- savoir-faire un corpus documentaire,
- savoir repérer une grandeur,
- savoir imaginer un dispositif expérimental,
- savoir rechercher des indicateurs,
- savoir envisager les causes d'erreurs,
- savoir mettre au point un test,
- savoir observer,
- savoir faire des mesures,
- savoir enquêter,
- savoir lire des résultats d'une expérience,
- savoir traduire les résultats sous forme d'un graphe,
- savoir argumenter,
- savoir discuter les apports de son expérimentation et la comparer avec celles d'autres
- savoir accueillir ou élaborer un modèle,

- savoir mobiliser une hypothèse corroborée (ou un modèle) dans d'autres situations,
- savoir reconnaître les limites d'une hypothèse.

Les objectifs les plus formateurs résultent des interactions entre les phases d'une démarche expérimentale :

- savoir fonder une hypothèse par rapport au corpus documentaire,
- savoir mettre en relation les résultats obtenus avec l'hypothèse,
- savoir discuter les résultats,
- savoir reformuler une hypothèse, éventuellement en émettre d'autres,
- savoir reformuler le problème,
- savoir rechercher la cohérence d'une hypothèse au travers le modèle utilisé, etc..

#### **4. Les effets en méthodes expérimentales [7]**

On distingue trois types d'effets : simple, interactions, parasite.

##### **4.1. L'effet simple**

C'est l'effet d'une variable indépendante sur la variable dépendante. Lors d'un effet simple on cherche à analyser chaque variable indépendante indépendamment de la sorte à pouvoir justifier leur effet séparément sur la variable dépendante.

##### **4.2. L'effet d'interaction**

Pour l'effet d'interaction ou combiné, on cherche à analyser si la réunion des deux variables indépendantes a un effet sur la variable dépendante. Un effet d'interaction n'est pas directement visible sans le passage par un calcul statistique.

##### **4.3. L'effet parasite**

C'est un effet simple ou un effet d'interaction qui provient de variables mal neutralisées et qui sont indésirables. L'effet parasite ne devrait donc pas intervenir si la variable neutralisée avait été prise en considération.

#### **5. Les principes de base dans la conduite d'une expérimentation [5]**

Toute expérimentation doit être précédée par des essais préliminaires qui permettent d'atteindre les objectifs suivants :

- connaître la manipulation ; trouver la meilleure procédure pour faire les mesures et enregistrer les résultats.
- Tester et contrôler les différents instruments et éléments du banc d'essai ; s'assurer de leur fonctionnement normal.
- Définir la plage de mesure de chaque quantité à mesurer.
- Estimer les erreurs associées à chaque instrument ;
- Prévoir un protocole de mesure.
- Vérifier tout ce qui est évident.
- Veiller à ce que toutes les conditions du problème à étudier sont vérifiées au sein du banc d'essai.

- Veiller à l'absence des vibrations non désirées lors de la mise en marche de l'installation expérimentale.

Il est très important d'assurer toutes les conditions confortables et convenables à l'expérimentateur. Afin de réussir son travail expérimental, l'expérimentateur être bien conscient que :

- sans réflexion, l'expérimentation devient un apprentissage lent et difficile.
- L'expérimentateur doit se considérer comme une partie de l'installation expérimentale.
- Les connaissances acquises par la théorie ne doivent pas influencer les résultats,
- l'enregistrement des données peut être affecté par la succession rapide des mesures,
- les essais de répétabilité et de reproductibilité permettent réaliser des moyennes pour l'estimation des erreurs. Ceci permettra d'éviter toute erreur commise par un mauvais enregistrement.
- Certains phénomènes physiques rapides imposent une grande fréquence de mesure pour obtenir une meilleure caractérisation de leur évolution dans le temps.

## 6. Traitement des difficultés expérimentales [8]

Afin d'éviter toute difficulté due à la difficulté physique, lors d'un processus expérimental, il faut respecter une condition fondamentale : un « modèle expérimental » (une expérience) ne reproduit un modèle physique que si tous les autres phénomènes présents ont pu être écartés. C'est la première condition à un processus d'identification ou même simplement d'inter-comparaison. L'élimination des phénomènes parasites passe par une **démarche rigoureuse**. Par exemple :

- Dans un test de traction, les effets de flexion sont éliminés par un alignement précis des mors.
- Pour éliminer les effets liés à l'histoire d'un matériau, les différentes éprouvettes sont tirées du même lot et stockées de la même manière.

Il est à noter que la qualité de la mesure effectuée est liée à la **chaîne de mesure**. Ainsi, la validité des valeurs numériques des résultats expérimentaux est conditionnée par l'**intervalle de confiance** qui l'accompagne.

Enfin, pour pouvoir comparer des grandeurs mesurées issues de documentations techniques différentes, par exemple pour des produits concurrents, il est nécessaire que les protocoles expérimentaux soient les mêmes, d'où l'utilisation de **normes**, qu'elles soient issues des organismes nationaux ou internationaux (AFNOR, ISO, ...) ou de grands donneurs d'ordre du privé (Constructeurs automobiles ou aéronautiques).

## 7. L'organisation du travail expérimental

Un plan expérimental permet d'assurer une meilleure organisation d'une activité scientifique. Le plan d'expérience est défini comme la façon dont les variables indépendantes sont combinées entre elles pour définir les différentes situations expérimentales. Pour un travail expérimental bien réussi, Il y a cinq tâches à accomplir: [5]

- Recensement des variables

- choisir un instrument de mesure
- rassembler le matériel requis
- constituer les groupes expérimentaux et de contrôle
- choisir le genre de manipulation et de vérification

Pour mieux comprendre la notion du plan d'expérience, il est nécessaire de procéder à la présentation des concepts de base suivants.

### 7.1. La notion de variables [7]

Une variable est un paramètre susceptible de modifier une donnée. On reconnaît trois grandes variables. Les variables dépendantes, indépendantes et neutres. La figure 2 résume les différents types de variables.

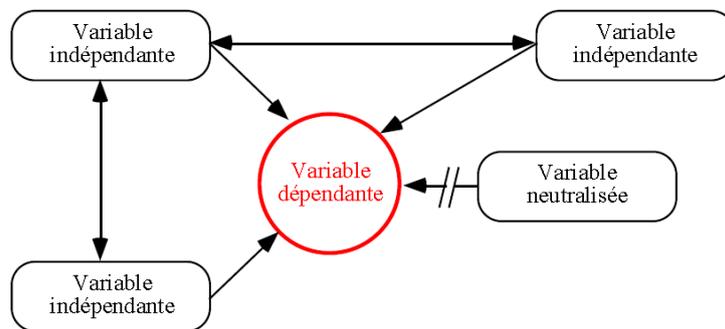


Figure 2 les types de variables

#### 7.1.1. Les variables dépendantes

C'est ce que l'on mesure. La variable dépendante doit être directement en relation avec l'objet de recherche.

#### 7.1.2. Les variables indépendantes

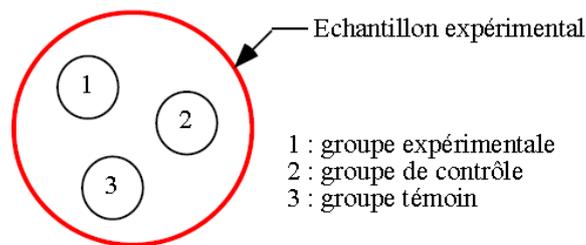
Ce sont les facteurs ayant un effet sur la variable dépendante et dont les différents niveaux modifient son état. Les variables indépendantes ont pour fonction d'expliquer la variable dépendante. Ainsi, il faut bien choisir les variables indépendantes ; ce choix doit être en relation avec la variable dépendante. Aussi, il faut qu'il y ait une relation entre les différentes variables indépendantes afin d'éviter les effets d'interactions des facteurs. Pour une recherche donnée, une ou deux variables indépendantes semblent maximum.

#### 7.1.3. Les variables neutralisées

Ce sont des variables indépendantes n'ayant pas d'effet sur la variable dépendante ; autrement dit leurs niveaux de variation sont expérimentalement annulés ou contrôlés. Quel que soit l'option adoptée, on doit en expliquer la raison.

## 7.2. L'échantillon expérimental

C'est l'ensemble des sujets que l'on va utiliser lorsqu'on définit une démarche expérimentale. Ainsi, l'échantillon expérimental peut se diviser en différents groupes (expérimentale 1, expérimentale 2, groupe témoins, etc). Il ne faut donc pas confondre l'échantillon expérimental du groupe expérimentale (sous-partie de l'échantillon) qui eux ont une mission bien précise. Le schéma de la figure 3 illustre la position du groupe expérimentale par rapport à l'échantillon expérimental.



**Figure 3** l'échantillon expérimental et les groupes expérimentaux

## 7.3. Le protocole expérimental

C'est la définition des variables : quelles variables ? dépendante, indépendante, neutralisée. Le protocole expérimental tend à opérationnaliser les variables. Exemple :

- Variable dépendante : je cherche à mesurer le temps d'un sportif au 100 mètres.
- Variables indépendantes : avec un vent contraire à 50 et à 100 km/h (1er variable) ; des experts et des novices (2ème variable).
- Variables neutralisée : état de la piste (sèche ou humide).

S'il n'y a qu'une seule variable, c'est une recherche descriptive et non expérimentale. Le choix des variables indépendantes est fondamentale (non aléatoire) puisque en agissant sur la variable dépendante celles-ci vont affecter le résultat. Les variables indépendantes doivent être justifiées. De même, toutes les variables qui peuvent venir contester les résultats (variables neutralisées) doivent être neutralisées.

## 7.4. La procédure expérimentale

Correspond à l'outil et à la tâche que l'on utilise pour recueillir les données. Il est impératif de décrire les outils qui affectent les variables indépendantes en vue de reproduire l'expérience. Il faut donc tout relever, l'heure, l'ordre de passage des sujets, le type de machine, etc. L'idéal est de filmer la procédure.

## 7.5. La session expérimentale

C'est l'organisation de la manipulation dans le temps. Le temps est soit une variable indépendante, soit une variable neutralisée. Il faut décrire quand les sujets sont passés, le temps de la manipulation.

## 7.6. Les conditions expérimentales

Elles se réfèrent aux différents groupes. Les conditions sont-elles différentes ? Les variables indépendantes conditionnent souvent les conditions expérimentales.

## 8. Principe de la méthode de plan d'expériences [8]

Les méthodes de plan d'expérience permettent d'analyser un phénomène produisant une grandeur d'intérêt  $y$  en fonction de facteurs  $x_i$ . La grandeur d'intérêt comme les facteurs sont en général exprimables sous forme numérique. Dans ce cas, il est très utile d'utiliser des grandeurs adimensionnées comme par exemple les nombres de Reynolds en mécanique des fluides ou de Peclet en thermique. Ensuite il faut procéder à un changement de base de sorte que les valeurs maximales soit de 1 et les valeurs minimales de -1.

Alors que la figure 1 résume les tâches propres de l'expérimentation, la figure 4 expose un processus d'acquisition des connaissances dans une vue plus large que les « expériences », soit « expérimentales » ou « numériques » ; Comme cela se produit lors de l'analyse de phénomènes demandant de grandes ressources en terme de puissance de calcul.

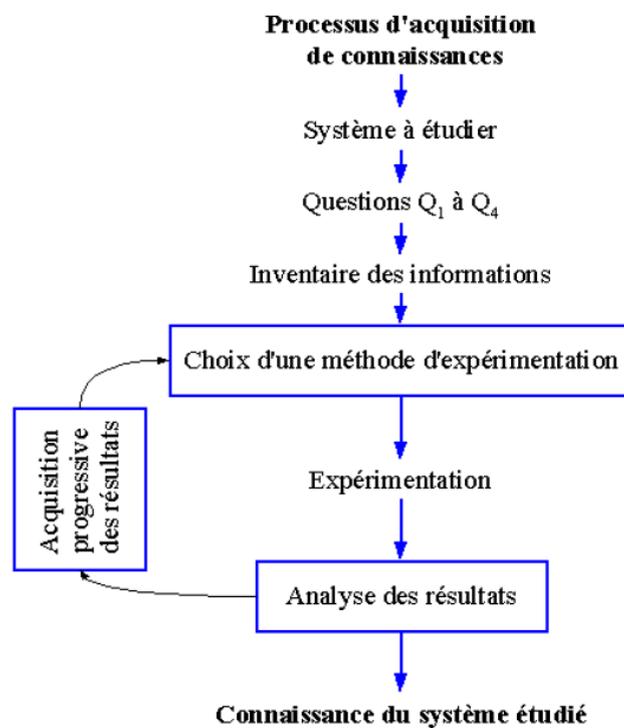


Figure 4 : Processus d'acquisition des connaissances

Ce processus d'acquisition des connaissances se traduit par les étapes suivantes :

- poser correctement le problème que l'on souhaite étudier, phase de questionnement.
- Comme une campagne d'essais coûte souvent cher et prend beaucoup de temps s'assurer que la solution n'existe pas quelque part : bibliographie, notes internes, théorie, interroger les experts etc.
- Une fois que cette phase d'analyse et de documentation réalisée, il faut mettre au point le plan d'expérience et l'exploiter.

La théorie des plans d'expérience s'intéresse aux trois tâches encadrées du schéma.

## **8.1. Choix de la méthode d'expérimentation**

La préparation de la campagne d'essais répond en particulier aux préoccupations suivantes :

- Quelles réponses seront enregistrées à chaque essai ?
- Quels facteurs influencent le processus étudié ?
- Quel est le domaine d'étude de chacun de ces facteurs ?
- Quelles erreurs systématiques pourraient se manifester et comment les écarter ?
- Quelles sont les contraintes expérimentales possibles ?
- Peut-on envisager des essais complémentaires pour évaluer l'erreur expérimentale commise ?

Cette réflexion doit être menée avec soin. Il est important de prendre le temps nécessaire à la clarification des facteurs et des grandeurs d'intérêt. On gagnera également à impliquer plusieurs personnes à ce stade du processus. Celui-ci se termine par le choix du plan d'expérience, avec la prise en compte des erreurs expérimentales éventuelles.

## **8.2. L'analyse des résultats**

L'analyse des résultats commence par un regard critique sur la qualité de la réalisation :

- Un résultat paraît-il aberrant ?
- Les niveaux postulés au départ ont-ils bien été atteints ?
- Le modèle mathématique supposé représente-t-il correctement les résultats ?
- Les risques d'ambiguïté ont-ils été correctement écartés (phénomènes de couplage) ?

Lorsque la qualité des résultats est validée, on peut passer aux calculs et aux interprétations. En fonction des conclusions, des essais complémentaires seront envisagés. Ils peuvent remettre en cause le modèle mathématique (modèle au premier ou au second degré), ou lever une ambiguïté. On essaie, dans la conception des plans d'expériences d'intégrer au mieux les résultats existants de manière à minimiser le temps et maximiser la richesse des informations.

## **9. Conclusion**

La méthode et la démarche expérimentales permettent d'apporter aux connaissances scientifiques des informations mesurées donc réelles. Ce chapitre distingue la méthode expérimentale et l'approche expérimentale.

# Chapitre II :

# Théorie de la mesure

## 1. Introduction

## 2. Définitions liées à la mesure

## 3. Les Caractéristiques des instruments de mesure

## 4. les erreurs de mesure

## 5. Calcul d'incertitudes de mesures

## 6. Une Vue d'ensemble d'un processus expérimental

## 1. Introduction

En sciences de l'ingénieur, mesurer consiste à comparer une grandeur physique caractérisant un phénomène ou un objet avec celle de même nature choisie comme unité de mesure. La valeur numérique de la grandeur mesurée est le nombre qui fixe la relation entre la grandeur mesurée et l'unité de mesure choisie. Le dispositif qui permet de réaliser la mesure est un **instrument de mesure** (ou capteur).

## 2. Définitions liées à la mesure [9]

La connaissance de certaines définitions de métrologie est bien nécessaire pour bien formuler la définition d'un capteur ou d'une chaîne de mesure.

### 2.1. Le mesurande

C'est l'objet de la mesure ou plus simplement la grandeur à mesurer.

### 2.2. Le mesurage :

C'est l'ensemble des opérations pour déterminer la valeur du mesurande.

### 2.3. La mesure

C'est le résultat d'un mesurage. Autrement dit c'est la valeur du mesurande

### 2.4. L'instrument de mesure ou le capteur

En effet, un capteur est un dispositif transformant une énergie de nature quelconque en énergie électrique. La qualité métrologique d'un capteur est l'ensemble des données qui caractérisent la qualité de la mesure effectuée par le dispositif considéré.

### 2.5. La chaîne de mesure

Une chaîne de mesure doit comporter dans sa structure de base comprend trois étages au minimum :

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

La figure 5 présente le schéma général d'une chaîne de mesure. Quelle que soit la complexité et la nature des chaînes de mesure, cette structure de base est exigée. De nos jours, compte tenu des possibilités offertes par l'électronique et l'informatique, les capteurs délivrent un signal électrique et la quasi-totalité des chaînes de mesure sont des chaînes électroniques.



Figure 5 : opération de mesure

### 3. Les Caractéristiques des instruments de mesure [8], [9]

Dans le cadre du vocabulaire international de métrologie, les principales caractéristiques des instruments de mesure sont définies comme suit :

- l'étendue de mesure ;
- la résolution ;
- la sensibilité ;
- l'exactitude ;
- la justesse ;
- la fidélité (répétabilité et reproductibilité)

#### 3.1. Gamme de mesure- étendue de mesure [9]

La gamme de mesure est définie par l'ensemble des valeurs du mesurande pour les quelles un instrument de mesure est supposé fournir une mesure correcte. L'étendue de mesure correspond à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure. Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée « la pleine échelle ». La figure 6 présente la gamme de mesure sur la pleine échelle. Lorsqu'un appareil indicateur possède un cadran gradué en unités de la grandeur à mesurer, son étendue de mesure n'est pas toujours confondue avec l'étendue de graduation.

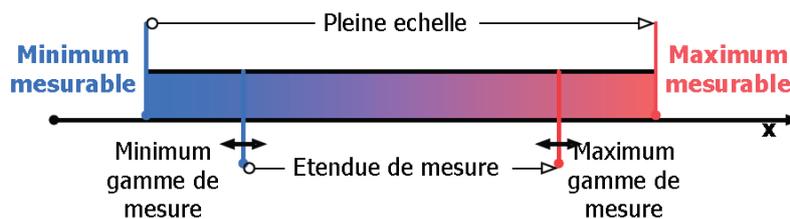


Figure 6 Echelle sur mesure

**Exemple :** Appareil de pesage, étendue de la graduation (0,2kg), étendue de la mesure (150g, 2kg).

#### 3.2. Rangeabilité

On définit la rangeabilité par le rapport minimum entre l'étendue de mesure et la pleine échelle.

#### 3.3. Courbe d'étalonnage [8]

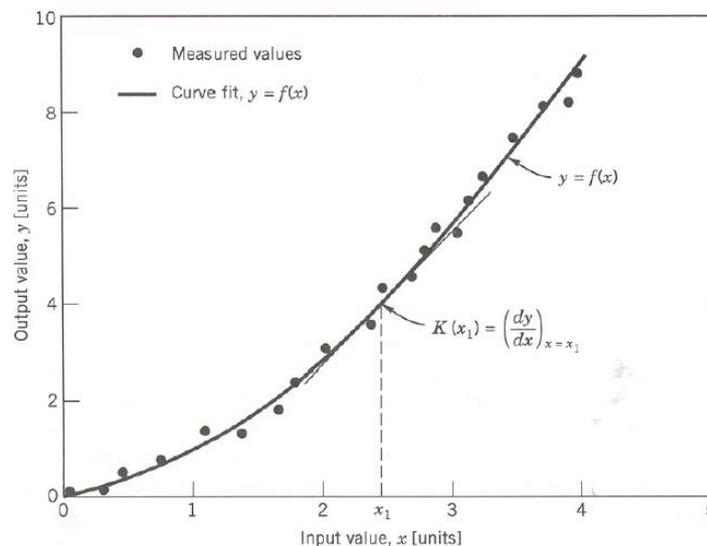
Une courbe d'étalonnage permet de transformer la mesure brute en mesure corrigée ; elle est propre à chaque appareil. Cette courbe est obtenue en imposant à l'instrument une valeur vraie de la grandeur à mesurer, fournie par un appareil étalon, et en relevant avec précision la mesure brute qu'il donne.

L'étalonnage vise à donner une table de correspondance ou une fonction entre la valeur lue, en général, une différence de potentiel, et le mesurande, par exemple, une déformation. Du fait de la complexité à modéliser une chaîne d'acquisition complète et du nombre de grandeurs à

connaître si la modélisation est réalisée, l'étalonnage expérimental est très souvent exigé. Cette opération peut être réalisée au niveau du capteur ou de la chaîne de mesure complète.

Avant étalonnage, il est important d'identifier les grandeurs d'influence et d'en tenir compte dans le cadre d'un étalonnage multi-variables, ou plus simplement de réaliser l'étalonnage dans les conditions d'usage du capteur. En particulier, le temps est un paramètre primordial, la sensibilité d'un capteur étant souvent liée à sa fréquence d'excitation [8].

La Figure 7 montre un étalonnage typique. On observe sur ce graphique plusieurs éléments importants. Tout d'abord, les points de mesure paraissent « raisonnablement dispersés ». Pour quantifier cette dispersion, il est nécessaire de se donner une courbe de référence, courbe d'étalonnage, obtenue par lissage des valeurs précédentes. Cette opération s'effectue correctement si la forme fonction de lissage choisie est correcte. Un défaut de forme dans la fonction de lissage entraîne automatiquement une erreur systématique sur les valeurs mesurées ultérieures. L'écart moyen entre les points et la courbe devient alors une dispersion au sens de la mesure. Enfin, la pente en tout point de la courbe d'étalonnage correspond à la sensibilité du système de mesure.



**Figure 7 : Courbe d'étalonnage typique**

### 3.4. Classe de précision [9]

La classe de précision est donnée par le constructeur, elle exprime l'imperfection des appareils de mesure.

$$Classe = 100 \times \frac{\text{La plus grande erreur possible}}{\text{Etendue de mesure}}$$

### 3.5. La résolution [9]

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

$$Resolution = \frac{Etendue\ de\ mesure}{Nombre\ de\ points\ de\ mesure}$$

### 3.6. Finesse [9]

Ce paramètre qualifie l'incidence de l'instrument de mesure sur le phénomène mesuré. Lorsque l'appareil perturbe très peu la grandeur à mesurer, la finesse est grande.

### 3.7. Rapidité, temps de réponse [9]

C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à suivre les variations de la grandeur à mesurer. Dans le cas d'un échelon de la grandeur entraînant la croissance de la mesure, comme le montre la figure 8, on définit le temps de réponse à 10% : c'est le temps nécessaire pour que la mesure croisse, à partir de sa valeur initiale jusqu'à rester entre 90 % et 110 % de la variation totale.

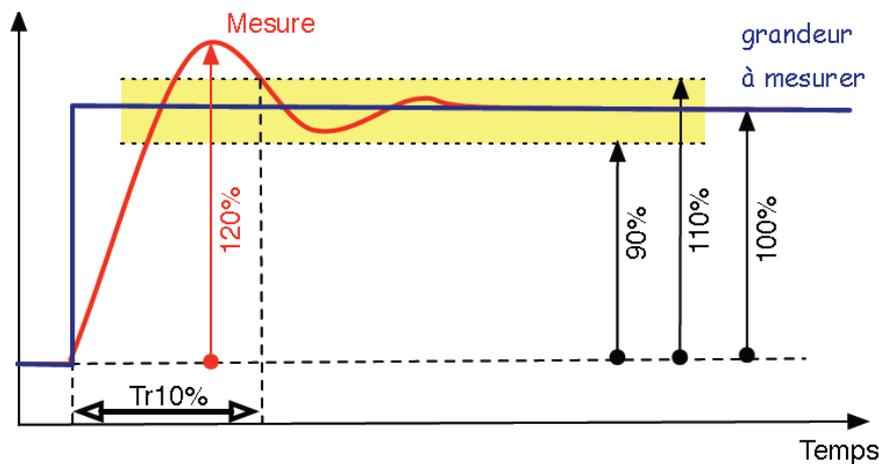
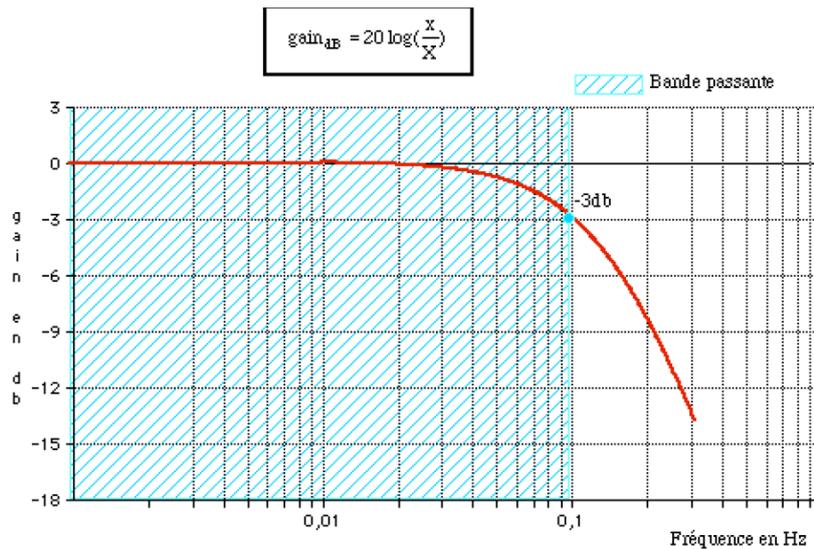


Figure 8 : réponse indicielle

### 3.8. Bande passante

La bande de fréquence pour laquelle le gain de l'instrument de mesure est compris entre deux valeurs, tel que l'exemple de la figure 9, est appelé « bande passante ». Le rapport  $x/X$  présente le gain du capteur ; il est exprimé en dB. Par convention, le signal continu a une fréquence nulle. Dans le cas de l'exemple de la figure 13, on peut estimer le temps de réponse par la formule :  $T=0,16/F_{max}$  avec  $F_{max}=0,1Hz$ .



**Figure 9 : Bande passante**

### 3.9. La sensibilité

La sensibilité est un paramètre exprimant la variation du signal de sortie d'un appareil de mesure en fonction de la variation du signal d'entrée. Soit  $X$  la grandeur à mesurer et  $x$  le signal fourni par l'appareil de mesure. A toutes valeurs de  $X$ , appartenant à l'étendue de mesure, correspond une valeur de  $x$  :

$$x = f(X)$$

La sensibilité autour d'une valeur de  $X$  est le quotient  $m$  :

$$m = \frac{dx}{dX}$$

Si la fonction est linéaire, la sensibilité de l'appareil est constante :

$$m = \frac{\Delta x}{\Delta X}$$

Lorsque  $x$  et  $X$  sont de même nature, la sensibilité est alors sans dimension et peut être appelé gain qui s'exprime généralement en dB.

$$\text{gain}(dB) = 20 \times \log(m)$$

#### **Exemple1 :**

La largeur d'échelon d'un volucompteur est de 1cm et la valeur de cet échelon est de 5cl. La sensibilité de mesure, dans ce cas, est :

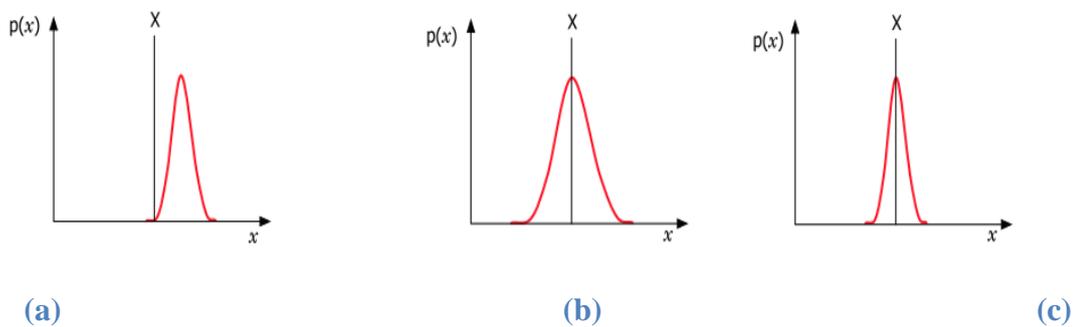
$$S = \frac{10mm}{5cl} = 2 \frac{mm}{5cl}$$

### 3.10. Grandeur d'influence et compensation

Toute grandeur physique autre que la grandeur à mesurer et susceptible de perturber la mesure est appelée grandeur d'influence. Généralement, la température est la grandeur d'influence qui est le plus souvent rencontrée.

### 3.11. La fidélité

Quand une méthode permet de donner des résultats les plus proches possibles lors d'analyses répétées d'un même échantillon, on dit que cette méthode est fidèle. Un appareillage de mesure est qualifié fidèle quand les erreurs de mesure sont faibles (fig. 10a). L'écart-type est souvent considéré comme l'erreur de fidélité. Un instrument est d'autant plus fidèle que son écart type est faible. Un instrument est d'autant plus juste que la valeur moyenne est proche de la valeur vraie (fig. 10b). Un appareil précis est à la fois fidèle et juste (fig. 10c).



**Figure 10 (a) appareil fidèle, (b) appareil juste, (c) appareil précis**

En pratique, la précision est une donnée qui fixe globalement l'erreur maximum (en + ou en -) pouvant être commise lors d'une mesure. Elle est généralement exprimée en % de l'étendue de mesure. Il est à noter que c'est aux valeurs maximales de l'échelle que l'appareil est le plus précis en valeur relative.

### 3.12. La répétabilité

C'est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesurages successifs d'une même grandeur, effectués avec la même méthode, par le même opérateur, avec les mêmes instruments de mesure, dans le même laboratoire, et à des intervalles de temps assez courts.

### 3.13. La reproductibilité

C'est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesurages successifs d'une même grandeur, dans le cas où les mesurages individuels sont effectués : suivant différentes méthodes, au moyen de différents instruments de mesure, par différents opérateurs dans différents laboratoires. La figure 11 met au clair les aspects justesse et reproductible de la méthode de mesure.

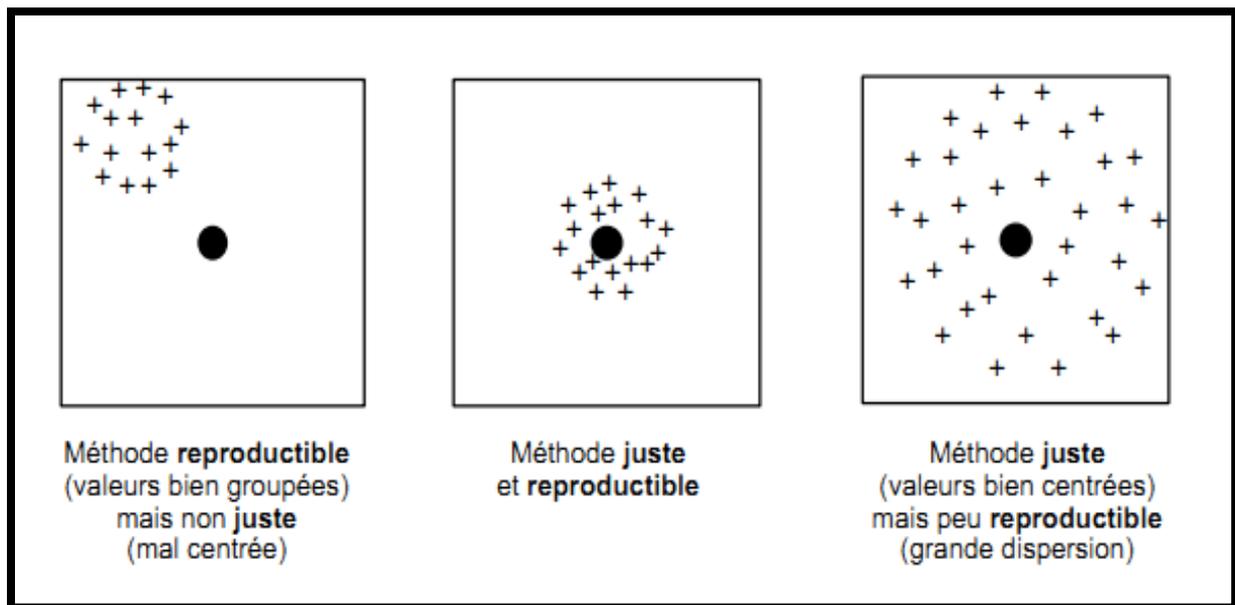


Figure 11 : reproductibilité et justesse de mesure.

#### 4. les erreurs de mesure [9], [11]

L'erreur de mesure détermine la sensibilité et la reproductibilité. Le **calcul d'erreur**, ou **calcul d'incertitudes** est un ensemble de techniques permettant d'estimer l'erreur faite sur un résultat numérique, à partir des incertitudes ou des erreurs faites sur les mesures qui ont conduit à ce résultat. Ceci permet donc d'estimer la propagation des erreurs.

L'erreur de mesure est liée aux conditions matérielles et environnementales dans lesquelles sont réalisées les mesures. Les principales sources d'erreur sont :

- la méthode de mesure inadaptée ;
- la qualité de l'intervenant ;
- les moyens de mesure ;
- les modifications environnementales ;
- les modifications de la matière elle-même ;
- etc.

L'erreur de mesure correspond au résultat d'un mesurage moins une valeur vraie de mesurande.

##### 4.1. Rappels de définitions

**Erreur systématique** : Ce sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, donc ne peuvent pas être éliminées mais susceptible d'être réduite par des corrections convenables. Une erreur systématique est une moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages de même mesurande, effectués dans les conditions de répétabilité moins une valeur vraie du mesurande.

**Erreur aléatoire** : L'erreur aléatoire provient probablement de variations temporelles et spatiales non prévisibles de grandeur d'influence. Plus on augmentera le nombre d'observations, mieux on pourra la quantifier et la réduire. Elle est définie comme le résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande,

effectués dans les conditions de répétabilité. Ce sont des erreurs, non reproductibles, qui obéissent à des lois statistiques.

Par exemple, l'intervention humaine lors de la mesure génère inévitablement des erreurs de mesures aléatoires. On peut distinguer :

- la mauvaise position de la sonde par rapport aux points de mesure définis,
- l'inclinaison de la sonde par rapport à l'axe de la conduite,
- une mauvaise méthode d'intégration,
- la mauvaise lecture de la grandeur mesurée,
- etc.

$$\text{Résultat de mesure} = \text{valeur vraie} + \text{erreur systématique} + \text{erreur aléatoire}$$

On notera que lorsque la totalité des composantes de l'erreur a été identifiée et que les corrections ont été apportées, il subsiste encore une incertitude sur la validité du résultat.

**Erreur accidentelle** : Elle résulte d'une fausse manœuvre, d'un mauvais emploi ou de dysfonctionnement de l'appareil. Elle n'est généralement pas prise en compte dans la détermination de la mesure. En mécanique des fluides, les erreurs accidentelles peuvent être dues à certains facteurs physiques qui peuvent être mal appréhendés tels que:

- la dimension réelle de la section de mesure,
- la détermination de la masse volumique du fluide,
- les fluctuations de la vitesse lors d'effets pulsatoires notamment,
- les phénomènes de turbulences,
- l'obstruction créée par la sonde dans le conduit, etc.

Une bonne connaissance de l'utilisation de ses appareils de mesure, un suivi annuel de leur étalonnage et des différents capteurs utilisés permettra déjà de minimiser les sources d'erreurs systématiques et aléatoires.

#### 4.2. Les types d'erreurs classiques

Dans la pratique, on recense cinq erreurs classiques survenant lors d'une mesure, figure 12 :

- **L'erreur de zéro (offset)** : définit comme la valeur de la mesure  $x$  à  $X=0$ . C'est une erreur qui ne dépend pas de la valeur de la grandeur mesurée ;
- **L'erreur d'échelle (gain)** : C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la valeur de la grandeur mesurée.  $\text{Erreur de gain (dB)} = 20 \log(\Delta x / \Delta X)$
- **L'erreur de linéarité** : La courbe caractéristique n'est pas une droite.
- **L'erreur due au phénomène d'hystérésis** : Il y a un phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.
- **L'erreur de mobilité** : La caractéristique est en escalier. Cette erreur est souvent due à une numérisation du signal

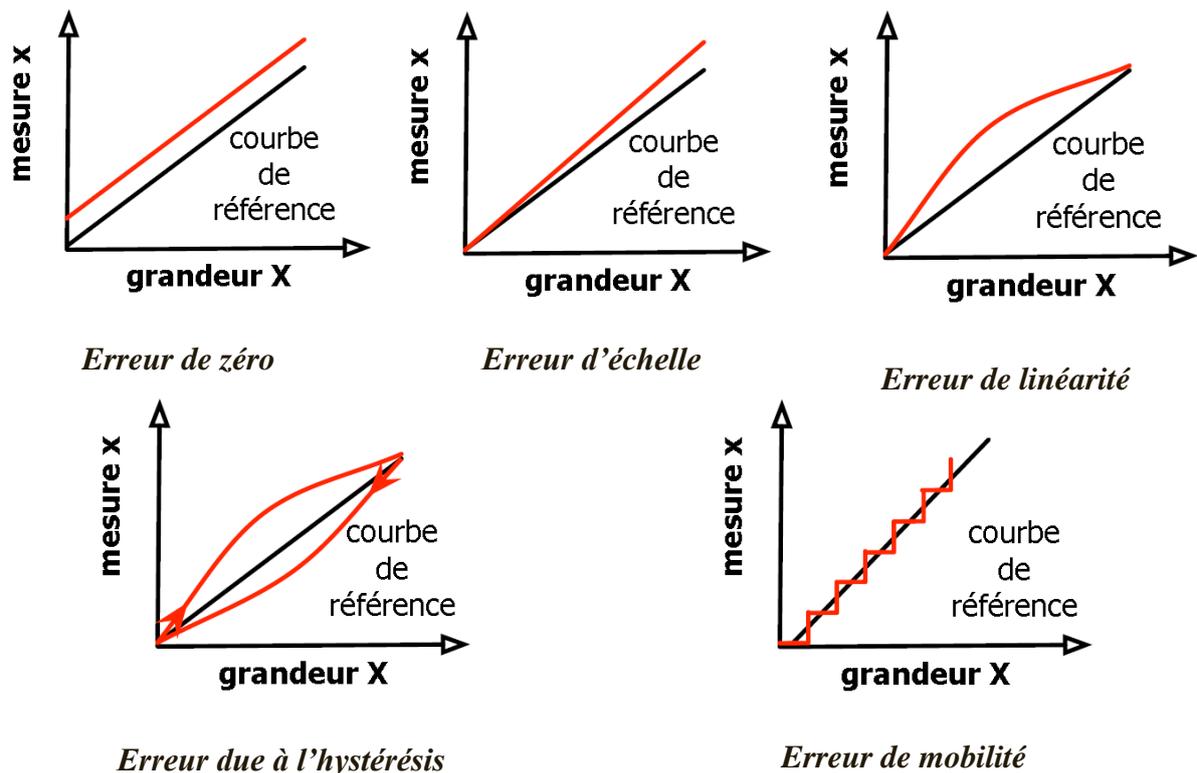


Figure 12 les types d'erreurs classiques [9]

### 5. Calcul d'incertitudes de mesures

C'est un paramètre associé au résultat d'un mesurage ; c'est la limite supérieure de la valeur absolue de l'écart entre la valeur mesurée et la valeur exacte du mesurande. L'incertitude caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

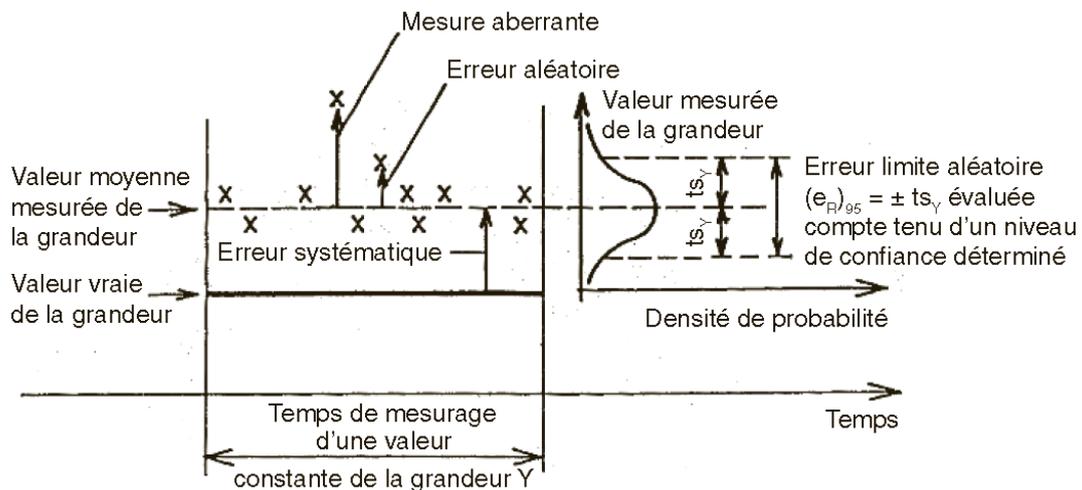


Figure 13 : Représentation graphique de l'incertitude de mesure (doc. AFNOR)

Comme il est présenté sur la figure 13, l'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurage et peuvent être caractérisées par des écarts types expérimentaux. Les autres composantes, qui peuvent être caractérisées par des écarts types, sont évaluées en admettant des lois de probabilité d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres sources d'informations (essais, recoupements...)

En pratique, on ne peut qu'estimer cette incertitude. On distingue deux types d'incertitudes :

- **incertitude absolue**  $\Delta X$ , qui s'exprime en même unité que la grandeur mesurée
- **l'incertitude relative** qui s'exprime généralement en pourcentage (%).

### 5.1. Incertitude absolue instrumentale

L'incertitude instrumentale  $\Delta X$  est l'incertitude due à l'appareil de mesure, X présente le symbole de la grandeur mesurée. Elle est fonction de la précision de l'appareil :

- Pour un appareil à déviation, l'incertitude instrumentale est donnée par les expressions suivantes :

$$\Delta X_{inst} = \frac{classe \cdot calibre}{100}$$

- Pour les appareils à affichage numérique, les constructeurs fournissent une indication permettant de calculer l'incertitude totale sur la mesure. L'incertitude est très souvent donnée de la manière suivante :

$$\Delta X_{inst} = y\% + z \cdot unités$$

Avec : y% représente un premier terme proportionnelle à la lecture X

$$y\% = classe (\%) * lecture$$

z est donné par le constructeur, il est défini comme étant le rapport entre le calibre utilisé et le nombre de point de l'appareil multiplié par la résolution de l'appareil.

$$z = \frac{calibre \text{ del' appareil}}{nombre \text{ de points}} \cdot unité \text{ de résolution}$$

### 4.2. Incertitude absolue de la méthode $\Delta X_{méth}$

Cette incertitude est calculée lorsqu'il y a plus qu'une manière de branchement des appareils de mesure.

### 5.3. Incertitude absolue totale

C'est la somme de l'incertitude instrumentale avec celle de la méthode. Cette incertitude est notée :

$$\Delta X_{tot} = \Delta X_{inst} + \Delta X_{méth}$$

### 5.4. Présentation d'un résultat de mesure

En mécanique, il est suffisant pour les mesures ordinaires de donner un résultat de mesure avec trois « 3 » chiffres significatifs. Afin pour éviter les arrondis de calcul, Il est recommander d'effectuer les calculs intermédiaires avec un nombre de chiffres significatifs

plus élevé. Néanmoins, le résultat final doit être arrondi au même nombre de chiffres significatifs que celui adopté lors de la mesure initiale.

Une incertitude est donnée avec au plus deux chiffres significatifs et n'est jamais écrite avec une précision plus grande que le résultat. Le résultat de mesure peut s'exprimer de deux façons différentes, tout en respectant le nombre de chiffres significatifs :

- en utilisant l'incertitude absolue

$$X = (X_{mes} \pm \Delta X_{tot}) \text{unité de mesure}$$

- en utilisant l'incertitude relative

$$X = \left( X_{mes}(\text{unité de mesure}) \pm \frac{\Delta X_{tot}}{X} (\%) \right)$$

## 6. Une Vue d'ensemble d'un processus expérimental

Dans la conception d'un processus expérimentale typique, l'intervention d'un certain nombre d'éléments est indispensable, ces éléments sont présentés sur la figure 14. Ils peuvent être décrits comme suit :

Tout d'abord, concevoir un modèle expérimental, un dispositif expérimental, correspondant au problème réel posé. Ensuite, il faut exploiter ce montage, et en premier lieu définir un plan d'expériences.

Que soit dans le cadre d'études dynamiques, fréquentielles ou statiques, en mécanique, le modèle expérimental doit être sollicité. La sollicitation passe par un actionneur qui transforme un signal, fréquemment électrique, en signal mécanique. Le système de commande fait l'objet d'un contrôle actif pour être sûr que la sollicitation à appliquer soit conditionnée convenablement et que la commande souhaitée soit est bien réalisée.

L'acquisition se fait par le biais d'un transducteur, comme par exemple une jauge de déformation ou un thermocouple. Ceci permet de transformer le signal mécanique, un allongement ou une température, en signal électrique, une variation de résistance ou une différence de potentiel. Le transducteur est conditionné de manière à permettre la lecture de l'information qu'il contient. L'ensemble des éléments entrant dans le processus d'acquisition constituent la chaîne de mesure.

Ensuite, un modèle correspondant à la chaîne de mesure ou une opération d'étalonnage expérimental, si aucun modèle performant n'existe, permettront de convertir la différence de potentielle « la mesure » en la grandeur mécanique souhaitée « le mesurande ». La dérivée de la courbe d'étalonnage caractérise la variation de la grandeur électrique avec la mesure ; elle définit la sensibilité d'un capteur. Si le capteur est linéaire, la sensibilité est indépendante de la valeur mesurée.

Comme un système de mesure n'est jamais parfait, la qualité de la chaîne de mesure doit être bien démontrée en analysant : incertitude, linéarité, gamme de mesure, grandeurs d'influence, durée de vie, temps de réponse, bande passante ... Ceci permettra de connaître le niveau de

confiance à accorder à la valeur déterminée pour le mesurande. Enfin, le traitement du signal peut inclure par exemple du filtrage, des transformées de Fourier ou en ondelettes.

La finalité de l'étude, qui est la mise en regard d'une sollicitation avec son effet, peut se faire sous deux formes : la présentation du résultat et une discussion, ou une identification. Cette dernière est toujours basée sur un modèle physique exprimable mathématiquement sous forme de résidu, et elle fait appel à des méthodes d'analyse numérique spécifiques. L'avantage le plus important de l'identification est qu'elle conduit à la connaissance de la valeur d'un ou plusieurs paramètres du phénomène observé, mais cet avantage se paie par un temps de développement et de mise au point des outils numériques et expérimentaux qui peut être très important. En outre, le principal danger est de chercher à identifier avant d'avoir compris et modélisé le phénomène observé.

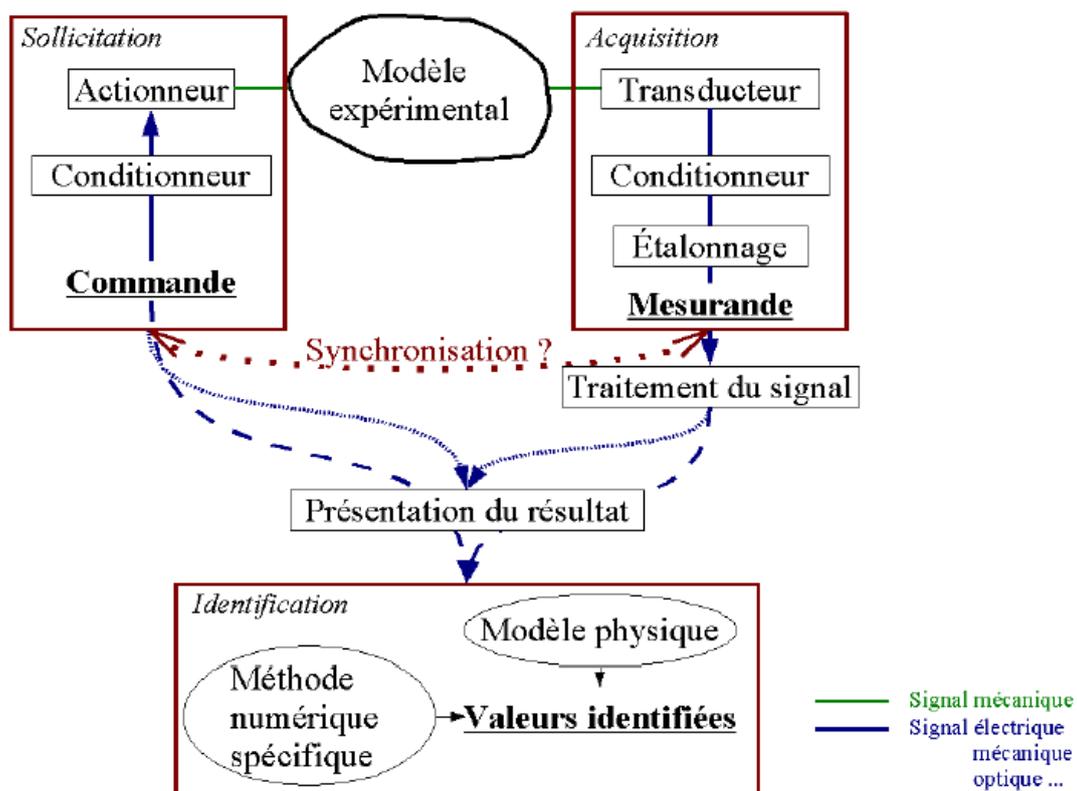


Figure 14 : schéma synoptique d'un processus expérimental

# Bibliographie

[1] René THOM "La méthode expérimentale : un mythe des épistémologues (et des savants ?)", in *La philosophie des sciences aujourd'hui*, sous la direction de Jean Hamburger. Paris. Gauthier-Villars. 1986.

[2] Claude BERNARD, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Paris. Gamier Flammarion. 1966.

[3] Philippe MEIRIEU, *Outils pour apprendre en groupe*, tome 2. Lyon. Chroniques sociales. 1984.

[4] M. Develay. SUR LA METHODE EXPERIMENTALE. ASTER Nc8. 1989. Expérimenter, modéliser, INRP, 29, rue d'Ulm. 75230, Paris Cedex 05.

[5] M. Damou. Méthodes exp en MDF et en thermique

[6] Jeanneleroy. Concept Expérimental 2008-2009

[7] J-P Goussard. Cours de J. Bertsch. Les différentes méthodes de recherche 1 LA METHODE EXPERIMENTALE Le 19 Janvier 2000

[8] J. Molimard. Cours de Mécanique Expérimentale. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011.

[9] Instrumentation CIRA Chap. I : Métrologie 2006-2007

[10] J.- B. Légal Quelques rappels concernant la méthode expérimentale Université Paris Ouest- Nanterre

[11] Thierry Dupuis et Guy Delmas. MÉTROLOGIE EN GÉNIE CLIMATIQUE

Webographie

[11] [http://library.unesco-iicba.org/French/Sciences/Science%20pages/Articles/qu'est-ce\\_que\\_la\\_demarche\\_experimentale.htm](http://library.unesco-iicba.org/French/Sciences/Science%20pages/Articles/qu'est-ce_que_la_demarche_experimentale.htm)

[12] <https://explorable.com/fr/differentes-methodes-de-recherche>