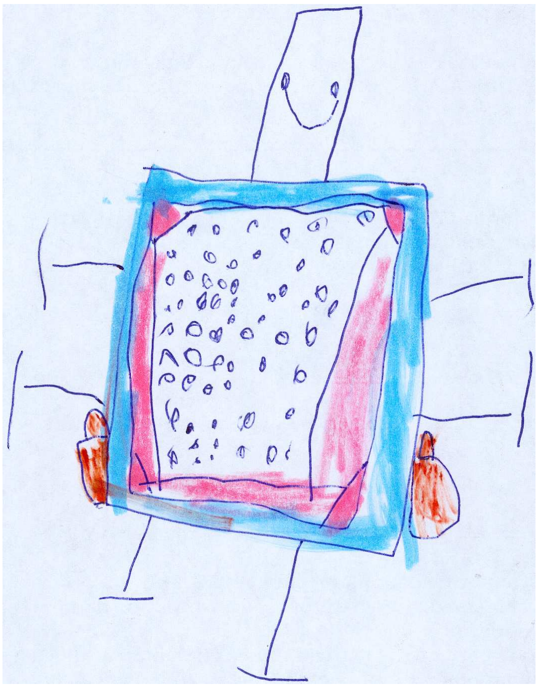
UNIVERSITÉ PARIS 12 VAL de MARNE
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Généralités sur les capteurs



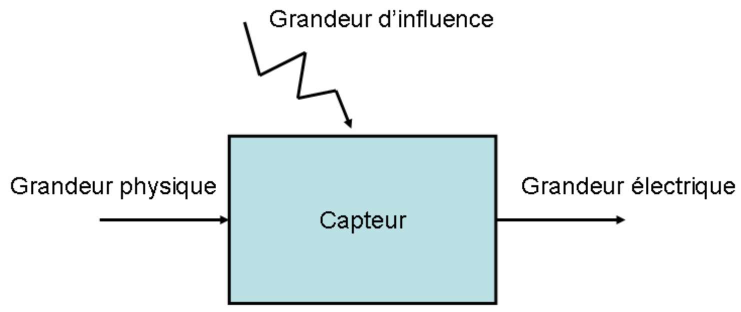
Philippe Meyne – philippe.meyne@univ-paris12.fr – 2008/09

Table des matières

I – Qu'est ce qu'un capteur ?

1.1 - Définitions

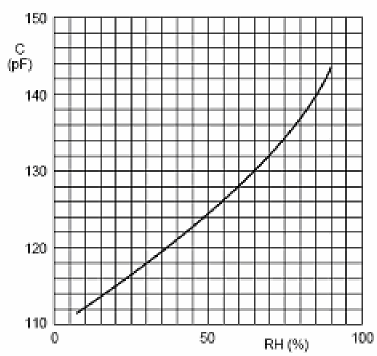
Dans un grand nombre de domaine, il est nécessaire d'avoir accès à une grandeur physique. Cette connaissance permet de connaître l'état physique d'un système et de pouvoir prendre des décisions quand à la conduite de celui-ci. Les décisions peuvent être automatique c'est à dire prise par un calculateur ou prise par un opérateur humain via une interface homme machine. Dans les deux cas, l'état physique du système doit être connu sous la forme d'une grandeur électrique : tension ou courant car les systèmes de traitement n'utilise que ces grandeurs. L'opération qui permet de transformer une grandeur physique en une grandeur électrique est réalisée par un capteur :



La grandeur physique à mesurer est désignée comme le mesurande. La grandeur électrique est soit un courant ou une tension soit la variation d'une résistance ou d'une impédance : inductance ou capacité d'un condensateur. Le capteur peut être vu comme une boîte noire ayant comme entrée un mesurande et comme sortie une tension ou un courant électrique. Néanmoins, la sortie d'un capteur ne dépend pas uniquement que du mesurande, elle est aussi fonction de grandeur d'influence. Il s'agit de grandeurs physiques qui viennent modifier les caractéristiques du capteur. Ainsi, on peut écrire :

$$g = f(m,\theta)$$

où g représente la grandeur de sortie, m le mesurande et θ les grandeurs d'influence. Cette relation est rarement connu et le plus souvent non linéaire. Ainsi, par exemple, un capteur d'humidité voit la capacité d'un condensateur variée en fonction du taux d'humidité. La relation qui lie cette capacité au taux d'humidité est représenté pas la courbe :



Elle montre que la fonction qui lie la sortie : la variation de capacité au mesurande n'est pas linéaire.

1.2 – Modèle d'un capteur

Du point de vue électrique, deux types de capteur existent. Le premier type est dit capteur passif. Il s'agit de capteur dont la grandeur de sortie est une variation résistance ou une impédance. Il constitue des éléments passifs d'un circuit électrique. Ce circuit a pour rôle de leur apporter une énergie pour convertir la variation d'impédance en une variation de tension ou de courant. Le modèle électrique équivalent est celui d'un dipôle dont l'impédance équivalente varie en fonction du mesurande. Le circuit porte le nom de conditionneur.

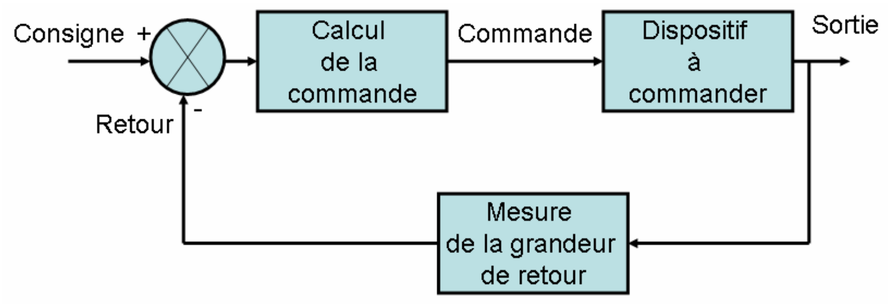
A l'inverse les capteurs actifs fournissent en sortie une tension ou un courant. Il prélève une partie de l'énergie utilisée par la grandeur physique à mesurer pour la transformée en énergie électrique. Le modèle électrique de ce type de capteur que l'on nomme aussi transducteur est un générateur équivalent soit de Thévenin pour les tensions, soit de Norton pour les courants.

II – Domaine d'emploi

Les capteurs sont destinés à réaliser une mesure. Dans le domaine industriel cette opération est importante et intervient dans deux grand domaines : le domaine du mesurage et celui du contrôle de processus.

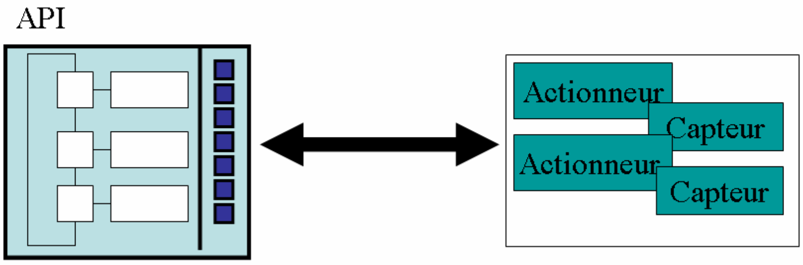
2.1 – Commande de processus

La commande de processus a pour objectif de mettre en œuvre une commande à partir de l'état présent et passé d'un système. Le processus de commande est automatique dans la mesure aucun opérateur humain n'intervient dans la chaîne de décision. Deux opérations distinctes sont mises en œuvre dans ce type de techniques. La première consiste à mesurer l'état du système. La seconde calcule la commande en fonction de l'état de ce système et d'une consigne. Le domaine de la commande de processus se divise en deux techniques : l'automatisme et l'automatique. L'automatique intervient au niveau des actionneurs. Elle permet l'asservissement ou la régulation d'une grandeur issue d'un dispositif technique réalisant une fonctionnalité industrielle : moteur, processus chimique, thermique et autres. Cette technique s'appuie sur une structure de contre réaction :



Le calcul de la commande s'effectue à partir de l'écart entre une consigne (régulation) ou la variation de celle-ci (asservissement) et une grandeur de retour issue d'un capteur. Cet écart constitue une erreur que le calcul de commande cherche à minimiser pour que la grandeur de sortie soit égale à la consigne. La problématique de la mesure intervient dans la chaîne de retour. Dans la mesure du possible, la mesure doit être linéaire et le dispositif ne doit pas modifier la grandeur de sortie. Une autre caractéristique importante est la réponse dynamique du capteur. Du capteur dépend en partie la robustesse et la qualité de la commande.

En automatisme, la problématique est différente. Les dispositifs à commander sont déjà asservis ou régulés. Il constitue des actionneurs. Il s'agit de les mettre en œuvre pour réaliser une séquence c'est-à-dire la mise en marche et l'arrêt des dispositifs à commander dans un ordre défini par avance. Cette séquence permet de mettre en œuvre, par exemple, un processus de fabrication. La commande est réalisée par un automate programmable industrielle (API). Il s'agit d'un calculateur numérique qui pilote des entrées sorties. Elles sont soit de type TOR (Tout Ou Rien) soit de type analogique issue de convertisseur numérique analogique.



La problématique de la mesure est ici moins contrainte que dans le cas de l'automatique. Elle consiste à connaître d'état des actionneurs afin de permettre à l'API de prendre des décisions. Le processus de commande est numérique et discontinu. La mesure n'a pas besoin d'être linéaire. Dans le cas de commande temps réel contraint, la réponse dynamique du capteur peut être un paramètre important.

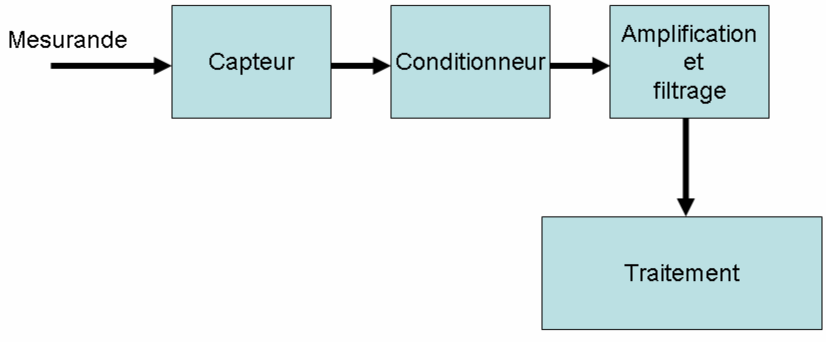
2.2 – Mesurage

A l'inverse de la commande de processus où l'objectif de la mesure est un dispositif technique, la mesure dans le domaine du mesurage est un opérateur humain. Il accède à la grandeur physique via une interface homme machine construit autour d'un système numérique. Le mesurage est un ensemble de techniques permettant de réaliser une mesure.
Les domaines où un mesurage est nécessaire sont vastes. Il s'agit en effet de tous les domaines dans lequel le pilotage d'un processus s'effectue par un humain. Ces domaines vont du pilote d'avion à l'usinage.

Dans tous ces domaines l'assurance qualité occupe une place à part. Il s'agit ici non plus d'effectuer une mesure pour prendre une décision mais de relier un instrument de mesure à son étalon. En effet, le principe même d'une mesure consiste à comparer une grandeur physique à un étalon afin de l'évaluer. La qualité de la mesure dépend donc de l'étalon utilisé. Dans le domaine de l'assurance qualité, la problématique est moins la mesure en elle-même que les méthodes pour y parvenir et le raccordement à un étalon primaire.

III – Chaîne de mesure

Quelque soit le domaine d'emploi, un capteur n'est pas utilisé seul, il intervient dans une chaîne dite chaîne de mesure.



Cette chaîne de mesure est constituée : du capteur associé dans le cas d'un capteur passif à un conditionneur, d'un dispositif d'amplification et de filtrage et d'un organe de traitement. Le conditionneur a pour rôle d'apporter l'énergie nécessaire pour transformer la variation

d’impédance en une grandeur électrique. Il s’agit pour les capteurs résistifs soit d’un montage diviseur de tension ou potensiométrique soit d’un pont de Weasthone. Dans le cas des capteurs inductifs ou capacitifs, il est possible d’employer des oscillateurs.
S’il s’agit de capteur actif, il n’est pas nécessaire d’utiliser un conditionneur, le signal issue est identique à celui issue d’un générateur. Dans le cas des capteurs passifs et actifs, les signaux obtenus ont la particularité d’être d’amplitude faible, il est donc nécessaire d’amplifier le signal afin que les niveaux soit compatible avec l’organe de traitement. L’amplification doit posséder des caractéristiques propres au domaine capteur en termes d’impédance et de réjection de mode commun. Le filtrage est nécessaire pour éliminer une partie du bruit et dans le cas où l’organe de traitement est un organe numérique pour limiter la bande passante.

Le cas de l’organe numérique est le cas le plus courant. Cet organe numérique peut être constitué d’un ordinateur, c'est-à-dire une machine de traitement équipée d’un système d’exploitation sur lequel fonctionne un logiciel de traitement comme Labview par exemple. Le traitement consiste à effectuer une acquisition de données puis un traitement : mise à l’échelle, traitement statistique ou autres. Ce type de structure se trouvera dans le domaine du mesurage ou de la qualité. Dans le domaine du contrôle de processus, l’organe de traitement sera le plus souvent constitué d’un API ou d’un microcontrôleur. Le rôle de ces organes sera alors de réaliser l’acquisition des données et de calculer la commande à appliquer.

III - Caractéristiques des capteurs

Il est fondamental de connaître avec précision les caractéristiques d’un capteur afin de pouvoir déterminer les limites de fonctionnement de celui-ci. En effet, les limites de fonctionnement d’un capteur conditionnent les limites de fonctionnement du système dont il fait partie.

3.1 - Sensibilité

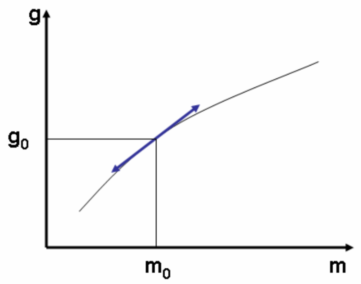
La sensibilité d’un capteur est une grandeur qui donne la valeur de la grandeur de sortie en fonction du mesurande.

$$S = \frac{\Delta g}{\Delta m}$$

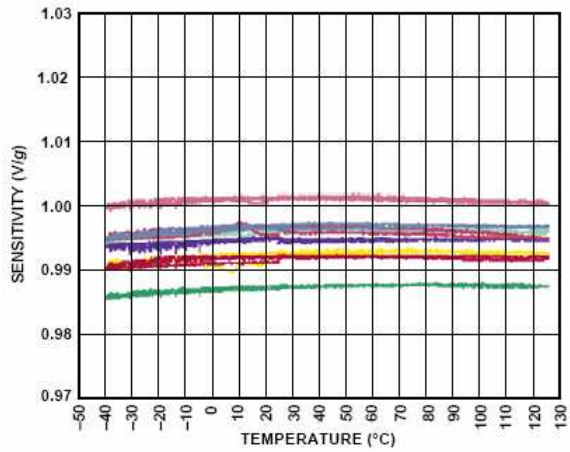
où g est la grandeur de sortie et m le mesurande. Si la caractéristique du capteur est linéaire, la sensibilité est une constante. Cependant, dans le cas général, la caractéristique qui donne la sortie en fonction du mesurande n’est pas linéaire, la sensibilité d’un capteur n’est pas une constante. Elle n’est valable alors qu’autour d’un point de repos. Elle est alors égale à la pente au voisinage du point de repos de la fonction :

$$g = f(m,\theta)$$

$$S = \left.\frac{df}{dm}\right|_{m=m0}$$



La réponse d’un capteur ne dépend pas uniquement du mesurande. Elle dépend aussi de grandeurs d’influence.



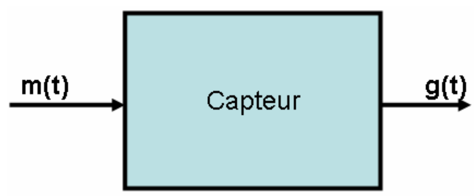
Ainsi la courbe précédente montre la variation de la sensibilité d'un accéléromètre en fonction de la température.

Une autre caractéristique importante de la sensibilité est la fréquence du merurande. Si le mesurande est constant ou que sa variation au cours du temps est très lente, le capteur fonctionne dans un domaine statique. En revanche, si la fréquence du mesurande augmente alors la sensibilité peut varier. Le capteur est alors dans un régime dynamique.

3.2 - Bande passante

La variation de sensibilité est caractérisée par la notion de bande passante. Elle est définie comme l'intervalle de fréquence dans lequel la sensibilité ne varie pas au delà d'une limite en générale fixé à -3db. La caractérisation de la bande passante d'un système se déduit de l'étude du comportement dynamique de ce système. La théorie des systèmes linéaires montre que leur comportement sont décrits par une équation différentielle à coefficient constant. Le premier cas possible est une équation différentielle du premier ordre du type :

$$\tau \frac{dg(t)}{dt} + g(t) = S_0 . m(t)$$



Dans cette équation, τ quantifie l'inertie du capteur et S_0 la sensibilité statique du capteur . Dans le cas sinusoïdal, c'est-à-dire le cas où :

$$m(t) = M_0 . \sin(\omega . t + \varphi)$$

En utilisant les formules d'Euler et les propriétés des systèmes linéaires, l'étude du comportement dynamique se ramène à :

$$m(t) = M_0 e^{j\omega t}$$

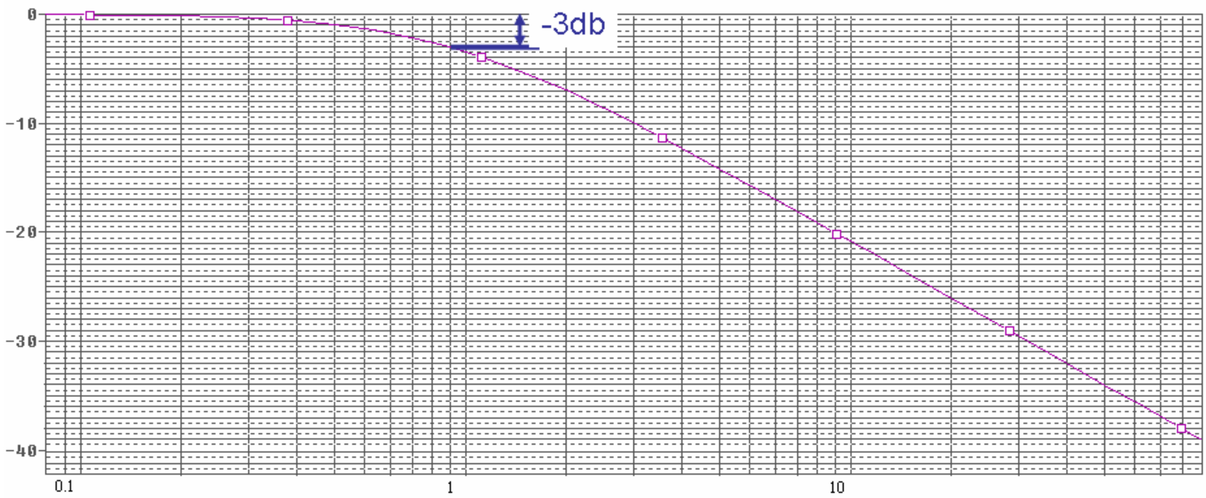
La solution générale de cette équation s'écrit alors :

$$g(t) = \frac{S_0 M_0}{1 + j\tau\omega} e^{j\omega t}$$

L'amplitude et la phase de la sortie varie en fonction de la fréquence de l'excitation sinusoïdale du mesurande. L'étude de cette variation s'effectue en étudiant le rapport entre l'amplitude du mesurande en entrée et celle de la sortie. Il s'agit de la sensibilité dynamique du capteur :

$$S(j\omega) = \frac{S_0}{1 + j\tau\omega}$$

Le tracé du module de |S(jω)| en décibel normalisé par rapport à S_0 et en utilisant une échelle logarithmique pour ω normalisé par rapport à 1/τ, donne :



Tant que la fréquence est inférieure à 1/τ, la sensibilité dynamique reste dans la limite de -3db. Au delà de 1/τ, la sensibilité dynamique décroit en fonction de la fréquence. Tant que la sensibilité dynamique reste inférieure -3 dB, l'atténuation subie par la grandeur de sortie est de l'ordre de 77% du mesurande, le capteur fonctionne alors dans un intervalle de fréquence désignée comme étant la bande passante à -3dB.

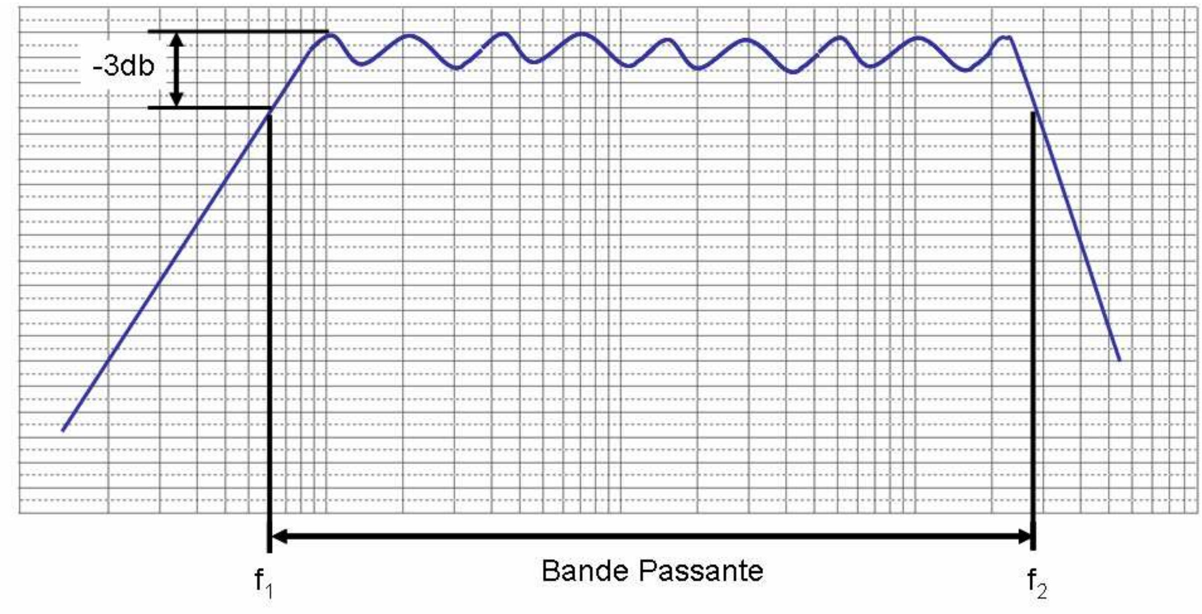
Ce résultat peut être généralisé : un système linéaire est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\sum_0^n a_k . \frac{d^k g(t)}{dt^k} = \sum_0^m b_i . \frac{d^i m(t)}{dt^i}$$

La sensibilité dynamique du capteur est alors donnée par :

$$S(j\omega) = \frac{\sum_0^m b_i .(j\omega)^i}{\sum_0^n a_k .(j\omega)^k}$$

Le tracé du module de |S(jω)| en décibel en échelle logarithmique pour ω a l'allure suivante :



La bande passante est donc l'intervalle de fréquence dans lequel la sensibilité ne varie pas au-delà d'une limite en générale fixé à -3db. Les caractéristiques constructeurs du capteur 793 de vibrations sont les suivantes :

Model 793

Premium, General Purpose Accelerometer

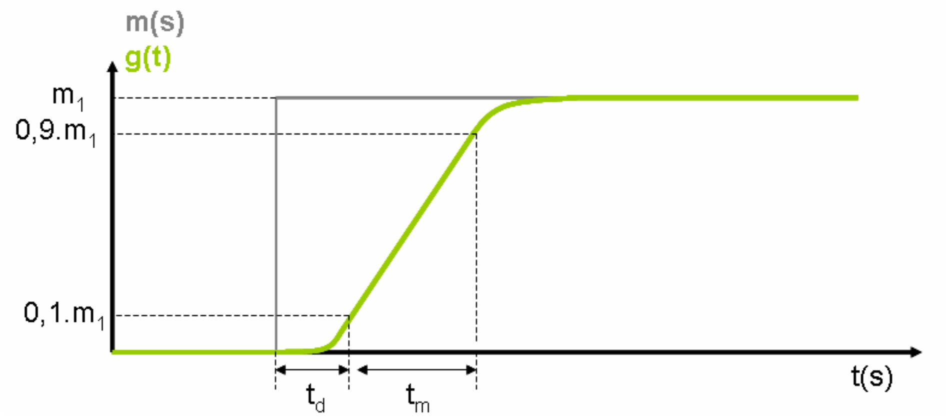
DYNAMIC	
Sensitivity, ±5%, 25°C	100 mV/g
Acceleration Range	80 g peak
Amplitude Nonlinearity	1%
Frequency Response:	
±5%	1.5 - 5,000 Hz
±10%	1.0 - 7,000 Hz
±3 dB	0.5 - 15,000 Hz
Resonance Frequency	25 kHz
Transverse Sensitivity, max.	5% of axial
Temperature Response	–50°C –10% +120°C +5%

ELECTRICAL		
Power Requirement:	voltage source	18 - 30 VDC
	current regulating diode	2 - 10 mA
Electrical Noise, equiv. g:		
Broadband	2.5 Hz to 25 kHz	600 µg
Spectral	10 Hz	8 µg/√Hz
	100 Hz	5 µg/√Hz
	1000 Hz	5 µg/√Hz
Output Impedence, max		100 Ω
Bias Output Voltage		12 VDC
Grounding		case isolated, internally shielded

La sensibilité statique de ce capteur est de 100mV/g dans l'intervalle de fréquence 0,5Hz 15Hz.

3.3 - Temps de réponse

L'inertie propre à tous les systèmes fait que la réponse du capteur n'est pas instantanée. Ce temps de réponse est défini comme l'intervalle de temps entre le moment ou le capteur est excité par un mesurande de type échelon et le moment où la grandeur de sortie atteint ε% de la valeur finale. Ainsi pour un ε% égale à 90%, on a :



Il peut se décomposer en un temps de retard à la montée t_d et un temps de montée t_m, ainsi le temps de réponse d'un capteur est le temps :

$$t_r = t_d + t_m$$

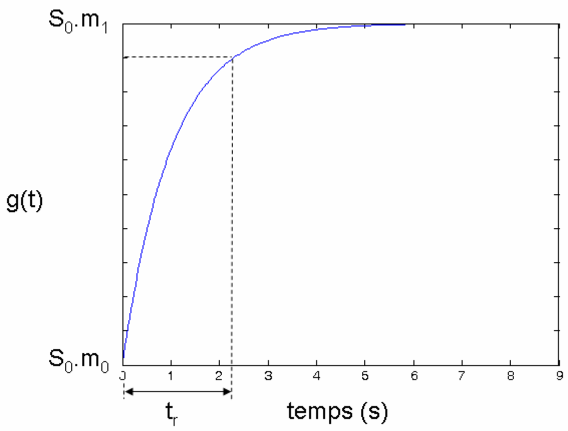
Ce temps impose une limite de fonctionnement sur la fréquence du mesurande. En effet si fréquence du mesurande est supérieure à $1/t_r$ alors le capteur n'a pas le temps d'atteindre la valeur finale. Si on considère un capteur dont le comportement est décrit par :

$$\tau \frac{dg(t)}{dt} + g(t) = S_0.m(t)$$

La réponse du capteur à un échelon est du type :

$$g(t) = S_0.((m_0 - m_1)e^{-\frac{t}{\tau}} + m_1)$$

où m_0 est la valeur initiale du mesurande et m_1 la valeur finale. L'allure de la réponse est :



Le temps t_r pour atteindre ε% de la valeur finale est donné par l'équation suivante :

$$S_0.((m_0 - m_1)e^{-\frac{t_r}{\tau}} + m_1) = \frac{\varepsilon}{100}.S_0.m_1$$

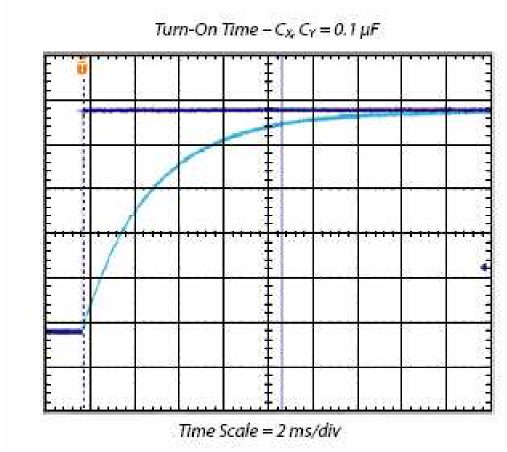
Soit

$$t_r = \tau.\ln\left(\frac{m_1 - m_0}{m_1.(1 - \frac{\varepsilon}{100})}\right)$$

Dans le cas où la valeur initiale est nulle le temps t_r pour un ε% de 90% est de :

$$t_r = 2,3.\tau$$

Ce type de réponse peut être observé sur le capteur d'accélération : ADXL2213 de Analog Device.



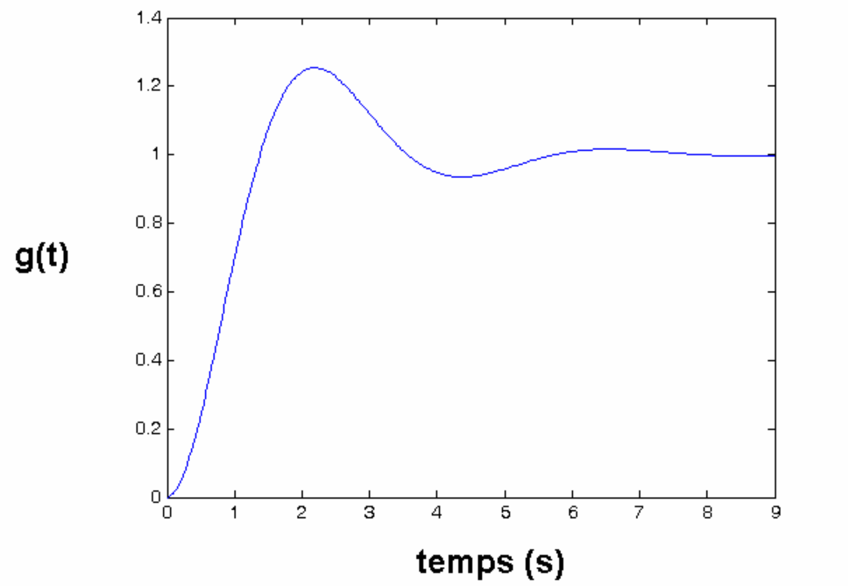
Dans le cas d'un capteur qui se comporte comme un système du deuxième ordre, l'équation différentielle qui décrit le fonctionnement du système est :

$$\frac{1}{\omega_0^2}.\frac{d^2g(t)}{dt^2}+\frac{2.m}{\omega_0}.\frac{dg(t)}{dt}+g(t)=S_0.m(t)$$

En fonction de la valeur du coefficient m, dit coefficient d'amortissement, la solution de l'équation caractéristique admet soit une solution réel le soit une solution imaginaire. Dans le cas de la solution imaginaire obtenue pour m inférieur à 1, la réponse à un échelon présente des oscillations de pulsation proportionnelle à m et à ω_0.

$$g(t)=S_0.m_0(1-\frac{e^{-m.\omega_0.t}}{\sqrt{1-m^2}}.\sin(\sqrt{1-m^2}.\omega_0.t+\varphi)) \text{ avec } \varphi=\arcsin(1-m^2)$$

En normalisant par rapport à $S_0.m_0$, pour un m de 0.4 et une pulsation de 1,57rd/s, la réponse est alors du type :



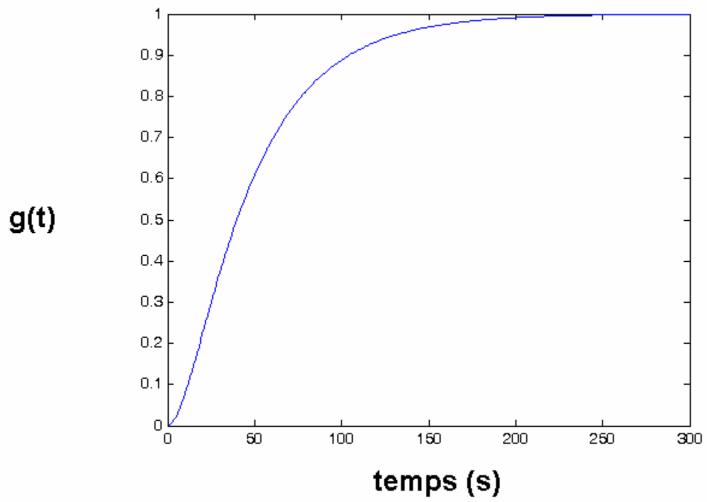
Ce tracé montre un retard à la montée puisque la tangente à l'origine est horizontale. De plus, la présence d'oscillation qui implique un dépassement au dessus de la valeur finale dont l'amplitude est proportionnelle à m. La définition précédente du temps de montée doit être précisée puisque le passage à ε% de la valeur finale peut se présenter plusieurs fois à cause des oscillations. Le temps de réponse est alors le temps nécessaire pour que l'oscillation reste dans un intervalle de 1-ε%. Il est donné par :

$$t_r = \frac{1}{m.\omega_0}.\ln(\frac{\varepsilon}{100}.\sqrt{1-m^2})$$

Dans le cas où m est supérieure ou égale à 1, la réponse est amortie. Il n'y a pas d'oscillation. La réponse est donnée par :

$$g(t) = S_0.m_0.(1+\frac{1}{2.\sqrt{m^2-1}}((m-\sqrt{m^2-1}).e^{(-m-\sqrt{m^2-1}).\omega_0.t} - (m+\sqrt{m^2-1}).e^{(-m+\sqrt{m^2-1}).\omega_0.t})$$

Soit pour un m de 1,2 et une pseudo pulsation de 1,57rd/s, le tracé de g(t) normalisé à $S_0.m_0$ est donné page suivante. Ce tracé montre toujours un retard à la monté du signal. En revanche, il n'y a plus d'oscillation.



La réponse du capteur ne présente plus de dépassement mais la réponse du capteur est plus lente que dans le cas précédent.

III - Erreurs de mesure

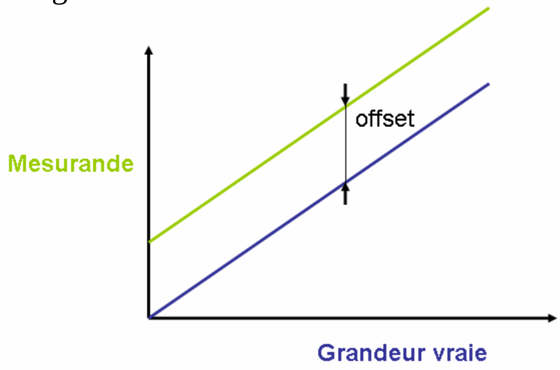
La réalisation d'un mesurage consiste à comparer la grandeur à mesurer avec une grandeur de référence. Dans le cas des capteurs, cette comparaison est effectuée par le capteur et éventuellement le conditionneur qui permet de le mettre en œuvre. Cette comparaison comporte des incertitudes dues aux grandeurs d'influence, à un mauvais étalonnage de la référence, en somme un ensemble de dégradation de l'information par le capteur et la chaîne de mesure. Il n'est donc pas possible d'accéder à la valeur vraie d'un mesurande à part ceux des étalons puisqu'ils sont considérés comme parfaitement connus par convention. La différence entre la vraie valeur et la valeur délivrée par la chaîne de mesure constitue une erreur. Par nature cette erreur est une inconnue, sa grandeur ne peut être estimée. Ainsi un mesurande n'est connu que dans un intervalle d'incertitude.

Si la valeur de l'erreur ne peut être qu'estimée un analyse fine de celle-ci permet de réduire l'influence de l'erreur et donc l'intervalle d'incertitude. Deux classes d'erreurs peuvent être distinguées : les erreurs systématiques et les erreurs accidentelles

4.1 – Erreurs systématiques

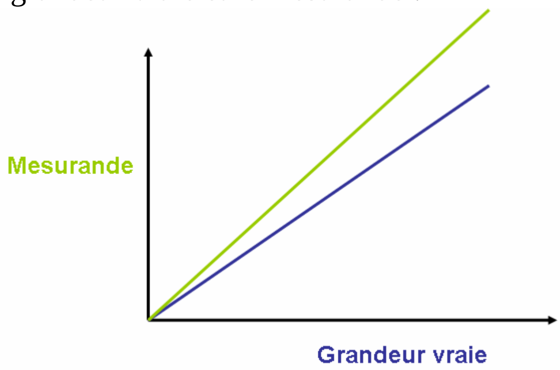
Une erreur systématique est une erreur qui se produit à chaque mesure et qui produit le même écart. Cette erreur peut être détectée en effectuant deux séries de mesurage avec deux instruments différents. S'il existe entre les deux mesurages un écart constant, alors il y a une erreur systématique.

La première source d'erreur systématique est l'erreur de zéro ou offset. Elle se manifeste par un décalage constant entre la grandeur vraie et le mesurande.

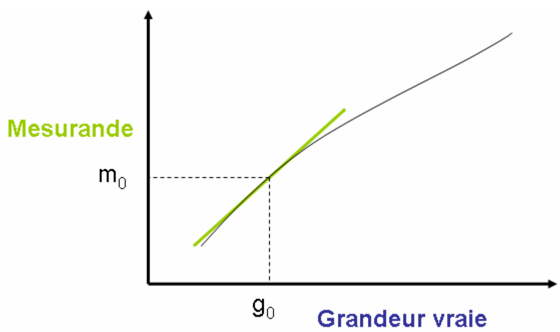


Comme la grandeur vraie n'est pas connue, l'erreur commise n'est pas connue. Néanmoins cette erreur d'offset peut être minimisée par un étalonnage précis.

Le second type d'erreur systématique est l'erreur d'échelle ou erreur de gain. Il existe dans ce cas un coefficient entre la grandeur vraie et le mesurande :



Le troisième type d'erreur systématique est l'erreur de linéarité. Le capteur est polarisé autour d'un point de repos et la mesure s'effectue dans le domaine des petits signaux en assimilant sa caractéristique à la tangente en ce point.



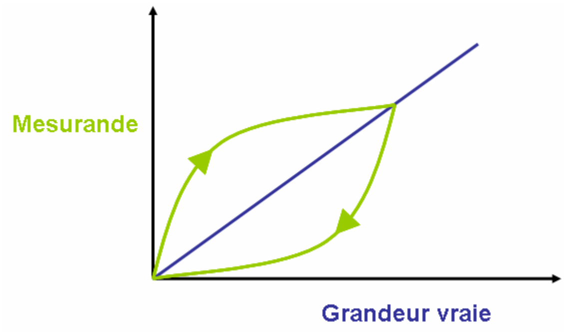
Plus la grandeur à mesurer est grande, plus l'écart entre la caractéristique du capteur et la tangente est grand.

Enfin une dernière source d'erreur systématique découle de la dispersion des caractéristiques des capteurs. Les caractéristiques d'un capteur sont déterminées sur un lot. Les caractéristiques sont données en valeur typique. Il est donc possible qu'un capteur peut avoir une de ses caractéristiques différentes de la valeur typique introduisant ainsi un biais dans la mesure.

4.2 – Erreurs accidentelles

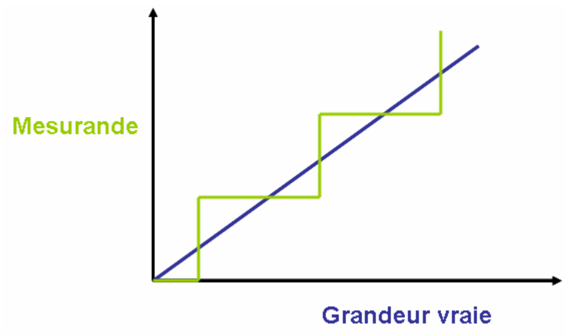
Les erreurs accidentelles sont des erreurs qui peuvent se produire. A la différence des erreurs systématiques qui affectent en permanence le mesurage, il est impossible de prévoir quand elles vont intervenir.

Un cas où ce type d'erreur peut ce produire est le cas ou la réponse du capteur dépend des conditions de fonctionnement antérieur dont un cas est une caractéristique possédant une hystérésis.



Ce type de comportement est caractéristique de capteur magnétique par exemple.

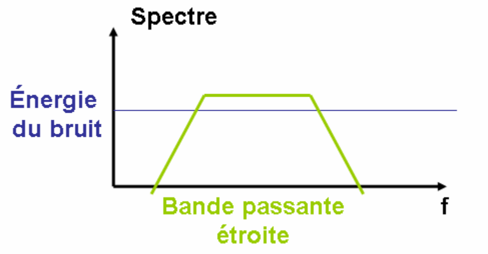
Un autre cas de d'erreur accidentelle est l'erreur dite de mobilité. Elle se rencontre quand la réponse du capteur n'est pas continue.



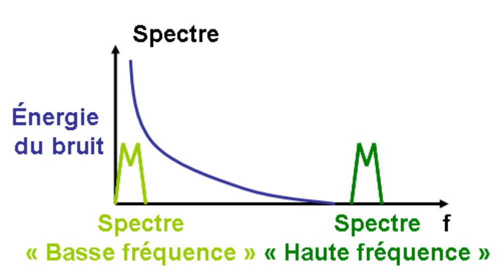
Ce type de caractéristique peut être une caractéristique propre au capteur dans le cas d'un capteur de position réalisé par un potentiomètre bobiné soit une caractéristique d'un composant de la chaîne de mesure lorsque celle-ci comporte un convertisseur analogique numérique.

Enfin le dernier cas est celui du bruit. Sous l'influence principalement de la température mais aussi de rayonnement électromagnétique, les composants électroniques génèrent un signal aléatoire qui s'ajoute à la grandeur traitée. Ce signal est soit d'origine intrinsèque, soit extrinsèque.

Dans le cas où l’origine du bruit est intrinsèque, le bruit est dit bruit de fond. Il existe même lorsque que le système électronique est isolée d’influence extérieure et en l’absence de tout signal d’excitation. Il est principalement du à la température qui provoque une agitation aléatoire des électrons. Il peut occuper toute la bande de fréquence, il s’agit alors d’un bruit dit « Blanc ». Il est difficile de traiter ce type de bruit. Deux solutions permettent de la minimiser : travailler dans une bande passante étroite et maîtriser la température de fonctionnement.



Un autre type de bruit existe. Il s’agit du bruit dit « Rose », l’énergie de ce bruit existe qu’en basse fréquence, il est proportionnel en 1/f. Pour réduire l’influence du bruit rose, il est possible de déplacer le mesurande dans le domaine des fréquences à l’aide d’une opération de modulation.



Cette opération de modulation permet de déplacer le spectre c'est-à-dire l’occupation spectrale du mesurande dans une bande de fréquence où ce bruit n’intervient plus.

Dans le cas où l’origine du bruit est extrinsèque, il provient principalement de rayonnement électromagnétique. Toutes les liaisons ainsi que les composants fonctionnent comme des antennes qui captent l’énergie émise par rayonnement électromagnétique. Il est possible de se prémunir de ce type de bruit en soignant particulièrement le câblage du circuit, ajoutant des plans de masse et en utilisant des cage de Faraday.

4.3 – Traitement statistiques des mesures

Les erreurs de mesure entrainent une dispersion des résultats obtenus. La probabilité d’obtenir comme résultat d’une mesure, une valeur comprise entre m_1 et m_2 est donnée par :

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

où p(m) est la densité de probabilité pour la valeur m du mesurande. Les erreurs accidentelles ont une distribution normale. Cette hypothèse est valable pour la majeure partie des cas. Elle provient du fait que ce type d’erreur est le fruit de nombreuses sources indépendantes. Or le théorème Central Limite nous dit qu’une combinaison linéaire d’un nombre suffisamment grand de variables de distribution quelconque tend vers une distribution normale :

$$p(m) = \frac{1}{\sigma.\sqrt{2.\pi}}.e^{-\frac{(m-\overline{m})}{2.\sigma^2}}$$

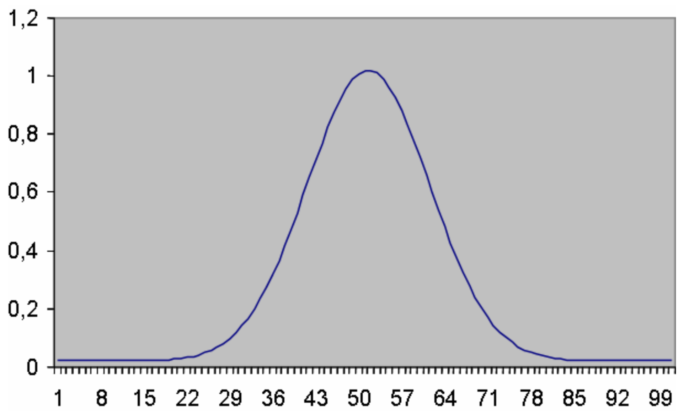
où $\overline{m}$ est la valeur moyenne estimée par :

$$\overline{m} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} m_i$$

et σ est l'écart type estimé par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}.\sum_{1}^{n}(m_i - \overline{m})^2 = \frac{1}{n-1}\left[\sum_{1}^{n} m_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{1}^{n} m_i\right)^2\right]$$

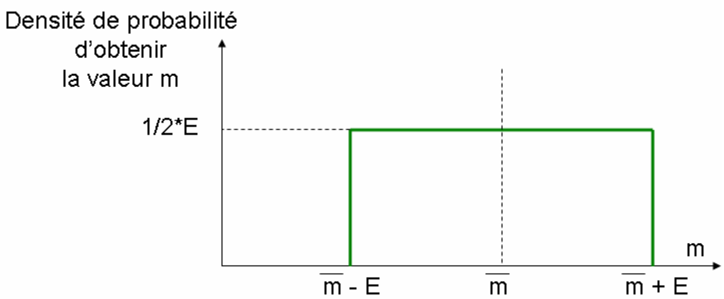
La valeur moyenne $\overline{m}$ et l'écart type σ tendent vers les valeurs quand le nombre de mesure tend vers l'infini. Le tracé de la densité de probabilité d'un tirage aléatoire compris entre 0 et 100 avec un écart type de 10 et une valeur moyenne de 50 est donné par :



La valeur la plus probable est la valeur moyenne. L'écart type quantifie lui la dispersion des résultats autour de la valeur moyenne. Le tableau suivant donne la probabilité d'apparition d'un résultat en fonction de l'écart type :

Intervalle	**Probabilité**
$\overline{m} - \sigma \leq m \leq \overline{m} + \sigma$	68,27%
$\overline{m} - 2.\sigma \leq m \leq \overline{m} + 2.\sigma$	95,45%
$\overline{m} - 3.\sigma \leq m \leq \overline{m} + 3.\sigma$	99,73%

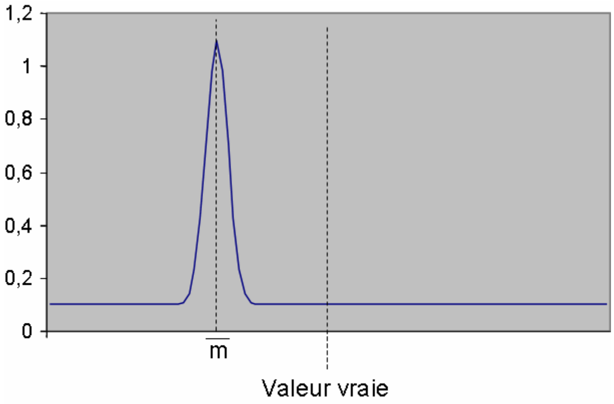
Dans de nombreux cas, les constructeurs de capteurs donne les caractéristiques dans un intervalle donné dans préciser la loi de distribution. Il faut alors se placer dans le cas d'une distribution uniforme. Il s'agit du cas le plus défavorable puisque il y a autant de chance d'obtenir un mesurande proche de la valeur moyenne qu'éloigné dans l'intervalle précisé.



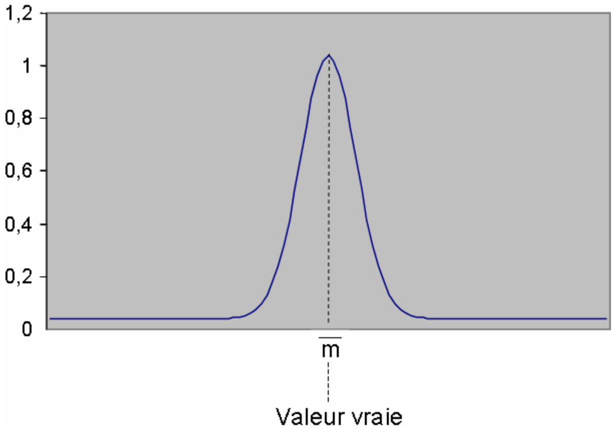
L'aire du rectangle, donc la probabilité d'obtenir une valeur m dans l'intervalle 2E est de 1.

4.4 – Fidélité, justesse et précision

Les notions de fidélité justesse et précision se déduise de l’étude statistique des mesures fournies par un capteur. Un capteur sera défini comme fidèle si l’écart type est faible. Les erreurs accidentelles sont faibles. Ainsi les différents résultats de mesures sont proches de la valeur moyenne. Dans le cas d’une répartition gaussienne, un capteur fidèle aurait une répartition dont l’allure serait :

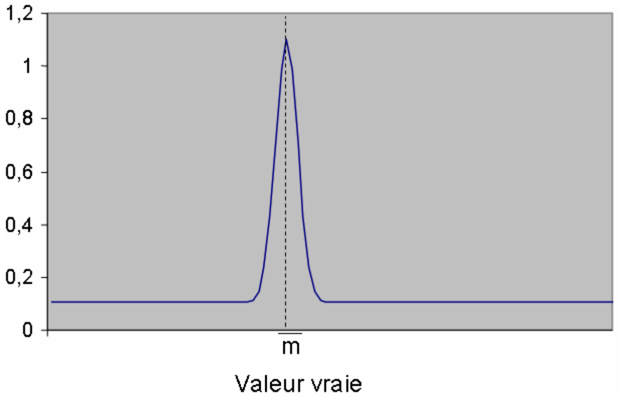


Un capteur fidèle peut présenter des erreurs systématiques. Dans ce cas, la dispersion est faible mais il existe un biais entre la valeur moyenne et la valeur vraie. Ce capteur est alors fidèle mais pas juste. Un capteur juste est un capteur dont la valeur moyenne coïncide avec la valeur vraie. L’allure de la densité de probabilité est alors :



La valeur la plus probable est la valeur vraie, il n’y a pas d’erreur systématique. Néanmoins, il peut y avoir des erreurs accidentelles qui provoquent une dispersion des résultats.

Un capteur qui est à la fois fidèle et juste, donc un capteur qui n’est pas affecté d’erreur systématique et dont l’influence des erreurs accidentelles est faible est un capteur précis.



La précision est une caractéristique qui sera toujours recherchée en choisissant des capteurs de qualité, en mettant en œuvre une chaîne de mesure avec les techniques appropriées et en soignant sa mise en œuvre.

4.5 – Incertitudes

La précision d'un capteur est une grandeur qui ne signifie rien si elle n'est pas quantifiée. Elle le sera par deux valeurs : la valeur typique ou la valeur nominale et un intervalle de confiance désigné comme une incertitude. Ces valeurs sont déterminées sur les lots d'échantillon.

L'incertitude constitue donc d'un paramètre associé au résultat d'un mesurage qui caractérise la dispersion des valeurs. Elle est donc liée à l'écart type et définie par :

$$\Delta g = t.\sigma$$

L'incertitude est dite absolue, elle est de même unité que le mesurande. Par exemple, la documentation constructeur donnée page 8 du capteur d'accélération indique que la sensibilité typique du capteur est 100mV/g ±5%. Elle est donc comprise entre 97,5 mV/g et 102,5 mV/g. L'incertitude absolue de ce capteur est de 5mV/g. Il est possible de déterminer cette incertitude de manière relative. Il s'agit est une quantité sans unité exprimé en % définie comme le rapport de l'incertitude absolue à la valeur nominal. Ainsi le capteur d'accélération a une incertitude relative de 5%.

Les composants utilisés dans une chaîne de mesure ne sont déterminés qu'à une précision donnée. L'incertitude finale est la conséquence de celle du capteur et celle des composants permettant de la mettre en œuvre. Deux méthodes sont possible pour déterminer cette incertitude : la méthode dite de type A et celle dite de type B.
La méthode de type A utilise une analyse statistique d'une série de n mesure. La valeur typique sera la valeur moyenne et l'incertitude sera calculée à l'aide de l'écart type :

$$\sigma = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

où σ est l'incertitude attachée à la valeur moyenne et σ_x est l'incertitude attaché la mesure. A partir de l'écart type, l'incertitude est déterminée comme :

$$\Delta g = t.\sigma$$

avec t déterminé avec les coefficients de Student dont des exemples sont donné dans le tableau :

n	2	3	5	10	12	16	20	30	50	100
$t_{95\%}$	12,7	4,3	2,78	2,26	2,2	2,3	2,09	2,04	2,01	1,98
$t_{99\%}$	63,7	9,93	4,6	3,25	3,11	2,95	2,86	2,76	2,68	2,63

Ainsi pour 20 mesures, 95% des mesures sont dans l'intervalle $\left[\bar{x} - 2.\sigma, \bar{x} + 2.\sigma\right]$ et 99,7% dans l'intervalle $\left[\bar{x} - 3.\sigma, \bar{x} + 3.\sigma\right]$.

L'autre méthode dite de type B s'appuie sur les incertitudes indiquées dans les caractéristiques des constructeurs en utilisant les lois de propagations des écarts-type. Si la mesure finale est fonction de variables x_i auxquelles sont attachés un écart type σ_i, alors l'écart type de la mesure est :

$$\sigma^2 = \sum_1^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2 + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \frac{\partial f}{\partial x_i}.\frac{\partial f}{\partial x_j}.Cov(x_i, x_j)$$

Comme les variables x_i et x_j sont indépendantes, le covariances sont nulles et donc l'écart type global est :

$$\sigma^2 = \sum_1^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2$$

A partir de ce résultat, il est possible de déterminer l'incertitude globale comme :

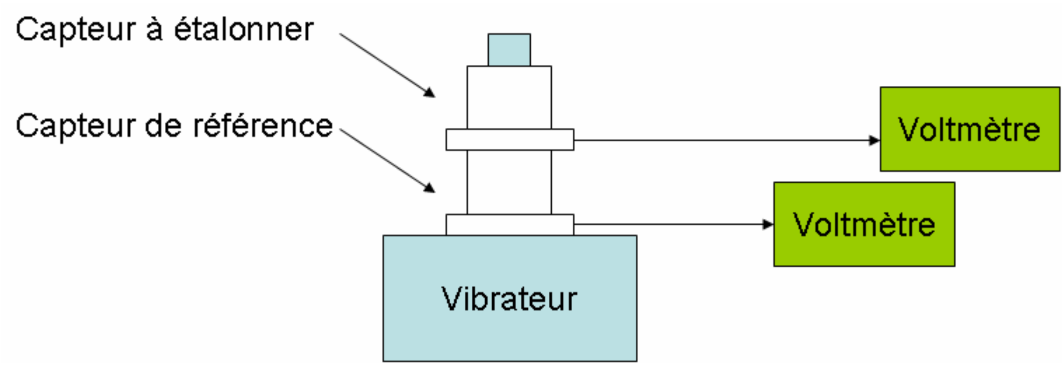
$$\Delta g = \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 .\Delta x_i^2}$$

VI – Etalonnage du capteur

Etalonner un capteur consiste à déterminer la relation entre les valeurs du mesurande et la grandeur électrique de sortie en fonction des paramètres additionnels. Les paramètres additionnels permettent la mise en œuvre du mesurage, il s'agit des grandeurs d'influence et des composants de la chaîne de mesure. Cet étalonnage est soit graphique ou algébrique. Dans le cas graphique, il conduit à l'obtention d'une courbe d'étalonnage.
Dans de nombreux cas, il n'est pas possible de déterminer l'influence des paramètres additionnels. Le capteur est considéré comme insensible aux grandeurs d'influence. Ce type d'étalonnage est désigné comme étalonnage simple. Un étalonnage simple direct ou absolu consiste à soumettre le capteur à une grandeur parfaitement déterminée nommée étalon. Cet étalon peut être :

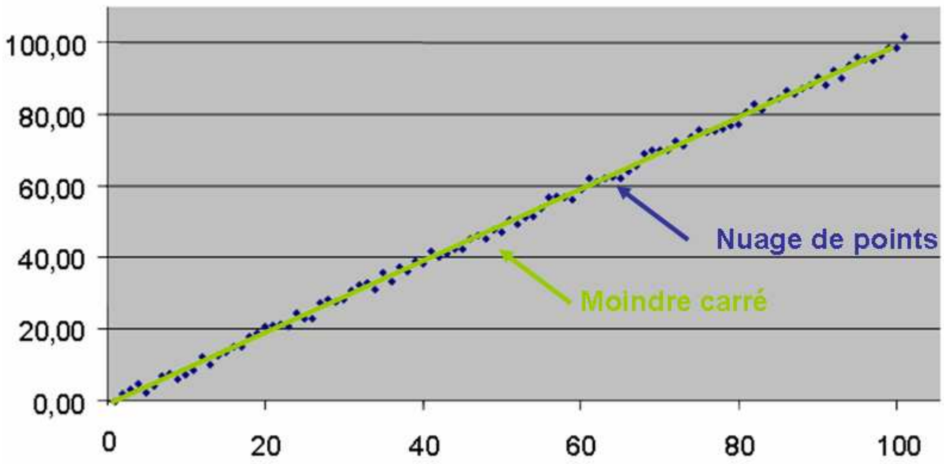
. primaire lorsqu'il est désigné ou largement reconnu comme présentant les plus hautes qualités métrologiques et dont la valeur est établie sans se référer à d'autres étalons de la même grandeur.
. de référence s'il est disponible en un lieu donné ou dans une organisation donnée, dont dérivent les mesurages qui y sont faits.
. de transfert s'il est utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des étalons.
. de travail s'il est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des appareils de mesure

Le cas le plus courant est le cas où l'étalon est un étalon de travail, sa précision est déterminée pour être de l'ordre de 100 fois celle cherchée pour le capteur.
Il est aussi possible d'effectuer un étalonnage de manière indirect c'est-à-dire par comparaison. Dans ce cas, deux capteurs sont placés dans les mêmes conditions, un des capteurs est choisi comme capteur de référence. Ainsi dans l'exemple suivant, un même générateur de vibration excite deux capteurs : un capteur de référence et le capteur à étalonner. Le capteur de référence doit avoir été au préalable étalonné de manière direct.



Dans le cas où le mesurande ne permet pas à lui seul de définir la réponse du capteur, il faut utiliser une méthode d'étalonnage multiple. Ce cas se présente par exemple dans lorsque la caractéristique du capteur présente une hystérésis. La procédure consiste à régler le zéro du capteur à son point de fonctionnement et d'effectuer le relever des la grandeur de sortie en faisant varier le mesurande de manière croissante et décroissante.

L'étalonnage conduit à déterminé la relation entre le mesurande et la grandeur de sortie d'où découlera la sensibilité du capteur et l'incertitude. Dans le cas graphique, la courbe obtenue est un nuage de points définis par le couple : m_i, g_i qui même dans le cas d'un capteur linéaire ne se répartissent pas sur une droite à cause des erreurs de mesure.



Si la droite recherchée est :

$$g = a.m + b$$

Les coefficients *a* et *b* peuvent être déterminés à partir des relevés expérimentaux et calculés de manière à ce que cette droite soit la meilleur possible. Cette droite est telle que la somme des carrés des écarts des points expérimentaux à cette droite soit minimale. Les coefficients *a* et *b* se déduisent des formules :

$$a = \frac{N.\sum_i g_i.m_i - \sum_i g_i.\sum_i m_i}{N.\sum_i m_i^2 - (\sum_i m_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum_i g_i.\sum_i m_i^2 - \sum_i g_i.m_i.\sum_i m_i}{N.\sum_i m_i^2 - (\sum_i m_i)^2}$$

L’étalonnage rigoureux des capteurs permettent l’interchangeabilité des capteurs. Le résultat d’une chaîne de mesure doit être identique quelque soit le capteur utilisé aux incertitudes prés.