

Capteurs : Pressions, accélération et forces à pont de Wheastone **Les bases essentielles et les définitions indispensables.**

A – Le concept :

Un capteur dit à jauges comprend un corps d'épreuve instrumenté de jauges de déformations. Le principe consiste à traduire le phénomène physique en une déformation et à mesurer la déformation pour restituer un signal dit ' mesure ' correspondant au phénomène physique.

Pour les capteurs de force, de pression et certains capteurs de vibrations, entre autre, les jauges de déformations peuvent-être de différentes natures. De la jauge piézorésistive collée – que signifie piézorésistive – en passant par les jauges diffusées, les jauges à implantation ionique, les jauges épitaxiales jusqu'aux jauges à trames métalliques, un inventaire considérable pourrait-être dressé. Dans tous les cas, les jauges sont ' montées ' en pont complet de Wheastone et c'est la variation d'impédance qui offrira la possibilité de récupérer un signal mesure.

A – 1 Le montage

Montage pression :

L'obtention d'un signal mesure pression passe par deux impératifs, découpler l'encastrement de la membrane et la membrane elle même des parois de la structure et prévoir un espace de dégagement radial et axial. Il convient également d'éviter l'ajout de produits qu'ils soient rigides ou pseudo élastiques dans le système de ' transmission de pression ' pour éviter d'ajouter une rigidité supplémentaire au dispositif. Par ailleurs il convient de veiller à ce que les coefficients de dilatation thermiques soit homogènes.

Dans certains cas il est indispensable d'éviter le contact entre média à mesurer et membrane. Pour un excellent capteur de pression, la membrane est forcément proche du pont de Wheastone. Il existe des situations où la membrane peut-être déportée, la transmission de l'effort généré par la pression est alors transmis, mécaniquement, via des tiges métalliques ou des capillaires remplis de fluides supposés incompressibles et non oxygénables. La mode des capillaires remplis de Mercure persiste malgré la propension naturelle de ce fluide à réagir en température. Ceci étant les capteurs de ce type ne possèdent pas une précision importante et les dérives thermiques dues au fait de déporter la membrane par rapport au corps d'épreuve muni de son pont de jauges sont considérables. D'ailleurs d'autres problématiques viennent se greffer sur les précédentes dans ce cas de figure et plus particulièrement lorsque la membrane est affleurante. En effet les efforts exercés causent quelques soucis et des débats existent sur la façon de réaliser et disposer la membrane, sous forme classique soudée au droit du boîtier ou sous forme de capuchon soudé sur la paroi externe du boîtier.

Bref ce type d'assemblage n'est pas synonyme de précision mais permet d'assurer des mesures relativement fidèles.

Montage force :

Pour les capteurs de force, le média fluide est remplacé par un solide. Une mesure de force précise suppose que le capteur soit fixé de manière solidaire à l'objet à tester et soit retenu au côté opposé pour que l'effort soit correctement appliqué. L'idée est similaire à celle des capteurs de pression, un pont de jauges est monté sur un corps d'épreuve qui sera sollicité en compression, en traction ou en traction et compression. Ceci impose de générer, sur le corps d'épreuve, une déformation mesurable. En d'autres termes le principe peut-être assimilé à celui d'une balance de pesage. Un bras retenu d'un côté perçoit l'effort à son extrémité, contrairement à la balance le mouvement n'est pas souhaité de sorte à ce que le bras se déforme et sollicite les jauges. Ceci n'est, naturellement qu'un cas d'école puisque

s'il existe des corps d'épreuve sous formes de poutres, il en existe de nombreux autres dans d'autres configurations de sollicitation.

Dès lors que le capteur est assemblé et étalonné c'est un instrument de mesure, toutes les sollicitations mécaniques sont, à priori, des efforts parasites. Un mauvais montage, des montages avec des boulons ou vis serrés ' hors tolérances constructeurs ' sont des entraves à la mesure et spécialement à sa précision.

Pour être rassuré lors du montage, une vérification du déséquilibre initial est recommandée. Dans tous les cas l'effort doit être appliqué perpendiculairement à la surface d'appui, ne doit pas être trop décentrée et doit être uniformément réparti.

Accéléromètres

L'accéléromètre est constitué d'une masse qui doit se déformer pour imprimer une déformation au corps d'épreuve et permettre au pont de Wheastone de percevoir le phénomène. Là encore le corps d'épreuve a une importance capitale mais doit faire l'objet de toutes les attentions. Un accéléromètre classique, piézo électrique est constitué d'une masse qui imprime l'accélération dynamique à un quartz ou une piézite de synthèse, dans le cas d'un accéléromètre à jauges, la déformation est indispensable et la mesure dépendra de la rigidité du corps d'épreuve. Comme il s'agit de mécanique pure et dure, la bande passante et la sensibilité seront des considérations majeures. Autre point d'importance, la mécanique possède un seuil de déformation et toute mesure inférieure à ce seuil ne peut-être réalisée.

Les autres contraintes sont liées au phénomène vibratoire, tout ajout de masse / ressort dans le montage modifie la mesure .

Aujourd'hui le capteur accélérométrique à jauges se place, pour les mesures faisant intervenir la composante continue, entre les MEM's capacitifs et les accéléromètres asservis ou pendulaires.

B – Caractéristiques

Il faut faire preuve d'un grand discernement lorsque l'on entame la lecture de caractéristiques et il faudra bientôt être expert métrologue pour réaliser des comparatifs entre différents capteurs proposés.

Pour se familiariser un peu avec l'approche ' précision ' il est indispensable de comprendre la terminologie utilisée.

B – 1 Etendue de mesure

L'étendue de mesure ou pleine échelle est la plage choisie et pour laquelle l'instrument a été étalonné. La plage de mesure en pression devrait-être exprimée en Pascal mais pour éviter de traîner des Kilo ou des Méga c'est souvent le Bar qui lui est substitué (les américains utilisent encore les PSI – Pound par Inch Carré), pour les efforts le Newton est l'unité officielle mais on entend souvent parler de Kilogrammes, pour l'accélération, le Ns^{-2} est l'unité officielle mais tellement moins poétique que le g de notre gravité terrestre.

Pour des mesures rapides, la bande passante est référencée à la fréquence naturelle, soit de l'ordre de 20 % de la fréquence naturelle pour la bande passante haute et il est important d'éviter de monter à 40 % de la fréquence naturelle sur les instruments non amortis sous peine d'atteindre des fréquences de résonance.

B – 2 Référence

Les référentiels pour les capteurs d'efforts et d'accélération sont respectivement le Newton et la gravité terrestre.

Pour les capteurs de pression le problème est sensiblement différent, en effet la référence évidente, le vide, est la plus complexe à réaliser puisqu'il convient de sceller la cavité de référence sous vide. Une astuce consiste à décaler électriquement le zéro mais il est évident que ce n'est pas une solution idéale. Il existe 3 types de référentiels :

A : pour absolu et donc référencé au vide, le capteur amené à l'air libre lira donc la pression atmosphérique.

R : (G aux Etats Unis) pour la pression relative. La référence est alors laissée à l'air libre et les mesures sont référencées par rapport à la pression atmosphérique vraie.

D : Pour différentiel permet d'appliquer la pression de part et d'autre, c'est un capteur relatif dont la référence est autre que la pression atmosphérique.

S : Scellé hermétiquement avec une valeur fixe de pression de référence soit 1 atmosphère. La valeur lue, lorsque le capteur est à l'air libre, est voisine de zéro mais ne peut-être exacte puisque la pression atmosphérique varie.

B – 3 Surcharge

C'est la valeur, au delà de la pleine échelle de mesure, qui peut-être atteinte sans altération des caractéristique et sans détérioration de l'instrument. Ce domaine de surcharge implique de ne pas soumettre l'instrument à des phénomènes supérieures à la bande passante de +/- 1/2 dB (dans la théorie).

Pression : deux notions distinctes, la pression de surcharge peut-être un phénomène transitoire extrêmement brutal comme un coup de bélier, la conception de certains capteurs utilise donc un dispositif annulaire se comportant comme une butée, d'autres capteurs utilisent un corps d'épreuve particulier inséré entre la membrane et une butée mécanique. Certains capteurs peuvent voir leur membrane détériorée par ce type de surcharge, par exemple lors d'essais de propulseurs, dans ce cas il existe des capteurs double enveloppe et dotés d'une membrane remplaçable sans besoin de re-calibration. Une autre notion, pour la pression de surcharge, s'applique aux capteurs différentiels. Un capteur différentiel est utilisé pour mesurer des pressions sur une ligne dont la pression est plus importante que l'échelle de mesure. La pression de ligne n'est pas une pression de surcharge à ceci près que de nombreux capteurs différentiels ne supportent pas que la pression de ligne soit appliquée sur un seul des ports du capteur. D'excellents capteurs supportent des surcharges, sur l'un ou l'autre port, d'une valeur identique à la pression de ligne, d'autres encore, peuvent supporter plus.

Accélérométrie : La manipulation ou l'usage d'accéléromètres peut conduire à des chocs ou des vibrations importantes bien au delà de la pleine échelle et pour limiter les problèmes liés à ces surcharges, certains capteurs sont dotés de butées mécaniques ou bien les corps d'épreuve sont noyés dans un liquide de sorte à amortir les chocs.

B – 4 Bande passante :

Rares sont les constructeurs de capteurs à jauges de contraintes qui évoquent une bande passante. Les capteurs considérés comme des systèmes masse ressort à 1 degré de liberté possèdent une fréquence naturelle ou fréquence propre. Il s'agit du passage de la réponse en phase à la quadrature $\phi = \pi/2$. La bande passante est de 0 à 20 % de la fréquence propre avec une tolérance de +/- 1/2 dB, une fréquence avoisinant cette valeur peut endommager un capteur ;

Dans le cas d'accéléromètres amortis la bande passante couvre de 30 à 50 % la fréquence naturelle.

Pour un capteur de pression possédant une membrane en retrait, la bande passante devrait être inférieure à celle d'un capteur à membrane affleurante mais la rigidité mécanique de l'assemblage permettant d'offrir des membranes affleurantes apparente le dispositif à celui des capteurs d'effort dont la raideur des interfaces et pièces de montage interviennent dans le cadre de la réponse dynamique.

B – 5 Fréquence de résonance :

C'est la fréquence à laquelle l'assemblage corps d'épreuve jauges de déformations entre en résonance et répond avec un déplacement maximum à la contrainte appliquée. Imprimer un effort (contrainte correspondant à force, pression ou accélération) supérieure à 40 % de la fréquence de résonance est de nature à endommager le capteur.

B – 6 Sensibilité

La sensibilité réside dans la possibilité du montage corps d'épreuve / pont de jauge à répondre aux sollicitations mécaniques en fonction d'une tension d'alimentation. Elle s'exprime en mV/V et est donnée en valeur nominale puisque variable d'un capteur à l'autre. Pour cette raison l'expression de cette donnée est affectée d'une marge d'erreur maximale pouvant intervenir d'un capteur à l'autre. Les capteurs sont, ensuite, étalonnés et la sensibilité réelle établie.

La valeur d'alimentation est donc recommandée pour obtenir cette sensibilité, une valeur inférieure permet le fonctionnement sans assurer des performances optimales, on estime que 50 % de la valeur d'alimentation induirait 50 % de la sensibilité énoncée.

Les capteurs intégrant une électronique d'amplification intègrent également, le plus souvent, un régulateur d'alimentation, la sensibilité est alors exprimée en Volt ou milli Ampère sachant que l'électronique peut permettre de tricher sur le réglage de pleine échelle au travers d'un réglage de gain.

B – 7 : Sensibilité transverse

La sensibilité transverse est la susceptibilité au mesurande dans la direction perpendiculaire à l'axe de mesure. Ceci n'affecte que rarement les capteurs de pression soumis, au travers du port pression à un effort directement appliqué sur la membrane. Pour les capteurs d'accélération cette notion est très importante comme pour les capteurs d'efforts.

Imaginons un capteur d'effort où le point d'application de la force est supposé central et l'effort transmis via un doigt dépassant du boîtier, si l'autre côté du capteur est correctement monté, un effort en couple, flexion etc ... viendra perturber la mesure.

B – 10 : Dérive thermique de la sensibilité

La dérive thermique de la sensibilité est un facteur qui caractérise la valeur de sensibilité en fonction de la température, cette valeur est souvent une fonction linéaire pour les températures modérées. Cette dérive est compensée lors de la compensation du pont de jauges de déformations. Pour un capteur classique possédant une sortie exprimée en mV/V, le seul moyen de réduire cette dérive est de réaliser un étalonnage en température.

Pour un capteur à électronique intégrée le même concept peut-être appliqué si le capteur est compact. En d'autres termes si la partie sensible et l'électronique de mesure ne sont pas déportés.

Si les deux modules sont déportés, les dérives au niveau de la prise d'information et du conditionnement ne seront pas les mêmes ne serait-ce que parce que les températures ambiantes peuvent-être différentes ;

B – 11 Tension d'alimentation

La tension d'alimentation est spécifiée pour chaque capteur et il est conseillé d'employer une tension régulée, constante et correctement filtrée. A défaut plusieurs caractéristiques peuvent-être affectées. Si le capteur possède une électronique incorporée, le plus souvent un régulateur de tension permettra de ne pas se soucier des variations d'alimentation.

B – 12 Résistance d'entrée / sortie

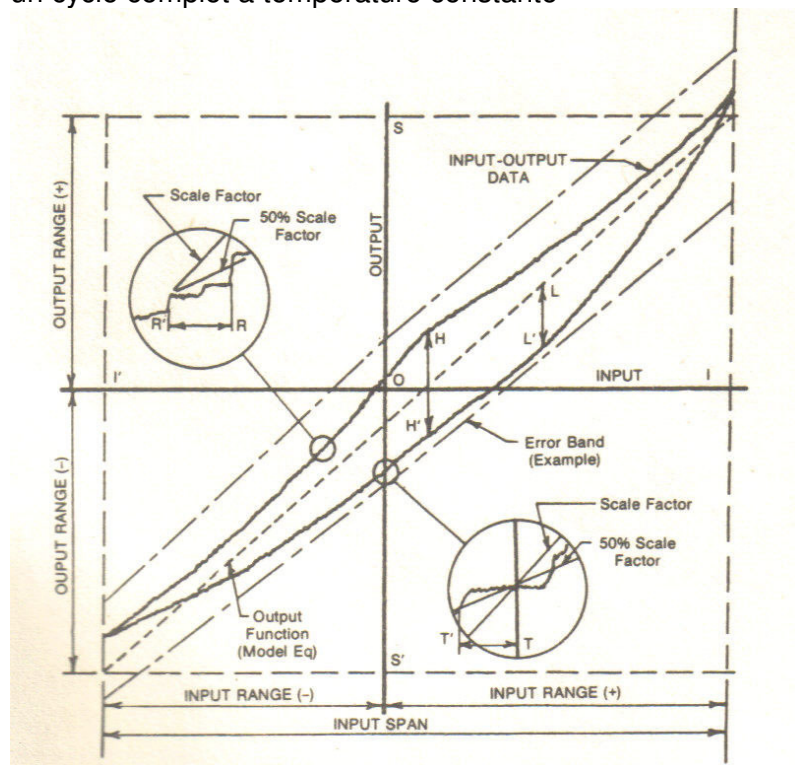
Pour un capteur bas niveau les résistances d'entrée / sortie du pont sont sensiblement équivalente à la résistance du pont. La résistance de sortie est, tout naturellement, modifiée par les résistances en série servant à la compensation thermique. Dans tous les cas les valeurs sont spécifiées sur les fiches d'étalonnage.

B – 13 Non linéarité

L'écart de linéarité représente l'écart entre la meilleure ligne droite théorique et la moyenne des valeurs de sortie du capteur, elle s'exprime en pourcentage de la pleine échelle. Cette courbe peut-être exploitée pour réaliser des corrections

B – 14 Hystérésis

L'hystérésis est la qualité qui caractérise l'amplitude du capteur à donner le même signal de sortie lorsqu'une valeur est atteinte dans l'ordre croissant puis dans l'ordre décroissant sur un cycle complet à température constante



L'illustration ci-dessus a valeur pour les capteurs accélérométriques et montre le résultat avec un capteur mesurant des signaux aussi bien négatifs que positifs. La même chose est transposable aux réponses essentiellement positives des capteurs de pression.

B – 15 Erreur de fidélité

L'erreur de fidélité est l'écart lu entre deux mesures pour une même grandeur physique avant et après un cycle de courte durée à une température constante. Cette erreur est déterminée à partir de deux cycles consécutifs d'étalonnage mécanique.

B – 16 Déséquilibre initial du zéro

Le déséquilibre initial correspond à la valeur de tension de sortie lorsque aucune sollicitation mécanique n'est appliquée.

Certain constructeurs indiquent que pour un accéléromètre il convient de mettre l'instrument avec son axe mesure perpendiculaire à l'accélération terrestre pour déterminer le déséquilibre initial. A priori, un instrument correctement étalonné devrait lire zéro. Si le même instrument est placé dans l'axe de la gravité, il devrait lire 1 g. Sur ce point, il est intéressant de s'attacher à la projection de g ou à la mesure inclinométrique. L'axe x parallèle à la terre ou perpendiculaire à l'accélération terrestre est sollicité pour tout décalage angulaire par la projection de g et a tendance à lire le sinus d'un angle si le niveau n'est pas parfait. Pour la gravité terrestre, elle est variable selon l'altitude de mesure et si le capteur n'est pas réellement calé sur 1 g, il peut s'agir d'une erreur induite par la gravité..

Pour tous les capteurs il convient d'attendre une stabilisation de 30 minutes avant de procéder à la mesure de déséquilibre du pont.

Le zéro est réalisé en équilibrant le pont de jauges sur son corps d'épreuve, toute manipulation visant à corriger ce zéro est un artifice qui peut lorsque des résistances sont ajoutées, modifier la compensation thermique ou lorsque réalisé électroniquement modifier simplement la courbe réelle de sortie.

Pour les stabilités à long terme il est indispensable d'utiliser des capteurs conçus sur des jauges à trames métalliques et utilisez un capteur de qualité plutôt qu'un artifice consistant à diviser la tension d'alimentation par 2 pour réduire les écarts d'un facteur 4.

B – 17 Dérive thermique du zéro

Les compensations thermiques permettent de limiter cette dérive non linéaire sur le zéro usiné mais ne présage pas des dérives de zéro à long terme.

B – 18 Plage d'utilisation en température

Les plages de températures non compensées sont fonction des capacités de l'assemblage de capter raisonnablement les phénomènes quelle que soient les températures environnantes. Ainsi un capteur dont la plage s'étend de -55°C à $+150^{\circ}\text{C}$ capte un phénomène mais les mesures sont entachées d'erreurs si la plage n'est pas compensée.

Deux solutions existent : soit exiger une compensation spécifique pour une plage de température donnée soit réaliser un étalonnage avec des paliers thermiques et réaliser une matrice de compensation des erreurs.

B – 19 Sensibilité aux accélérations

Tous les capteurs à jauges de déformations sont conçus sur la base d'un corps d'épreuve équipé de jauges de contraintes. La sollicitation des corps d'épreuve par des accélérations dites parasites est de nature à entacher la mesure.

Le sensibilité aux accélérations correspond à une tension parasite mesurée en sortie du capteur. Pour les capteurs de pression et les capteurs d'efforts, conçus pour être affranchis quasi totalement de ces perturbations. Pour des capteurs de pression embarqués sur satellites une notion est donnée au travers de l'erreur : $\pm 0.0015\%$ P.E./g à $\pm 0.2\%$ P.E./g (de la plus forte à la plus faible P.E.).

Il est, ensuite important de savoir si chocs et vibrations sont de nature à modifier les caractéristiques des instruments. Un capteur de pression affichera, par exemple tenue aux chocs selon 3 axes de 30 g pour 11 ms sans détérioration de la calibration et 25 g rms pour la tenue en vibrations.

B – 20 : Orientation de l'axe mesure des accéléromètres

Les accéléromètres possèdent une indication de l'axe mesure directement notée sur l'instrument. Un accéléromètre prévu pour mesurer des accélérations perpendiculaires z au plan x – y, il est important de se souvenir qu'une compensation peut ou doit-être prévu pour la gravité car un accéléromètre + / - 1 g mesurera, si aucune compensation n'est réalisé, la pleine échelle dès son installation

B – 21 Poids

Pour tous les capteurs le poids revêt une importance considérable soit que les capteurs soient embarqués et donc demeurer légers soit que les vibrations et chocs soient de nature à perturber le signal suivant la loi $F = My$ ou la Force est égale à la masse par l'accélération.

C – L'analyse

Les fondements conceptuels de la mesure reposent sur les moments d'inertie qui déterminent les formules utiles pour le calcul de capteurs.

Les puristes raisonnent sur ces bases solides pour réaliser des lames en traction, tores cylindriques en traction compression, des demi anneaux ou des anneaux dynamométriques etc ...

Entre les calculs et la réalisation, il existe un fossé, de la réalisation à l'étalonnage il existe un second pas à franchir.

De là à la réalité il existe un gouffre.

Fort de ces bases les caractéristiques énoncées peuvent aller du sérieux au n'importe quoi.

Qui a entendu des ' pseudo spécialistes ' annoncer des mesure de un micro g en accélération ? C'est le type de valeur de déclenchement de capteurs particulièrement onéreux et certainement par réalisés avec des jauges.

Qui peut prétendre à des mesures de pression météorologiques atteignant des précisions redoutables ? La seule solution consiste à utiliser des capsules anéroïdes on ne peut plus imprécises mais fidèles et à effectuer des cycles en pression et température pour corriger les erreurs puis a déterminer des algorithmes pour traiter les signaux.

La triche réside dans les notions de précisions confondues avec des seuils de déclenchement ou des résolutions ou faisant abstraction de certaines dérives.

Les caractéristiques physiques sont incontournables, un capteur proposé pour une poignée d'Euros n'a pas la qualité d'un capteur très coûteux.

C – 1 Analyse de précision

Une précision globale s'exprime en terme de cumul des erreurs.

Mathématiquement la somme des erreurs au carré sous racine donne un précision réelle sans lien avec les phénomènes extérieures. Le plus délicat sera de déterminer la précision d'un capteur intégré dans une chaîne particulière.

Ainsi, prenons un capteur de pression dont les caractéristique sont les suivantes :

Linéarité : 0,15 %

Hystérésis : 0,10 %

Fidélité : 0,1 %

Dérive thermique de sensibilité : 0,009 % / PE

Dérive du zéro : 0,018 %

La précision calculée :

A moins disant sur 20 °C la précision sera :

$$0,15^2 + 0,10^2 + (0,009 \times 20)^2 + (0,018 \times 20)^2 =$$

$$0,0225 + 0,01 + 0,000081 + 0,1296 = 0,0225$$

Sous racine : donne 0,15 %

Ceci est une régression linéaire au moindre carré pour déterminer la précision lors d'une variation de 20 °C, dans une plage compensée et sans influence externe.

Pour obtenir cette qualité sur le long terme il faut une expérience et souvent réaliser plusieurs instruments pour obtenir le bon.

En reprenant des caractéristiques classiques et des instrument à 0,01 %, ceci suppose que linéarité, hystérésis et fidélité soient très soignés comme les compensations thermiques

puisque sur 20 °C la somme des erreurs au carré sera de 0,0001 %. Hors dérive thermique le résultat est le même, soit, si la linéarité est de 0,001 %, l'hystérésis et la fidélité identiques, la régression linéaire montrera une erreur de 0,054 % hors dérive thermique, pour obtenir 0,01 % il faut que l'une des erreurs soit moindre que 0,0001 % sous peine, par calcul d'arriver à 0,017 % avec linéarité, hystérésis et fidélité à 0,0001 % ?!

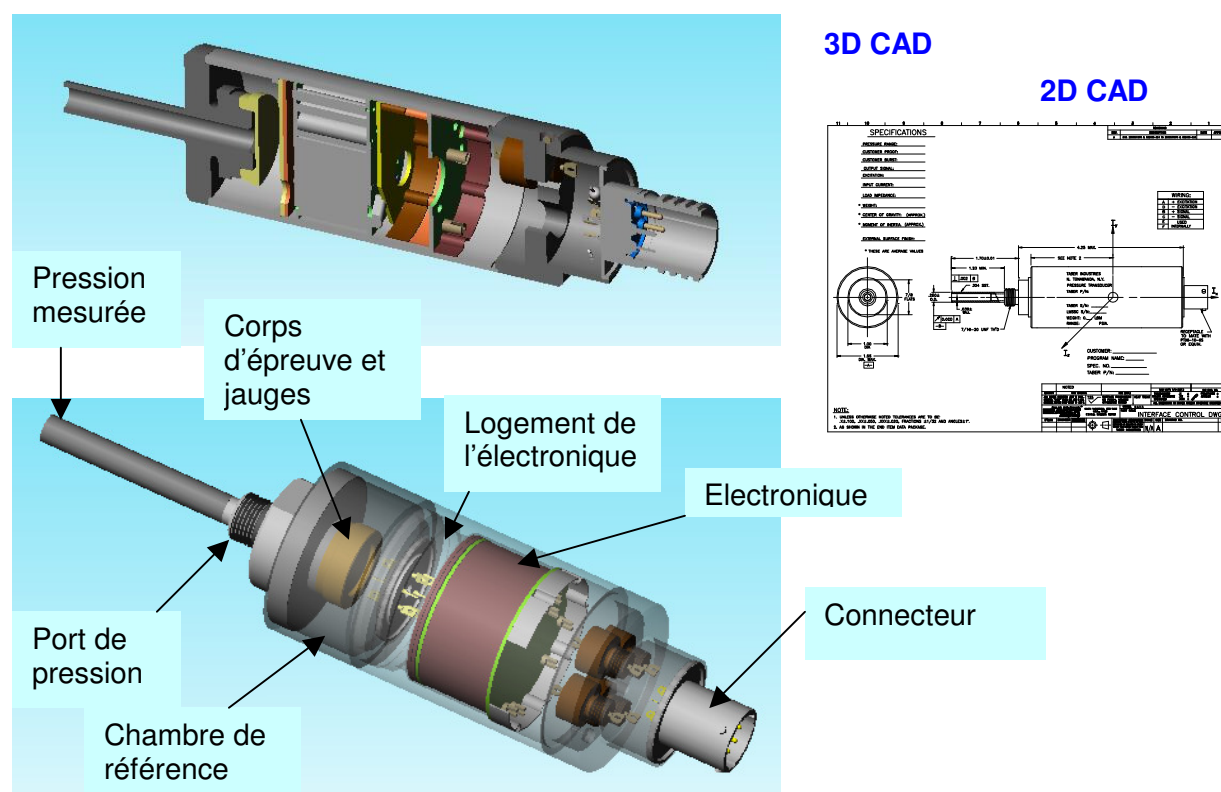
La réalité fait que des précisions sont énoncées sans que quiconque puisse les vérifier et que la différence entre un capteur de qualité et un capteur ' standard ' réside dans la compréhension de l'énoncé des erreurs.

S'il existe une incompréhension sur la précision, il existe des lacunes de même nature sur l'influences de phénomènes comme l'effet de l'accélération etc ...

Comment croire alors que les dérives à long terme soient minimales ?

Sans animosité aucune pour les fiches de caractéristiques, il convient de se poser des questions et, dès lors que des questions se posent à l'origine comment faire confiance à d'autres données énoncées ?

D - Approche de réalisation d'un capteur



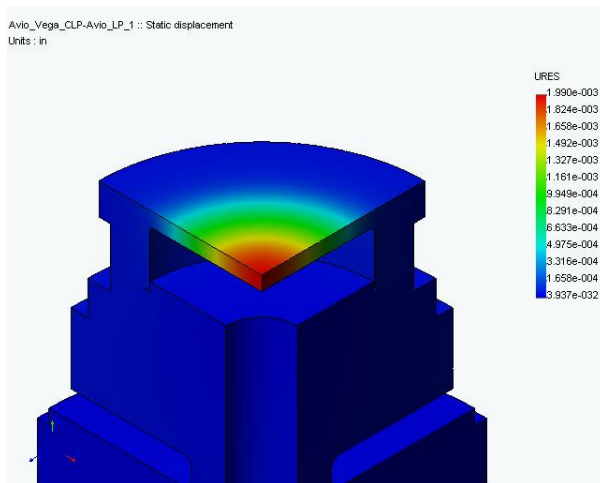
Capteur de pression à jauges de déformations à trames métalliques.

Les capteurs sont, dans un premier temps étudiés étage après étage et chaque partie doit être soigneusement considérée.

Calculs d'éléments finis (FEA) puis réalisation de plans en 3 D (2D CAD) et en 3 D (3D CAD).

Réalisation du prototype et évaluation de toutes les caractéristiques, vérification des calculs d'éléments finis etc ... Puis réalisation de pré-séries, vérification de la dispersion des erreurs d'un capteur à l'autre pour enfin obtenir le capteur définitif qui sera commercialisé.

Ci dessous le calcul d'éléments finis (**FEA**)

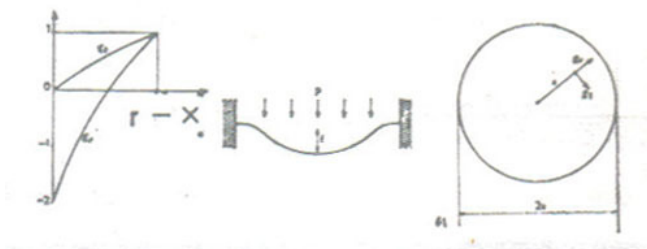


L'approche pour un capteur de pression est très voisine de celle utilisée pour un capteur d'effort ou un capteur accélérométrique.

Il convient, ensuite de faire certifier les capteurs pour des applications particulières comme les applications aérospatiales.

D – 1 A l'origine le corps d'épreuve et les jauges

Continuons sur la base des capteurs de pression sachant que ceci est parfaitement adaptable à d'autres types de capteurs. Le concept le plus simple utilise une membrane encastrée.



P = pression appliquée

E = épaisseur

r = rayon

X = distance au centre du point considéré

ϵ_r = déformation radiale en ce point

ϵ_t = déformation tangentielle au même point

f = flèche au centre

w = équation de la déformée

$$\epsilon_r = [3 P (1 - \mu^2) / 8 E e^2] (r^2 - 3 x^2)$$

$$\epsilon_t = [3 P (1 - \mu^2) / Pr^4] (r^2 - x^2)$$

$$f = [3 (1 - \mu^2) / 8 E e^2] (16 E e^3)$$

$$W = [3 P (1 - \mu^2) / 16 E e^3] (r^2 - x^2)^2$$

La fréquence propre est proportionnelle à $\sqrt{E / (1 - \mu^2) P}$

Il convient de se souvenir que le concept de la membrane encastrée n'est pas forcément le plus adapté à la réalisation d'un capteur et que ce qui suit ne donne que les grandes lignes de la conception d'un capteur. Les caractéristiques en terme de sensibilité, linéarité et fréquence de réponse dépendent majoritairement du diamètre et de l'épaisseur de la membrane. L'idée est de trouver le meilleur compromis pour réaliser un bon capteur.

Les bases mécaniques incontournables pour la conception sont :

- Uniformité de l'épaisseur de la membrane
- Faible déflexion
- Attache de la membrane sur ses bords extrêmement rigide
- Comportement parfaitement élastique
- Effets de masse et rigidité due à la présence de jauges négligeables

Sensibilité

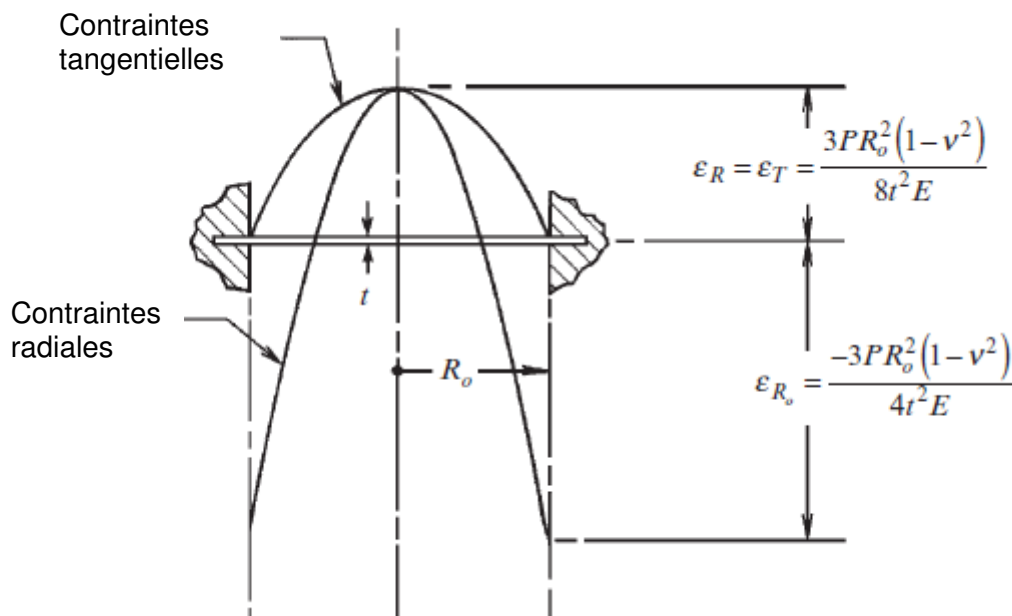
Les contraintes radiales et tangentielles au centre de la membrane sont identiques et répondent à l'équation suivante :

$$\varepsilon_{R_c} = \varepsilon_{T_c} = \frac{3PR_o^2(1-\nu^2)}{8t^2E}$$

où :

- P est la pression en Pascal
- R_o le rayon de la membrane en millimètres
- t l'épaisseur de la membrane en millimètres
- ν le coefficient de Poisson
- E le module d'élasticité en Pascal

La contrainte radiale diminue lorsque le rayon augmente, devient négative et au bord est égale à deux fois la contrainte centrale. La contrainte tangentielle tend vers zéro à la périphérie de la membrane.



Distribution des contraintes sur membrane encastrée

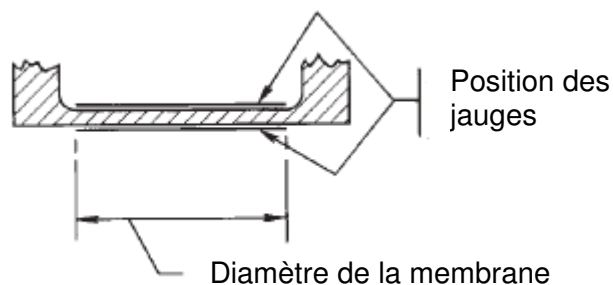
D'où :

$$\varepsilon_{R_0} = -\frac{3PR_0^2(1-\nu^2)}{4t^2E}$$

$$\varepsilon_{T_0} = 0$$

Ces calculs sont prolongés par d'autres en fonction du type de grille de jauges choisie : circulaire ou linéaire.

Cela étant pour améliorer la précision et diminuer l'hystérésis, la pratique usuelle consiste à réaliser la membrane comme partie intégrante du corps du capteur (illustration des calculs d'éléments finis).



Le concept du capteur ne se résume pas à des formules car les usinages possèdent des inconvénients qui induiront un décalage entre la configuration idéale et le résultat obtenu. La méthode empirique du développement expérimental reste la seule valide pour produire des instruments de grande qualité.

D – 2 Protections mécaniques

Les capteurs de mesure de pression peuvent être sujets à des sollicitations particulières comme des surpressions transitoires importantes.

Un anneau situé derrière la membrane ne sera pas pénalisant pour la mesure mais fera l'effet d'une butée mécanique permettant d'éviter des sollicitations sévères au droit de la membrane et du capteur.

Un autre type de butée mécanique, centrale celle-ci peut prévenir de la déformation irréversible de la membrane.

Si les coups de bélier sont particulièrement violents et brisent les membranes de manière récurrente, il existe enfin la possibilité d'utiliser des capteurs possédant une possibilité de remplacement de membrane sur site et sans ré-étalonnage.

Le concept des membranes instrumentées n'est alors pas forcément la bonne solution. Les raisons de cet état de fait sont multiples, outre le fait de devoir remplacer membrane et élément sensible à chaque fois, il est à craindre que les mesures impliquant ces détériorations répétées soient effectuées lors, par exemple, de tirs de propulseurs. Si tel est le cas, la température fluctue très rapidement et des jauges collées directement sur la membrane verront, par conductivité thermique, leur température varier considérablement.

Dans ce cas un corps d'épreuve intermédiaire sera disposé derrière la membrane et instrumenté de jauges.

La conséquence est de différer la conduction thermique vers le pont de jauges et de découpler membrane et pont de jauges.

Ci-dessous, le montage sous forme d'anneau dynamométrique.

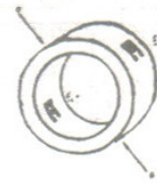
ANNEAU DYNAMOMÉTRIQUE

F	force appliquée
e	épaisseur (faible comparée au rayon)
a	largeur
R	rayon moyen
f	flèche totale (rapprochement sur le diamètre)
ϵ_e	indication jauge extérieure longitudinale
ϵ_i	indication jauge intérieure longitudinale

$$\epsilon_e = \frac{3FR}{Eae^2} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)$$

$$\epsilon_i = \frac{-3FR}{Eae^2} \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)$$

$$f = 1,79 \frac{FR^3}{Eae^3}$$



D – 3 Pour les capteurs d'effort et de vibration

Le principe est très similaire. Les capteurs d'efforts reposent sur des corps d'épreuves qui peuvent ressembler à des membranes encastrées mais sont des lames en flexion ou des étriers simples ou doubles en flexion, l'anneau dynamométrique est également utilisé mais on retrouve aussi des tores cylindriques en traction compression.

Pour les capteurs de vibrations les lames en flexion donnent les meilleurs résultats, elles sont déclinées au travers de membranes supportant une masse sismique pour limiter certains effets indésirables.

A noter que ce qui précède s'applique aussi, de manière un peu différente à d'autres types de capteurs à jauges de déformations comme, par exemple, les couplemètres.

E – Conclusions

Il existe un nombre conséquent de constructeurs de capteurs et presque chaque constructeur écrit ses caractéristiques en fonction de notions différentes. Ceci ne veut pas dire que des constructeurs trichent mais qu'ils maîtrisent mal le concept des caractéristiques.

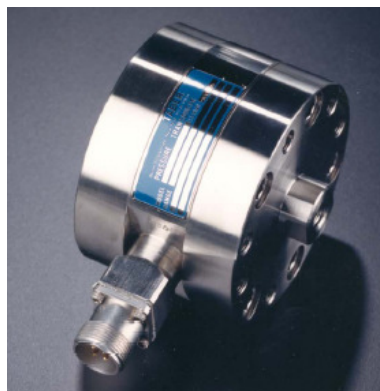
Ainsi, pour exemple, une capsule anéroïde, destinée aux mesures de pressions atmosphériques, est particulièrement fidèle mais n'offre aucune précision en terme de linéarité, hystérésis ou dérive thermique. Pourtant il est possible avec un élément sensible capacitif de ce type de réaliser un capteur particulièrement précis. En effet en soumettant cet élément sensible à des conditions de pression sous différentes températures, il sera possible de déterminer des algorithmes, de les intégrer à un ordinateur puis de fournir une sortie très précise, fonction de la température pour toutes les pressions barométriques usuelles dans des plages de températures comprises entre -55 et $+55$ °C. Ceci se fera au détriment de la bande passante et n'aura de valeur que pour la météorologie.

Du coup, un concepteur de capteurs à jauges de déformations peut être tenté d'afficher des précisions similaires en disant que son instrument, à la base plus linéaire et présentant moins d'hystérésis ou de dérives thermiques est, par définition plus précis. Mais même soumis aux cycles en pression / température la fidélité d'un modèle à jauges ne permettra pas d'atteindre les précisions du dispositif capacitif.

Le choix d'un capteur de pression, de force ou de vibration doit tenir compte des notions énoncées dans cet article et de la manière de prélever l'information.

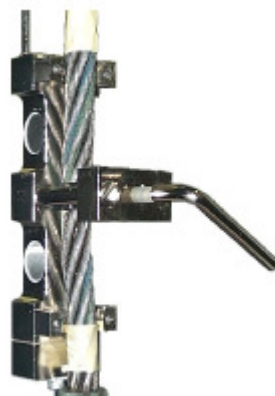
./

Des capteurs :



Ci-dessus, capteurs de pression.

Trois types différents : jauges trame métallique version spatiale, jauges trame métallique pour les plastiques avec membrane déportée et silicium dopé bas prix.



Ci-dessus, capteurs d'efforts.

Trois types différents : tous à pont de wheastone, modèle ' cartouche ' compression pour mesures de forces de compression, modèle à clamper sur élingue à vide (capteur de traction) et capteur en S.



Ci-dessus, accéléromètre à jauges.

Les différences ne résident pas dans l'enveloppe mais plutôt dans le corps d'épreuve et son support.

Autres informations : Jean Louis Rouvet - Giacintec