

1.2 Caractéristiques métrologiques

1.2.1 Les erreurs de mesure

- **Grandeurs étalons** : les seuls mesurandes dont la valeur est parfaitement connue.
- **Valeur vraie** du mesurande : elle n'est autre que l'excitation du capteur.
- **Valeur mesurée** : réponse du capteur exprimée en unités du mesurande.
- **Erreur de mesure** : c'est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie, et qui ne peut être qu'estimé.
- **Objectif** : Réduire l'erreur de mesure, c.-à-d., réduire l'incertitude sur la valeur vraie.

1.2.1.1 Erreurs systématiques

- Ce sont des erreurs soit constantes soit à variation lente par rapport au mesurande.
- En général, elles sont dues à une connaissance erronée ou incomplète de l'installation de mesure ou sa mauvaise utilisation.

Les causes les plus fréquentes des erreurs systématiques sont :

a. Erreurs sur la valeur d'une grandeur de référence : Ex : Décalage du zéro ou de la référence du mesurande (température de référence erronée d'un thermocouple) ;

Solution : Vérification soignée de l'ensemble de la chaîne de mesure.

b. Erreurs sur les caractéristiques du capteur : Ex : sensibilité ou courbe d'étalonnage affectées par le vieillissement des composants du capteur, fatigue mécanique ou une altération chimique

Solution : Réétalonnage fréquent.

c. Erreurs dues au mode ou aux conditions d'emploi

- **Erreur de rapidité :** régime permanent non atteint.

- **Erreur de finesse :** la présence du capteur affecte la valeur du mesurande (sonde thermométrique de grande capacité thermique).

d. Erreurs dans l'exploitation des données brutes de mesure : exemples :

- Mauvaise linéarisation par le conditionneur ;

- Autoéchauffement d'une résistance thermique par le courant de mesure ;

1.2.1.2 Erreurs accidentelles

■ L'apparition, comme la valeur de ces erreurs sont aléatoires, quoique leurs causes peuvent toutefois être identifiées. Les plus possibles d'entre elles sont ci-après :

a. Erreurs liées aux indéterminations intrinsèques des caractéristiques instrumentales

- **Erreur de mobilité (ϵ_m)** : Valeur maximale du mesurande, n'entraînant pas de variation détectable de la réponse du capteur.
- **Erreur de lecture (ϵ_l)** d'un appareil à déviation : elle dépend de l'habilité de l'opérateur et de la finesse de l'aiguille.
- **Erreur relative de résolution (ϵ_r)** : elle correspond à la variation minimale du mesurande, mesurable avec un appareil donné. Elle relie l'erreur de mobilité (ϵ_m) à l'erreur de lecture (ϵ_l) à l'aide de la relation :

$$\epsilon_r = \sqrt{\epsilon_m^2 + \epsilon_l^2}$$

- **Erreur d'hystérésis (ϵ_h)** : elle est définie comme étant la moitié de l'écart maximal des valeurs de la grandeur de sortie correspondant à une valeur du mesurande, selon que cette dernière est obtenue par valeurs croissantes ou décroissantes du mesurande.

Elle est due à des éléments dans la chaîne de mesure comportant une hystérésis (hystérésis mécanique d'un ressort, hystérésis magnétique d'un matériau ferromagnétique) (effet de mémoire, reliant la réponse aux conditions d'utilisation antérieures)

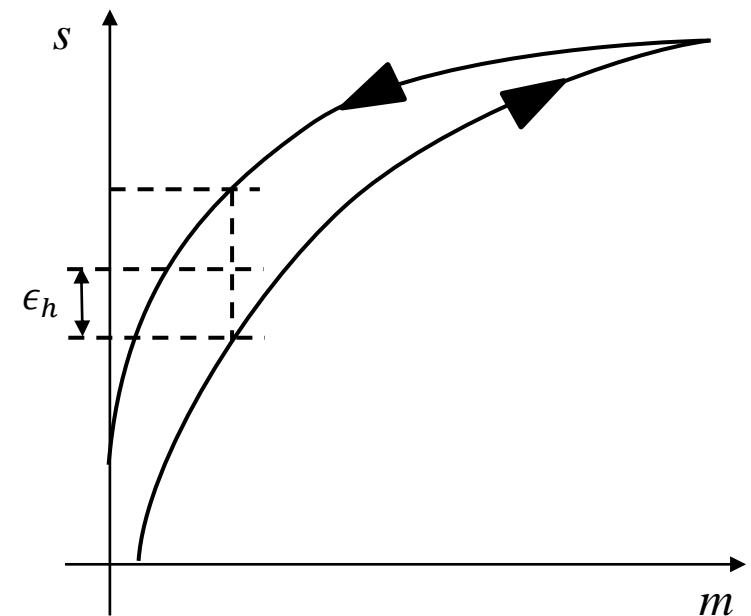


Figure 1.14 – Erreur d'hystérésis.

- **Erreur de quantification d'un convertisseur analogique-numérique** : l'opération de quantification attribue une valeur unique aux valeurs des échantillons du signal analogique dans une plage correspondant à un bit de poids le plus faible (LSB: *Less Significant Bit*). L'incertitude maximale ainsi entraînée est de $\pm \frac{1}{2}$ LSB.

b. Erreurs dues à la prise en compte par la chaîne de mesure de signaux parasites de caractère aléatoire

- **Bruit de fond** : dû à l'agitation thermique des porteurs de charges dans les résistances et les composants actifs, entraînant des signaux parasites se superposant à la sortie du capteur.
- **Inductions parasites** : dues aux rayonnements électromagnétiques, fréquence industrielle en particulier.
- **Fluctuations de la tension d'alimentation** : elles entraînent notamment des dysfonctionnements dans les différents circuits de conditionnement, modifiant ainsi l'amplitude du signal de sortie du capteur.
- **Dérive temporelle** : dérive progressive dans le temps de certains circuits comme les amplificateurs pouvant aboutir jusqu'à la saturation.

c. Erreurs dues à des grandeurs d'influence

- Un étalonnage n'ayant pas tenu compte des grandeurs d'influence, donne lieu à une contribution aléatoire de ces dernières. Ex: Un capteur ayant été étalonné à 20 °C, toute variation de température de part ou d'autre de 20 °C pourra entraîner des variations de performances et donc du signal mesuré.

1.2.1.3 Fidélité, justesse et exactitude (Normes ISO 5725-1 (12-1994) et VIM - JCGM 200:2012 (Bureau International des Poids et Mesures) - 3e édition - 2008)

- Les résultats de mesures répétées, semblent être dispersés à cause des erreurs accidentelles.
- Un traitement statistique de ces résultats permet de :
 - connaître la valeur la plus probable du mesurande ;
 - fixer les limites de l'incertitude.
- **La moyenne (\bar{m})** : un mesurage répété n fois, d'un même mesurande de valeur inconnue, donne les résultats : m_1, m_2, \dots, m_n , la valeur moyenne \bar{m} est par définition :

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n}$$

- **L'écart type (σ)** : il permet d'évaluer la dispersion des résultats de mesure, il est défini par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_n - \bar{m})^2}{n}}$$

■ La loi normale (loi de Gauss)

- lorsque les erreurs accidentelles affectant les différents mesurages sont indépendantes (l'apparition d'un résultat n'est pas influencée par celle d'un autre), la probabilité d'apparition des différents résultats satisfait habituellement à la loi normale dite encore loi de Gauss, donnée par :

$$p(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{(m - \bar{m})^2}{2\sigma^2}\right\}$$

où $p(m)$ est la densité de probabilité pour la valeur m du mesurande, avec \bar{m} est la valeur de m la plus probable.

- la probabilité $P(m_1, m_2)$ d'obtenir comme résultat d'une mesure une valeur du mesurande comprise entre deux valeurs m_1 et m_2 peut s'écrire :

$$P(m_1, m_2) = \int_{m_1}^{m_2} p(m) dm$$

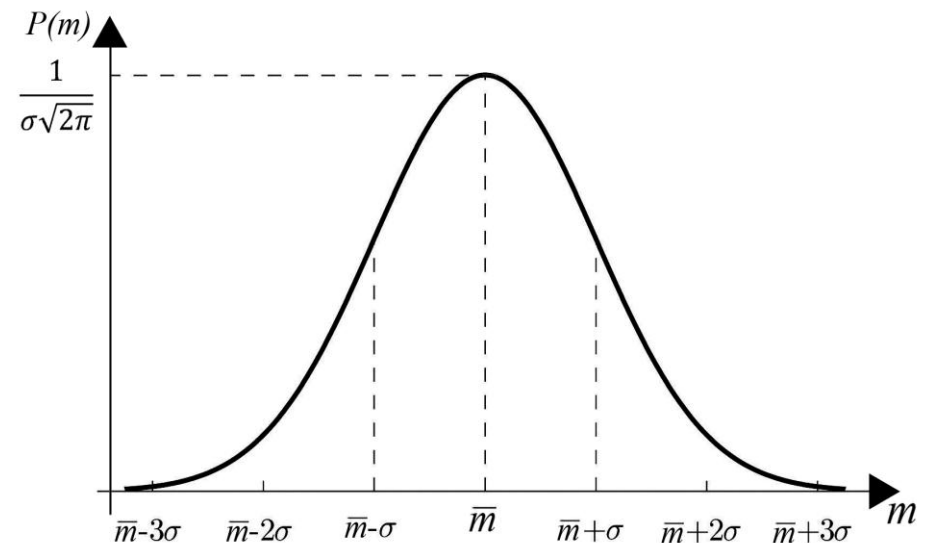
- la probabilité d'apparition d'un résultat de mesurage dans les limites indiquées est :

$$P(\bar{m} \pm \sigma) = 68,27,$$

$$P(\bar{m} \pm 2\sigma) = 95,45,$$

$$P(\bar{m} \pm 3\sigma) = 99,73.$$

Figure 1.15 – Loi normale.



1.2.1.3.1 La fidélité

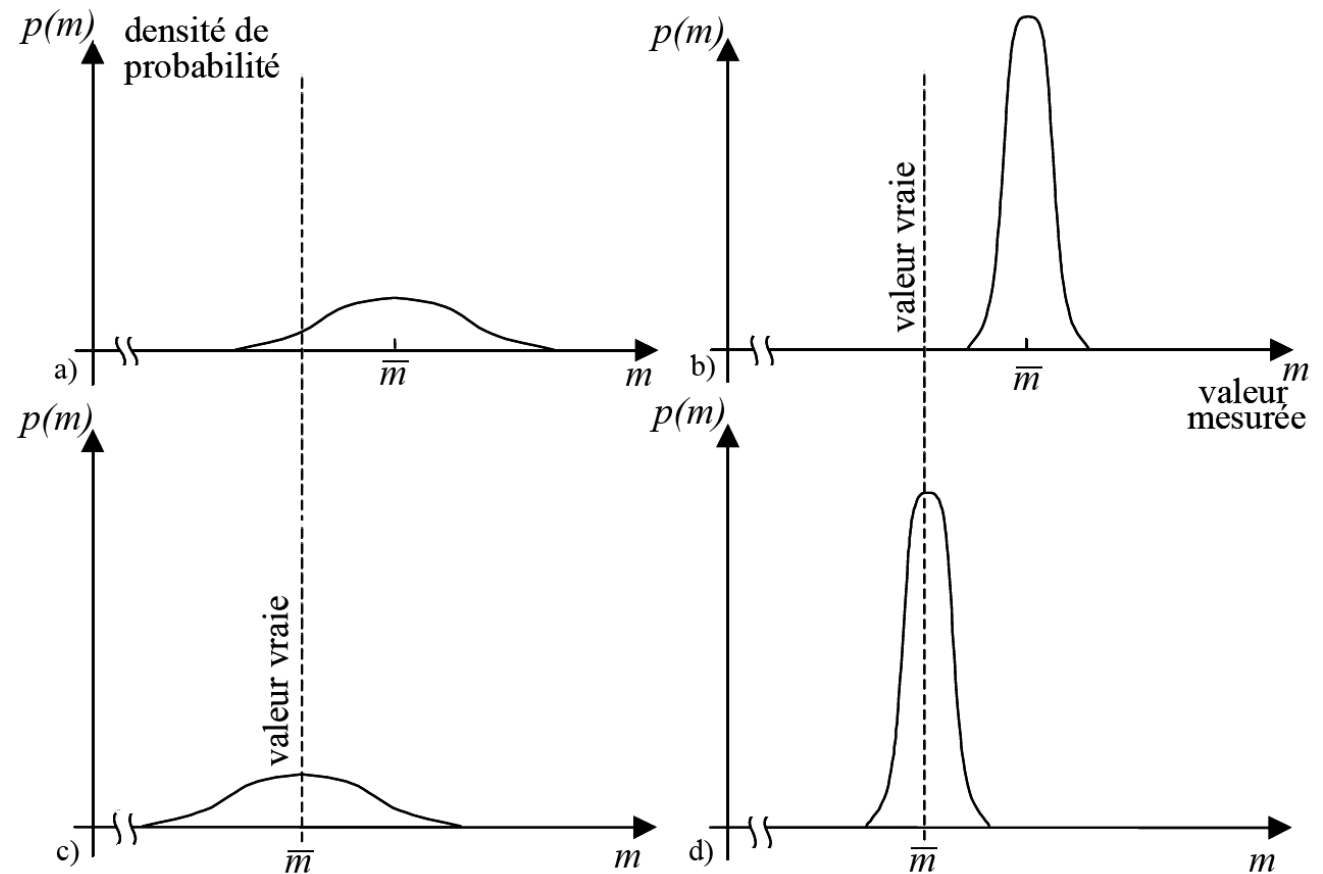
- c'est la caractéristique d'un dispositif de mesure fournissant des résultats de mesure groupés autour de leur valeur moyenne ;
- un dispositif de mesure **fidèle** présente des erreurs accidentelles faibles ;
- de par sa définition, l'écart type est considéré comme l'erreur de fidélité.

1.2.1.3.2 La justesse

- c'est la caractéristique d'un dispositif de mesure ayant la valeur moyenne de son mesurande la plus proche possible de la valeur vraie ;
- un dispositif de mesure **juste** présente des erreurs systématiques faibles ;

1.2.1.3.3 L'exactitude

- c'est l'aptitude d'un dispositif de mesure à donner des résultats qui, individuellement, sont proches de la valeur vraie du mesurande ;
- un dispositif de mesure **exact** est à la fois fidèle et juste (**Fig. 1.16**) ;



■ **Conclusion** : la mesure d'une grandeur physique avec une exactitude donnée exige :

1. le choix d'une méthode de mesure appropriée ;
2. la sélection du capteur approprié ;
3. la conception et la réalisation de la chaîne de mesure associée.

Figure 1.16 – Différents cas de répartition des résultats de mesure.

- a) dispositif ni juste, ni fidèle ;
- b) dispositif fidèle mais non juste ;
- c) dispositif juste mais non fidèle ;
- d) dispositif juste et fidèle donc exact.

1.2.2 Etalonnage du capteur

C'est l'opération permettant de retrouver sous une forme graphique (courbe d'étalonnage) ou numérique (équation caractéristique du capteur) la relation entre les valeurs du mesurande et les valeurs de la réponse électrique du capteur, compte tenu de tous les paramètres additionnels susceptibles de modifier cette dernière (paramètres liés au mesurande et son environnement, et les grandeurs d'influence).

1.2.2.1 Etalonnage simple

- Il s'applique à un mesurande défini par une grandeur physique unique et un capteur non sensible ou non soumis à des grandeurs d'influence (mesurande statique, ex : distance fixe, force constante).
- Il consiste à associer à des valeurs bien déterminées du mesurande, des valeurs correspondantes de la sortie électrique.

Il se fait à l'aide des deux procédures suivantes :

a. Etalonnage direct ou absolu : des mesurandes étalons sont utilisés, d'une exactitude de l'ordre de cent fois plus celle recherchée par le capteur (ex: cales étalons, verniers de grande exactitude ou interféromètre laser pour les capteurs de déplacement ou de mouvement (**Fig. 1.17**)).

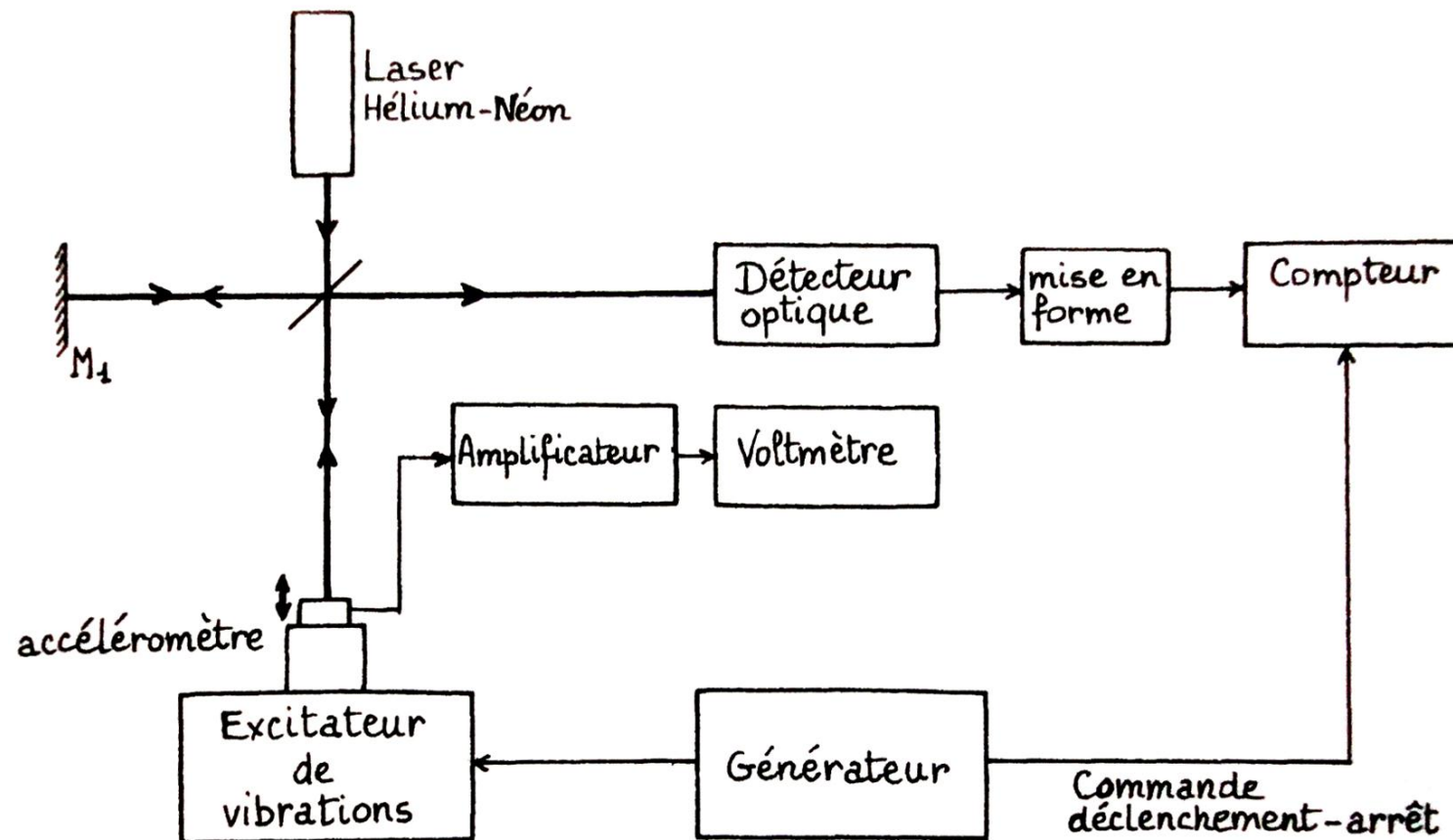


Figure 1.17 – Etalonnage absolu d'un accéléromètre. L'accéléromètre est soumis à une vibration sinusoïdale de fréquence f connue ; en fonction de l'amplitude X_1 du déplacement, l'accélération a pour amplitude $A_1 = 4\pi^2 f^2 X_1$. La valeur de X_1 est déduite du nombre de franges d'interférence défilant devant le détecteur optique pendant une période de l'excitation ; pour chaque valeur de A_1 le signal de sortie de l'accéléromètre est déduit de l'indication d'un voltmètre de grande exactitude.

b. Etalonnage indirecte ou par comparaison : un autre capteur étalon est utilisé, stable et possédant une courbe d'étalonnage. Le capteur de référence et le capteur à étalonner sont soumis dans les mêmes conditions, simultanément si possible, à l'action de mesurandes identiques (**Fig. 1.18**).

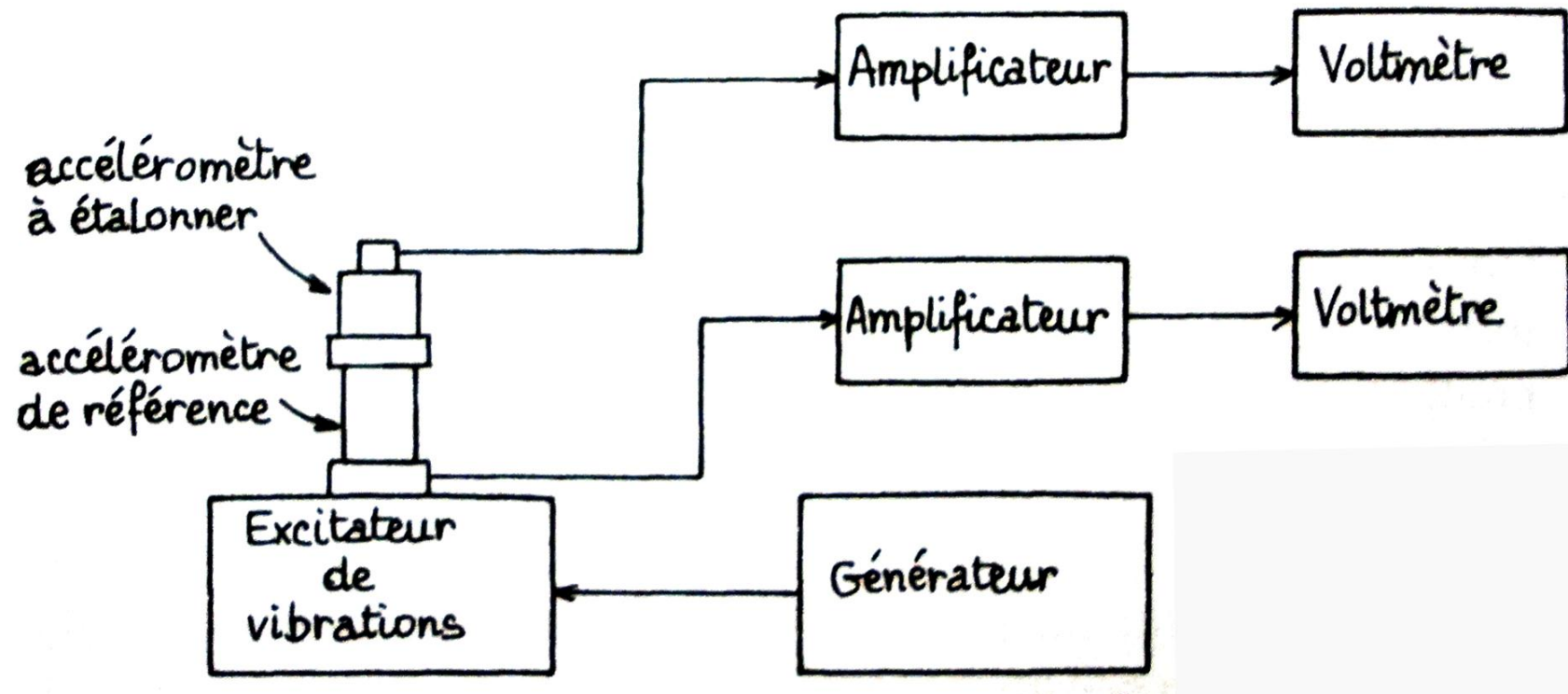


Figure 1.18 – Etalonnage d'un accéléromètre par comparaison avec un accéléromètre de référence.

1.2.2.2 Etalonnage multiple

Une série d'étalonnages successifs est réalisée afin de prendre en compte l'ensemble des grandeurs d'influence additionnelles.

1.2.2.3 Validité d'un étalonnage : répétabilité et interchangeabilité

La validation de l'étalonnage se pour :

- un capteur venant d'être étalonné ;
- un capteur de même fabricant n'ayant pas fait l'objet d'un étalonnage individuel.

a. Répétabilité : la qualité d'un capteur qui dans des conditions identiques et dans des limites spécifiques donne une grandeur de sortie identique.

b. Interchangeabilité : pour une série de capteurs, elle consiste à obtenir des résultats identiques pour tous les capteurs de la série.

1.2.3 Limites d'utilisation du capteur

■ Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur, en comparaison avec la réponse lors de son étalonnage ou avec les spécifications du constructeur.

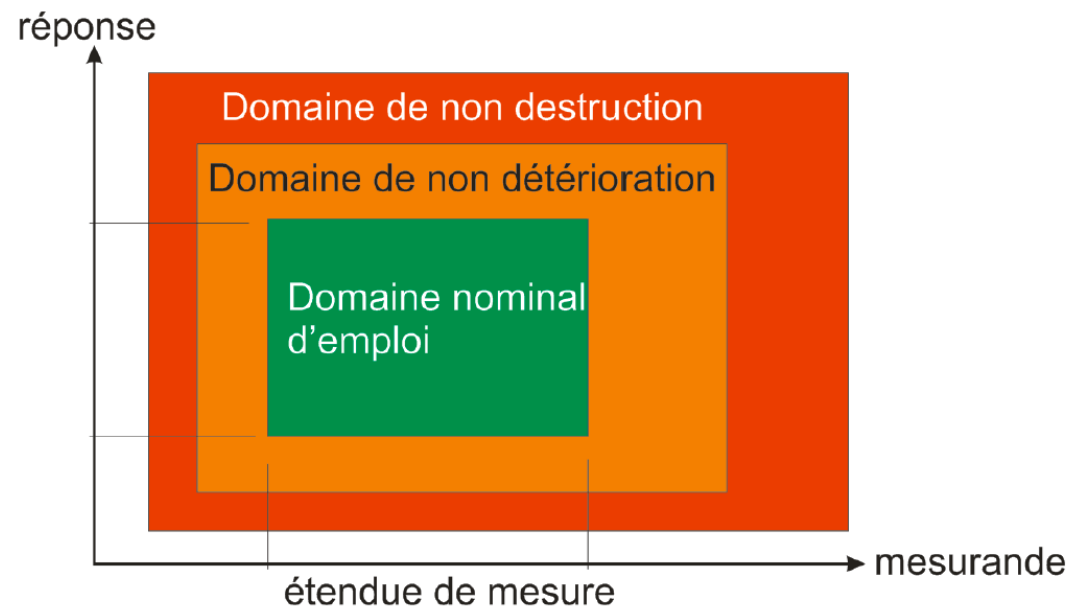


Figure 1.19 – Limites d'utilisation du capteur.

■ Il est donc indispensable que l'utilisateur soit averti des diverses limites d'utilisation d'un capteur et des risques qu'il encourt à les dépasser.

a. Domaine nominal d'emploi : c'est le domaine où le capteur est utilisé dans des conditions normales d'utilisation.

b. Domaine de non-détérioration : c'est un domaine où on peut utiliser le capteur avec plus ou moins de risques pour que les caractéristiques du capteur changent. Cette éventuelle altération est toutefois réversible.

c. Domaine de non-destruction : domaine de détérioration précédant juste le point de destruction. Dans ce domaine les modifications des caractéristiques du capteur se font de manière irréversible. La réutilisation du capteur dans un domaine nominal d'emploi nécessite donc un nouvel étalonnage.

d. Étendue de mesure (E.M.) : c'est la plage du mesurande dans laquelle le fonctionnement du capteur répond à des spécifications données. Elle est souvent identique au domaine nominal d'emploi.

Exemple :

| Domaine | Mesurande | Température |
|--------------------------|-------------|-----------------|
| nominal | 1daN (E.M.) | 0 °C à 60 °C |
| non-détérioration | 1,5 x E.M. | -20 °C à 100 °C |
| non-destruction | 3 x E.M. | -50 °C à 120 °C |

Tableau 1.4 – Capteur de force à jauges piézorésistives N556-1 (fabricant J.P.B)

1.2.4 Sensibilité

1.2.4.1 Définition générale

- c'est une caractéristique déterminante dans le choix d'un capteur ;
- en général, la sensibilité S est définie, autour d'une valeur m_i constante du mesurande, par rapport à la variation Δs de la grandeur de sortie à la variation Δm du mesurande qui lui donne naissance :

$$S = \left(\frac{\Delta s}{\Delta m} \right)_{m=m_i}$$

- S dépend du mesurande mais aussi du choix des matériaux, de leur dimensionnement, ou de leur mode d'assemblage, des grandeurs d'influence, de la fréquence de variation du mesurande, etc.
- Il existe deux types de fonctionnements associés à la sensibilité :
 - a. fonctionnement statique** : où le mesurande a une valeur constante ou très lentement variable : flux lumineux, accélération constante ;
 - b. fonctionnement dynamique** : où le mesurande varie rapidement : flux lumineux modulé, accélération liée aux vibrations d'une structure.

1.2.4.2 Sensibilité en régime statique

- elle est définie en un point de fonctionnement Q_i de la caractéristique statique (courbe d'étalonnage), obtenu en régime permanent après étalonnage, comme le rapport de l'incrément Δs à l'incrément Δm qui le provoque ;
- la sensibilité en régime statique n'est autre que la pente de la caractéristique statique au point de fonctionnement

1.2.4.2 Sensibilité en régime dynamique

- la sensibilité en régime dynamique peut être définie lorsque le mesurande est une fonction dynamique du temps ; ainsi la sortie s aura la même périodicité (fréquence : $f = \omega/2\pi$) que le mesurande m :

$$m(t) = m_0 + m_1 \cos \omega t$$

La réponse du capteur est alors :

$$s(t) = s_0 + s_1 \cos(\omega t + \psi)$$

où s_0 est la valeur constante correspondant à m_0 , définissant le point de repos Q_0 sur la courbe d'étalonnage statique

s_1 est l'amplitude de variation de la sortie provoquée par la partie variable du mesurande et ψ le déphasage entre variations de la sortie et de l'entrée.

Dans ce cas (mesurande est une fonction périodique), on définit la sensibilité statique comme :

$$S = \left(\frac{s_1}{m_1} \right)_{Q_i}$$

■ L'évolution de la sensibilité en régime dynamique en fonction de la fréquence f du mesurande, soit $S(f)$, définit la **réponse en fréquence** du capteur.

Lorsque la variation du mesurande, sans être sinusoïdale, est périodique, de période $T = 2\pi/\omega$, elle peut être décomposée en série de Fourier :

$$m(t) = m_0 + \sum_{n=1}^{\infty} m_n \cos(n\omega t + \phi_n)$$

La réponse du capteur est alors de la forme:

$$s(t) = s_0 + \sum_{n=1}^{\infty} s_n \cos(n\omega t + \phi_n)$$

Cette réponse en fréquence est la superposition des réponses aux différentes composantes $m_n \cos(n\omega t + \phi_n)$, chacune de ces réponses étant fixée par sa propre sensibilité telle qu'elle résulte de la réponse en fréquence :

Ainsi pour chaque fréquence de f_1 jusqu'à f_n , on a :

$$S(f_n) = \left(\frac{s_n}{m_n} \right)_{Q_0} \quad \text{où} \quad f_n = \frac{n\omega}{2\pi}$$

- La variation de la sensibilité est généralement due à l'inertie mécanique, électrique ou magnétique, empêchant notamment en grandes fréquences le capteur de suivre les variations du mesurande et ainsi la délivrance instantanée de la réponse (souvent des constantes de temps RC ou L/R sont introduites quelque part dans la chaîne de mesure).
- L'équation qui relie les variations de s à celle de m est sous sa forme la plus générale une équation différentielle qui selon les cas est du premier ou du second ordre.

1.2.5 Linéarité

1.2.5.1 Conditions de linéarité

- Il y a linéarité dans une plage déterminée d'un mesurande si la sensibilité y est indépendante de la valeur du mesurande.
- Intérêt de la linéarité :
 - simplicité du traitement du signal (mesurande), si en plus de la linéarité du capteur, tous les étages en aval dans la chaîne de mesure sont également linéaires (la valeur numérique affichée est directement proportionnelle au mesurande primaire);
 - Dispense d'avoir recours à un circuit de linéarisation dans la chaîne de mesure.
- **En régime statique** : la linéarité est liée à l'existence d'une partie rectiligne sur la caractéristique statique et le fonctionnement du capteur demeure linéaire tant que les variations du mesurande sont limitées à cette zone.
- **En régime dynamique** : lorsque le mesurande varie en fonction de la fréquence, la sensibilité a pour expression :
 - pour un système du premier ordre :

$$S(f) = S(0) \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

- pour un système du second ordre :

$$S(f) = S(0) \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + 4\xi^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

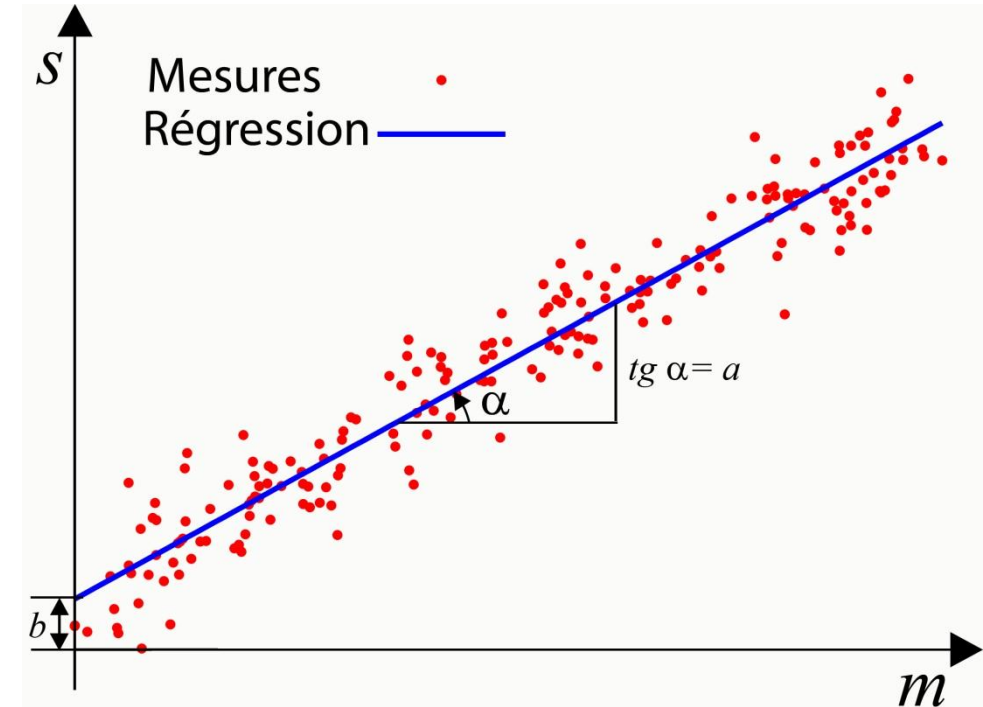
Ainsi, la linéarité dynamique exige que :

1. linéarité en régime statique : $S(0) \neq f(m)$
2. les paramètres dynamiques de $S(f)$ soient constants: dans la plage où $S(0) = Cte$: f_c , f_0 et ξ sont constants.

1.2.5 .2 Ecart de linéarité

■ **Objectif** : A partir d'un certain nombre de points de mesure d'étalonnage, essayer de calculer l'équation de la **meilleure droite (régression linéaire)**, telle que la somme des carrés des écarts δ_s des divers points expérimentaux à cette droite soit minimale (méthode des moindres carrés) (**Fig. 1.20**).

Figure 1.20 – Régression linéaire tracée dans un nuage de point expérimentaux.



Ainsi il peut être démontré que l'équation de la meilleure droite est :

$$s = am + b$$

Avec :

$$a = \frac{N \cdot \sum s_i \cdot m_i - (\sum s_i) \cdot (\sum m_i)}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}$$

$$b = \frac{(\sum s_i) \cdot (\sum m_i^2) - (\sum s_i \cdot m_i) \cdot (\sum m_i)}{N \cdot \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}$$

N étant le nombre de points d'étalonnage.

1.2.6 Rapidité - Temps de réponse

- L'établissement d'un régime permanent est toujours précédé d'un régime transitoire qui est toujours important de connaître.
- La fonction du temps de ce régime transitoire est la solution générale sans second membre de l'équation différentielle du système.

1.2.6.1 Définitions

- La rapidité permet de suivre dans le temps les variations du mesurande, elle est définie par le temps de réponse qui est l'intervalle du temps entre une variation brusque du mesurande (échelon) jusqu'à ce que la variation de la sortie ne diffère plus de sa valeur finale d'un écart supérieur à une limite ε % conventionnellement fixée.
- Un temps de réponse doit toujours être donné avec l'écart ε % auquel il correspond : $t_r(\varepsilon \%)$, et plus ce temps de réponse est court plus le capteur est qualifié de rapide.
- pour plus de précision, d'autres paramètres temporels ont été définis dans les régimes transitoires (**Fig. 1.21**) :

Dans le cas d'un échelon montant :

- temps de retard à la montée ou délai de monté, t_{dm} , est le temps nécessaire pour que la sortie s croisse, à partir de sa valeur initiale, de 10 % de sa valeur totale ;
- temps de montée, t_m , est l'intervalle de temps correspondant à la croissance de s de 10 % à 90 % de sa variation totale ;

Dans le cas d'un échelon descendant :

- temps de retard à la chute ou délai de chute, t_{dc} , est le temps nécessaire pour que la sortie s décroisse, à partir de sa valeur initiale, de 10 % de sa valeur totale ;
- temps de chute, t_c , est l'intervalle de temps correspondant à la décroissance de s de 10 % à 90 % de sa variation totale ;

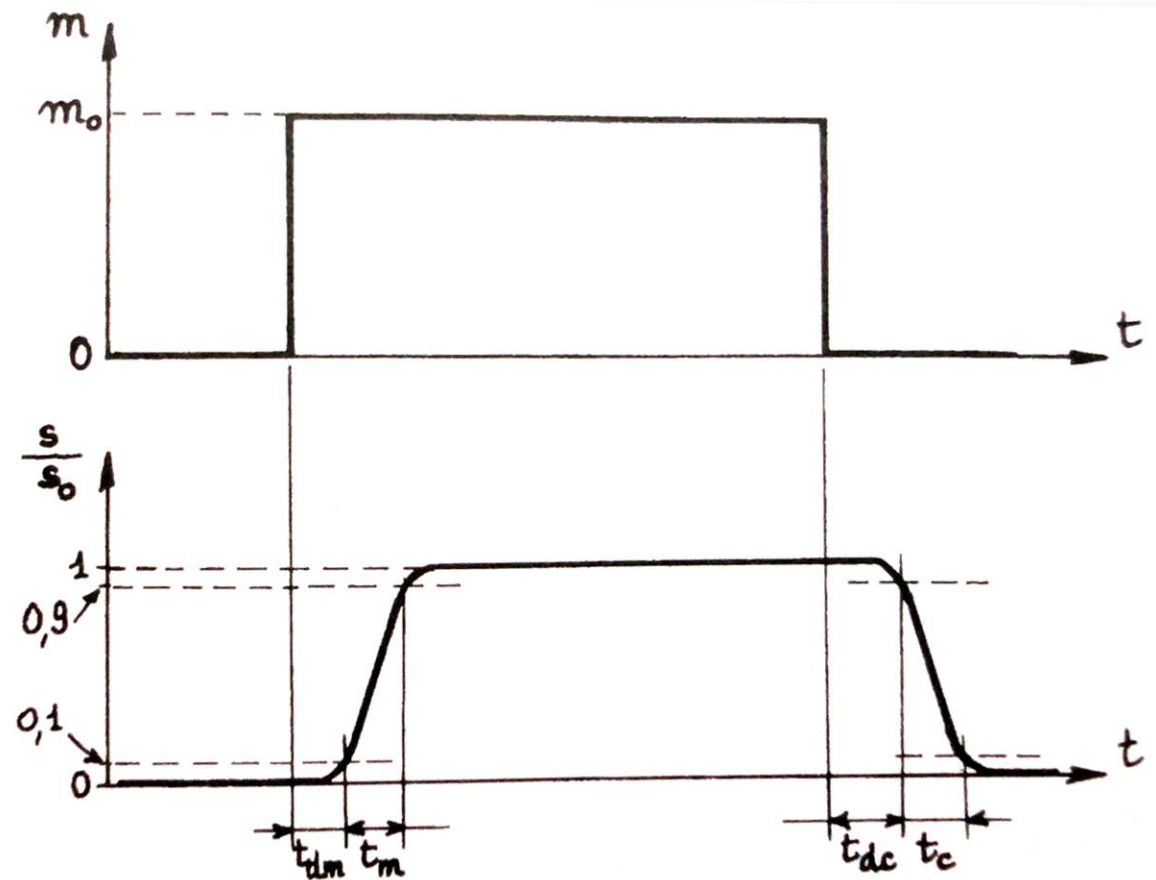


Figure 1.21 – Définition de divers intervalles de temps caractéristiques du régime transitoire.

1.2.7 Finesse

- c'est une caractéristique permettant d'estimer l'influence de la présence du capteur et ses liaisons sur la valeur du mesurande.
- la finesse est définie par la valeur d'une grandeur physique qui dépend de la nature du capteur et qui détermine sa réaction sur le mesurande (**Tab. 1.5**).

| Type de capteur | Grandeurs définissant la finesse |
|--|---|
| Transformateur différentiel (déplacement rectiligne) | Masse de l'équipage mobile (g) et effort de déplacement (N) |
| Potentiomètre circulaire (déplacement angulaire) | Moment d'inertie (g.cm^2) et couple résistant (N.cm) |
| Cellule dynamométrique (force) | Allongement sous charge (mm) ou raideur (N/m) |
| Manomètre (pression) | Volume mort (cm^3) et volume de respiration (cm^3) |
| Accéléromètre | Densité surfacique (g/cm^2) et surface de base (cm^2) |
| Résistance thermométrique Thermocouple | Capacité calorifique ($\text{J/}^\circ\text{C}$) et conductance thermique entre sonde et milieu extérieur ($\text{W/}^\circ\text{C}$) |

Tableau 1.5 – Spécification de la finesse pour différents types de capteurs.