

Accéléromètres linéaires et angulaires, inclinomètres

Préambule

Columbia propose une large gamme d'accéléromètres asservis linéaires et angulaires ainsi qu'une gamme d'inclinomètres.

Nombre d'instruments ont été qualifiés pour une utilisation vol sur missiles conformément aux normes militaires, d'autres sont certifiés FAA pour l'avionique.

L'usine Columbia

Autosuffisante depuis sa création, voilà plus de 60 ans, Columbia refuse d'être dépendante de sources externes pour ses composants, matériaux et services critiques.

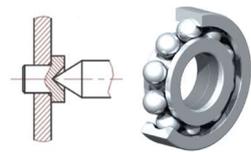
Tous les mécanismes sont produits en interne, du cousu main, pour des produits haute qualité, supposant, non seulement des moyens mais aussi des personnels.

Des moyens de contrôle et tests internes conformes à l'assurance qualité Mil Q 9858 ou la Mil I 45208 confortent le sérieux de la production.

Techniquement

Les accéléromètres à balance de force, reposent sur des technologies permettant d'atteindre les meilleures précisions. Basés sur des masses suspendues libres contrôlées par des circuits électriques équivalents aux ressorts, ils ne relèvent pas d'autres dépendances mécaniques.

Il existe deux types d'instruments Columbia pour les accéléromètres asservis : ceux montés sur pivots et ceux montés avec des micro roulements à billes.



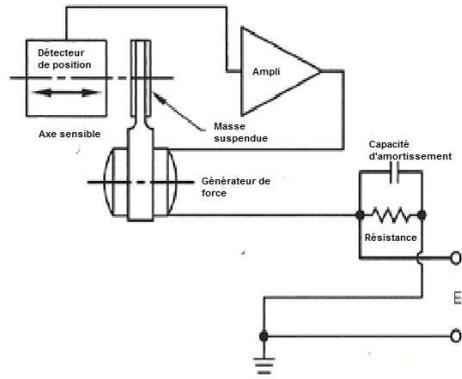
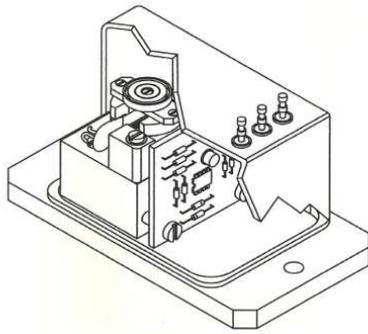
Le comportement des instruments repose sur la seconde loi de Newton où :

$$F = My$$

Ceci induit qu'une masse soumise à une accélération est équivalente à la force développée pour la maintenir en place. Si la force peut être mesurée, la quantité d'accélération peut être déterminée.

Pour les accéléromètres pendulaires, le Couple de torsion correspond à la masse pendulaire par l'accélération.

$$C = Mly.$$



Le dessin d'un capteur ouvert permet de réaliser que M étant la masse et l , la distance par rapport au centre de rotation, y l'accélération créée et contre balancé par le couple généré C pour maintenir la masse en place.

Pourquoi un accéléromètre à balance de forces ?

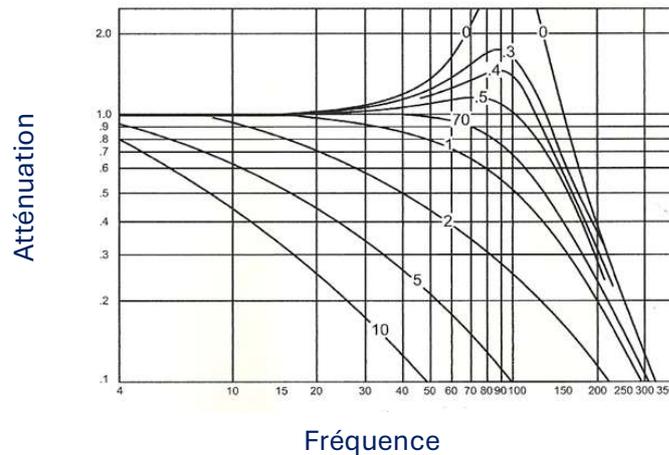
Ce type d'instrument est conçu pour des mesures accélérométriques continues et basse fréquence. Les niveaux mesurés sont très faibles de 10^{-5} g à 200 g dans des plages de fréquences du continu à 1000 Hz. Par ailleurs, l'excellente sensibilité à la gravité de ces instruments permet, avec des modifications, de mesurer des angles.

Les avantages

Les capteurs Columbia n'autorisent aucun déplacement de la masse sismique. Le déplacement est source d'erreurs liées à de grandes hystérésis, le collage ou l'inertie, les erreurs de linéarité et de fidélité. LVDT, potentiométriques ou dispositifs à reluctance variable imposent des déplacements importants de masses lorsque la technologie Columbia se limite à moins de $2 \mu\text{m}$ de déplacement. Par ailleurs, la fréquence naturelle des capteurs Columbia est importante. Les capteurs à jauges ne présentent que peu de déplacement mais une instabilité sous l'effet de températures, de fluage ou simplement du vieillissement. Les MEM's présentent les mêmes problématiques que les capteurs à jauges. Contrairement à d'autres capteurs qui supposent un fluide d'amortissement ou tout autre moyens externe mécanique, l'amortissement des capteurs Columbia ou réponse dynamique de la balance de force est réglé avec précision au travers d'un circuit électronique.

L'amortissement est réglé proche d'une valeur critique pour une réponse maximum exploitable ou à un degré plus important limité et sensible aux hautes fréquences. Pour la plupart des capteurs, l'amortissement n'est pas contrôlé (comme pour les capteurs piézoélectriques) ou dépendant d'un fluide visqueux. En ce qui concerne les amortissements par fluides visqueux, l'amortissement ne peut être contrôlé du fait que la viscosité varie avec la température. Des moyens potentiométriques, LVDT ou à jauges, utilisent une forme de chauffage thermostatique contrôlé pour maîtriser et stabiliser les caractéristiques d'amortissement. De plus les instruments Columbia intègrent toutes les formes de contrôle afin de le rendre compatible avec

les électroniques, acquisition de données, oscilloscopes afficheurs etc ... La sortie est en Volt et n'impose pas d'amplification.



Le système HP

Nous avons vu que le couple de contre réaction traduit l'accélération en force mesurable, ceci impose qu'un courant électrique soit présent au travers d'une bobine, dans un circuit magnétique, pour contre balancer l'accélération appliquée. Cet ensemble est communément nommé forceur ou coupleur.

L'un des aspects critiques du coupleur est la méthode utilisée pour suspendre la masse sismique. Dans l'idéal, ce support permet le déplacement suivant un seul axe et dans une direction définie et, dans le même temps, éliminer les mouvements dans d'autres directions. Il est évident que cette mécanique ne doit pas induire de force propre comme friction ou effet de ressort. L'ensemble doit aussi être suffisamment robuste pour résister à l'environnement physique sans être endommagé.

Trois méthodes sont utilisées habituellement : bandes en flexion, bandes tendues et pivots ou roulements. Les bandes tendues ou en flexion possèdent les mêmes avantages et les mêmes inconvénients. Il n'existe aucune friction et elles possèdent une excellente fiabilité. Les bandes en flexion sont excellentes selon l'axe sensible et les bandes tendues fléchissent en transverses et doivent, ainsi, être noyées dans des fluides pour éliminer efforts transverses et vibrations. Les deux technologies risquent l'endommagement lors de chocs. Les lames flexibles métalliques peuvent être déformées de manière permanente induisant des erreurs de biais. Les lames flexibles non métalliques ne se déformeront pas mais se casseront dans les mêmes conditions. Les lames flexibles rigides produisent des erreurs de linéarité du fait de leur propension à reprendre leur forme initiale.

Ceci ne se produit pas avec des pivots ou roulements à billes. Les instruments les moins coûteux de Columbia utilisent des pivots bien adaptés à des applications où la précision est importante, mais les conditions d'environnement sont assez peu sévères.

Les instruments Columbia les plus sophistiqués utilisent des roulements à billes micro usinés en lieu et place des pivots.

Ces performances permettent de rivaliser avec les instruments à lames de flexion tout en augmentant les tenues aux chocs et vibrations. Ce concept induit de faibles rectifications, aucun basculement de pivot, aucune détérioration progressive et d'excellentes performances en statique sous l'effet de vibrations. Tous les modules HP sont réalisés en interne pour assurer une consistance d'un instrument à l'autre en termes de caractéristiques et de fiabilité.

Accéléromètres angulaires à balance de force

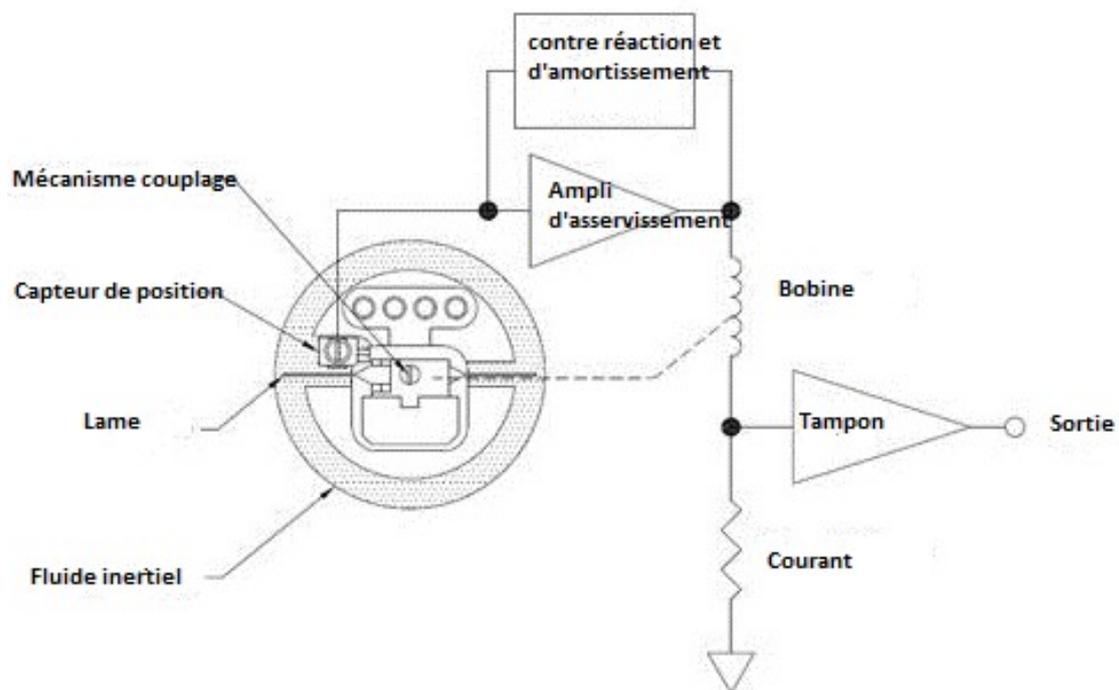
Un seul accéléromètre angulaire repose sur le même principe que les accéléromètres linéaire c'est le SR 220.

Les autres instruments de cette catégorie utilisent une chambre sous forme d'anneau rempli de fluide pour mesurer l'accélération angulaire. Cette technologie éprouvée existe depuis plus de 35 ans.

C'est une solution fiable et précise pour mesurer de faibles accélérations angulaires.

Utilisés dans les plateformes FLIR, les systèmes de visée d'avions militaires ou de véhicules sol, les servo accéléromètres angulaires sont souvent utilisés pour le test ou le suivi d'engins.

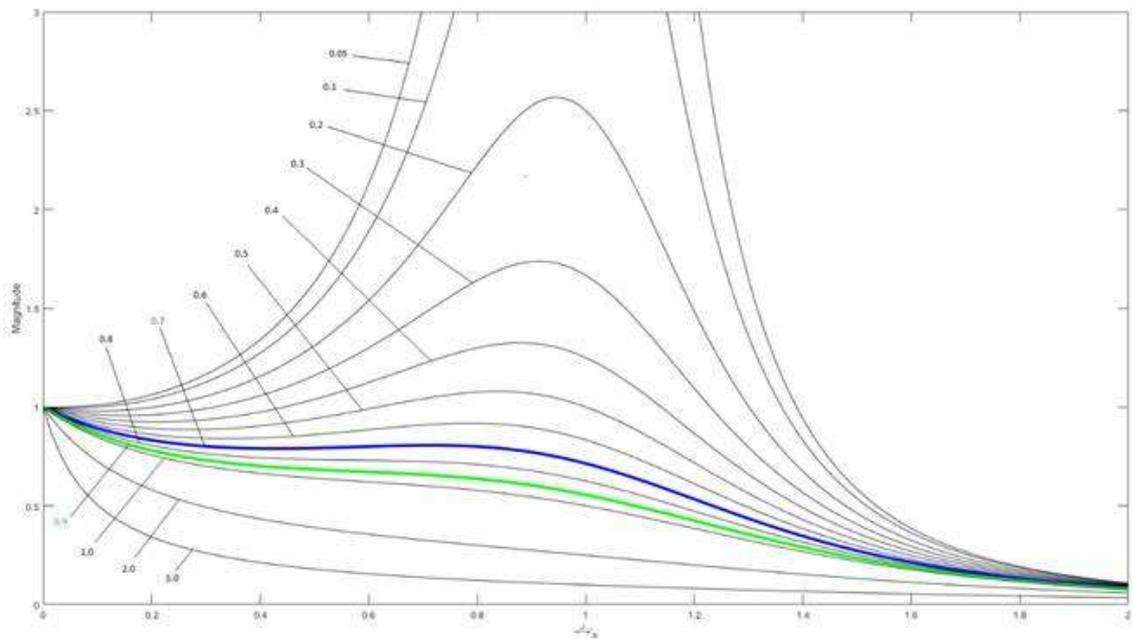
Columbia utilise, pour ces instruments, les suspensions par roulements à billes micro usinés pour offrir le meilleur niveau de précision, de fiabilité et de longévité. Le mécanisme intègre aussi un aimant en terres rares alliées pour donner un maximum de signal de sortie et les meilleures performances possibles.



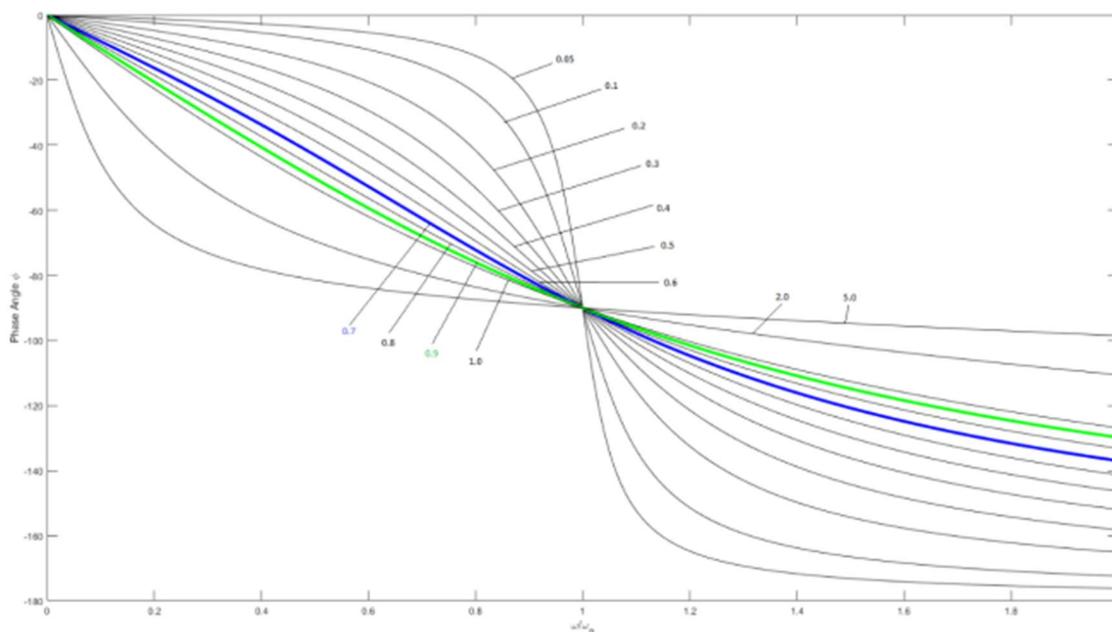
Le fluide présent dans l'anneau représente la masse inertielle. Le fluide est stationnaire lorsque la rotation est présente. Il existe des lames suspendues mobiles par rapport au boîtier et interdisent au fluide tout déplacement. Lorsque l'instrument tourne, le fluide tente de déformer les lames et le capteur de déplacement détecte le déplacement de ces lames. Le signal du

capteur de déplacement génère un courant qui est utilisé en contre réaction pour forcer le maintien des lames en position. Le couple de torsion utilisé pour maintenir les masses fixes est directement proportionnel à l'accélération angulaire. Le courant utilisé pour le maintien des masses en place traverse une résistance de charge et est directement proportionnel à l'accélération.

Naturellement, le concept est proche de celui des accéléromètres linéaires, toutefois les réponses en amplitude et en phase sont notées ci-dessous.



Réponse en amplitude d'un système du second ordre.



Réponse en phase d'un système du second ordre

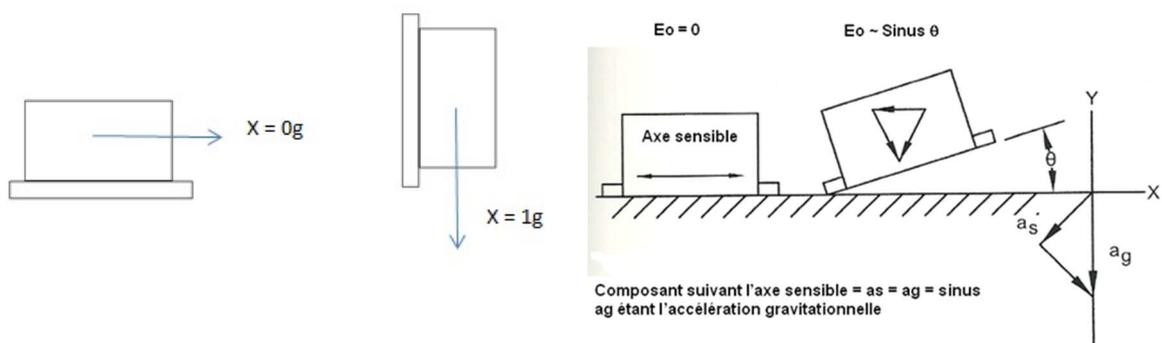
Inclinomètres

Les inclinomètres Columbia fonctionnent, pour la plupart, comme les accéléromètres asservis et c'est la projection de g qui donne le sinus de l'angle.

Un inclinomètre dont l'axe sensible est perpendiculaire à la gravité donne une accélération '0' et donc un angle nul.

Si l'on bascule l'instrument pour que l'axe sensible soit parallèle à la gravité terrestre, le capteur aura une sortie indiquant 1 g soit 90 degrés angulaires

Les échelles de mesures disponibles sont échelonnées entre +/- x degrés angulaires et +/- 90 degrés angulaires.



L'échelle de mesure est fixée lors de l'étalonnage et la plus petite valeur mesurable est déterminée par le seuil de déclenchement, la précision de l'instrument et le niveau de bruit.

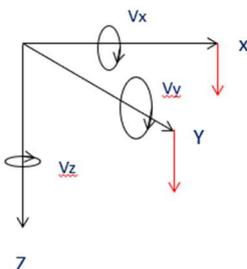
Pour la mesure d'angle, un capteur précis à $1 \mu g$ n'a d'intérêt que si le seuil de déclenchement par rapport à zéro est de $1 \mu g$ ou mieux.

La plupart des inclinomètres ont des échelles de mesure minimum de +/- 5 degrés angulaires soit $55\ 555 \mu g$. Le modèle amorti par fluide (FND) existe en +/- 1 degré angulaire soit $11\ 111 \mu g$.

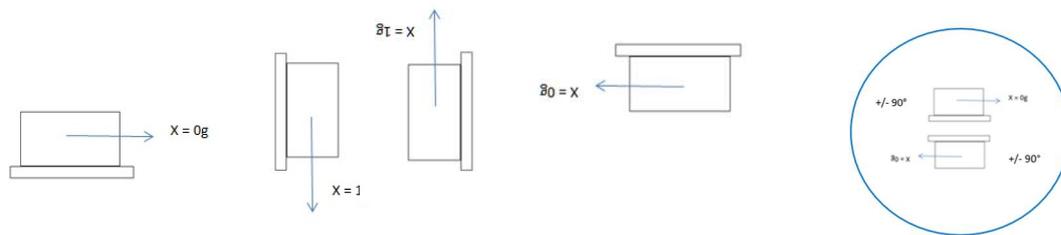
Ceci permet d'appréhender la difficulté à mesurer de très petites valeurs.

La mesure d'assiette avec deux inclinomètres ou un inclinomètre biaxial dont les axes sont disposés à 90 degrés angulaires sur un plan perpendiculaire à la gravité est tout à fait possible. Il convient, cependant, d'aligner minutieusement les axes.

La mesure d'angles de cap, autour de l'axe z n'est pas possible. En effet, si les axes x et y sont soumis à la gravité, l'axe z ne peut pas utiliser la gravité comme référence.



La mesure d'angle à 360 degrés angulaires peut être obtenue en utilisant deux instruments en opposition 2 x +/- 90 degrés angulaires



Explication des caractéristiques

Ci-dessous une explication des principales caractéristiques des accéléromètres :

Facteur d'échelle

Le facteur d'échelle est le rapport entre la variation de la sortie par rapport à une variation du phénomène à mesurer ou appliqué. Le facteur d'échelle donné par Columbia est exprimé en Volt/g ou en Volt/radian/seconde².

Biais

Le biais est la valeur mesurée en sortie du capteur lorsqu'aucune sollicitation mécanique n'est présente.

Axe d'entrée

L'axe d'entrée est l'axe suivant lequel le capteur fournit sa valeur maximum.

Sensibilité transverse

La sensibilité transverse est la constante proportionnelle qui relie la sortie d'un accéléromètre aux accélérations transverses.

Erreur composite

L'erreur composite est la déviation maximale de la donnée de sortie par rapport à la fonction de sortie spécifiée. Cette erreur peut comprendre les effets de l'hystérésis, de la linéarité, de la fidélité ainsi que d'autres incertitudes. Elle est usuellement exprimée en pourcentage de la pleine échelle de sortie.

Fidélité

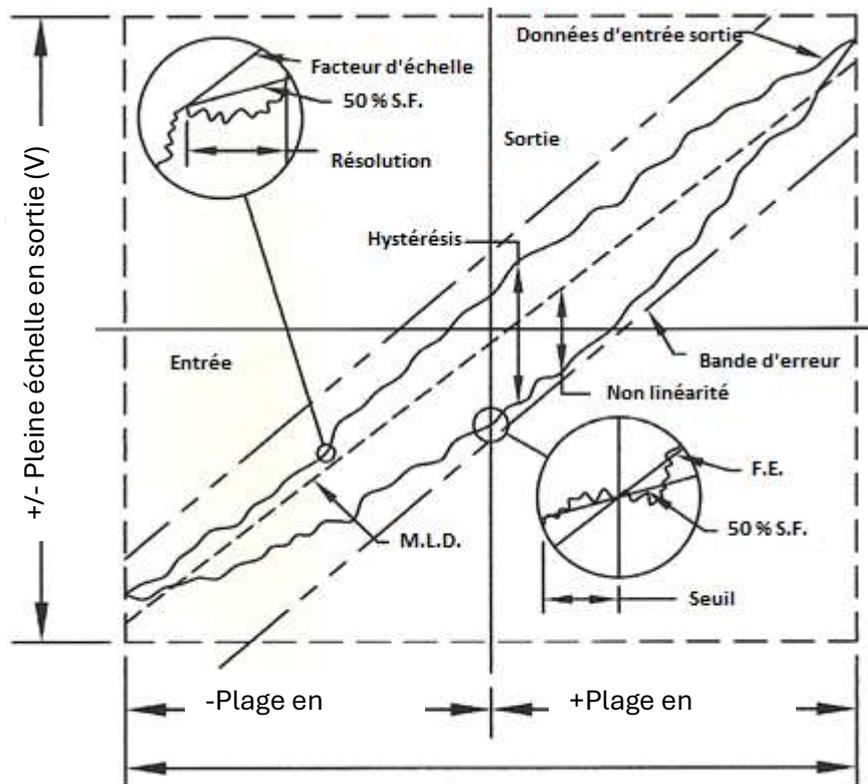
Fidélité est la propriété d'un capteur à reproduire une caractéristique de performance de sortie donnée sous un phénomène d'entrée identique dans des conditions d'environnement identiques. La fidélité intègre les effets de seuil, de résolution et d'autres incertitudes.

Non linéarité

L'erreur de linéarité est la déviation de la donnée en sortie par rapport à la ligne définie par le zéro ou biais et le coefficient de facteur d'échelle.

Hystérésis

D'hystérésis est la différence entre les signaux de sortie lors de l'application de phénomènes physiques dans le sens croissant puis décroissant. Voir illustration suivante



F.E et S.E. . : Facteur d'échelle

MLD : meilleure ligne droite

Résolution

La résolution est la valeur minimale d'entrée, supérieure au seuil, produisant une variation de sortie égale à un pourcentage spécifique (au moins 50%) de variation de sortie espérée en utilisant le facteur d'échelle.

Seuil

Le seuil de déclenchement est la plus grande valeur absolue du minimum de phénomène en entrée produisant un pourcentage spécifique (au moins 50%) de la sortie espérée en utilisant le facteur d'échelle.

Rectification

L'erreur de rectification est l'erreur induite en sortie par des perturbations vibratoires agissant sur l'accéléromètre.

Autres notions

Les **échelles de mesures** des accéléromètres sont exprimées en g soit en m/s^2 ou ($1\text{ g} = 9,81/m/s^2$).

Les échelles de mesures des accéléromètres angulaires sont exprimées en Radian/s².

Suivant les modèles, les capteurs sont **alimentés** en +/- 15 VDC +/- 1 VDC, + 12 à + 15 VDC, + 15 VDC +/- 1 VDC pour les sorties 4-20 mA ou + 24 à +32 VDC (typiquement 28 V bord).

La plupart des alimentations du commerce sont régulées correctement et n'oscillent pas. Des oscillations sur les signaux d'alimentation sont de nature à générer du bruit sur le signal de sortie et par conséquent à fausser la mesure. Pour être plus clair, un signal alternatif superposé au signal continu d'alimentation sera restitué en sortie.

Les électroniques de 'lecture' des signaux de sortie doivent être conformes aux spécifications et plus particulièrement en terme de résistance de charge. Une adaptation d'impédance n'est pas indispensable.

Le raccordement électrique d'un capteur doit prendre en considération le **blindage du câble** qui évitera la présence de bruit sur le signal mesure. Cependant le signal mesure est en haut niveau et les perturbations sont faibles en considération des niveaux de signaux mesure. Relier le blindage du câble au commun représente une liaison interne de masse, le relier à la terre n'est pas forcément consistant sur des matériels embarqués.

Une boucle de **masse** est toujours néfaste, mais le terme même a provoqué dans le grand public une compréhension erronée ,induisant des solutions erronées. En effet, réaliser une double connexion de masses via deux chemins différents ne constitue pas une boucle de masse, mais au contraire une "boucle entre masses". La boucle entre masses, appelée également maillage, améliore l'équipotentialité des masses et donc est en général bénéfique, au contraire de la boucle de masse.

Si le commun du capteur est relié sur le capteur et le commun du lecteur est relié séparément sur le lecteur, on évite les problèmes de bruit sur le câble.

La tension de **sortie** ou courant de sortie du capteur dépend des modèles et est toujours en haut niveau +/- 5 VDC ; +/- 7,5 VDC, 4-20mA ...

Autre notion importante : l'**alignement du boîtier**. Pour un accéléromètre, l'alignement du boîtier est capital. La mesure est référencée à la gravité, toute déviation par rapport à l'alignement peut générer des erreurs conséquentes. Ceci est plus particulièrement visible sur les instruments multiaxiaux. Un accéléromètre deux ou trois axes mal positionné lit une gravité apparente sur l'un ou l'autre axe décalant, non seulement la référence mais l'application de l'accélération.

Particularité des accéléromètres angulaires : Ils ne sont pas soumis à la gravité.