

HES-SO – HEIG-VD – EIVD
Division E+I

Acquisition de Données et Compatibilité ElectroMagnétique

Première partie : Modélisation de la mesure et Acquisition

UNGER Jacques
Professeur à l'école d'ingénieurs de l'état de Vaud

heig-vd

Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion
du Canton de Vaud

2005 – Eivd , Yverdon-les-Bains, 1, Rte de Cheseaux

Chapitre 1 - Chaîne de mesure	1
1.1 - Introduction	1
1.2 - Transducteurs : capteur et actionneur.....	3
1.3 - Résolution du problème de mesure	4
1.3.1 – Modèle mathématique – Non-linéarité ou non conformité	6
1.3.1.1 - Forme linéaire	6
1.3.1.2 - Forme polynomiale	7
<i>Exemple : capteur de débit à déprimogène.....</i>	7
<i>Exemple : Mesure de température par thermocouple.....</i>	7
1.3.1.3 – Loi physique du capteur	8
<i>Exemple : Mesure de température par thermistance</i>	8
1.3.1.4 - Erreurs de non conformité ou de non-linéarité	8
1.3.2 – Bruit interne	9
1.3.3 - Grandeurs d'influence	9
1.3.4 - Effet de charge.....	10
1.3.5 - Perturbations.....	11

Chapitre 1 - Chaîne de mesure

1.1 - Introduction

Dans l'instrumentation moderne, on constate pratiquement que chaque équipement ou appareil de mesure comprend un ou plusieurs microprocesseurs. Il convient donc, à l'intérieur du système de mesure de convertir le signal analogique représentant la grandeur que l'on veut mesurer en une valeur numérique que l'on pourra traiter dans le processeur. Les signaux de sortie d'un capteur sont généralement petits, il est donc nécessaire de les amplifier. D'autre part le capteur doit être placé à un endroit bien précis du processus, à une distance appréciable de l'équipement de mesure (de l'ordre du mètre - p.e. oscilloscope, à plusieurs centaines de mètres - pour de grands systèmes). Il faut donc transmettre l'information entre le capteur et le système de mesure proprement dit. L'information concernant la grandeur à mesurer va ainsi traverser une série d'éléments et d'appareils avant d'obtenir le résultat. Cette succession d'appareils ou éléments est appelée une chaîne de mesure.

Définition

<u>Chaîne de mesure</u>	succession d'appareils et d'éléments assurant la transmission et la transformation de l'information entre le capteur et le résultat de mesure.
<u>Mesurande</u> X (measurand) :	grandeur d'entrée que l'on désire mesurer

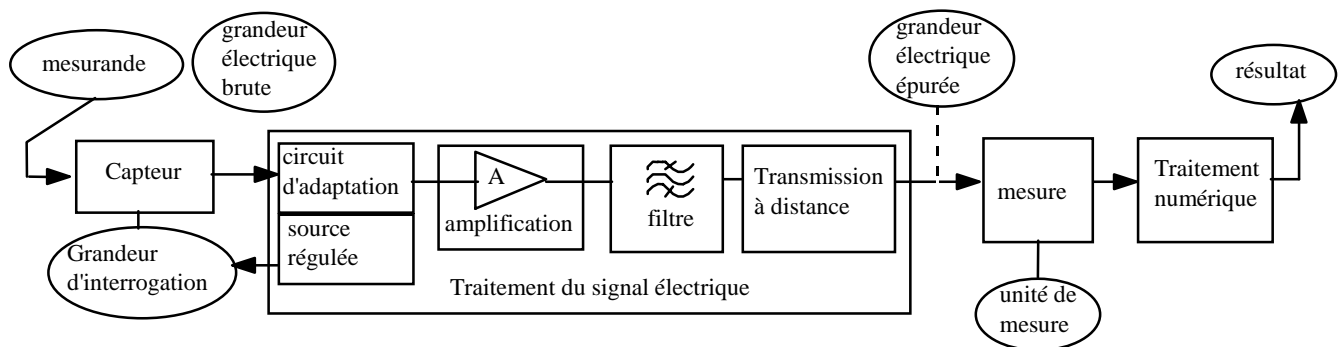


Figure 1.1 - Éléments d'une chaîne de mesure

Comme on peut le voir sur la figure, une chaîne de mesure comprend toujours au moins trois éléments : le capteur, un circuit de traitement du signal électrique et un élément de mesure.

-
- *Le capteur* convertit le mesurande en une grandeur électrique brute (caractéristique non linéaire, bruit et perturbations ajoutés à l'information)
 - *Le traitement du signal électrique*, constitué d'un ou plusieurs appareils, utilise l'information contenue dans la grandeur électrique brute pour obtenir une grandeur électrique épurée que l'on pourra amplifier et transmettre sur une distance suffisante. Par exemple si la grandeur électrique brute est une résistance, le conditionneur devra injecter un courant dans la résistance pour obtenir une tension proportionnelle, et probablement soustraire de cette tension la valeur équivalente au zéro du mesurande. Dans la plupart des cas le conditionneur et l'amplificateur de transmission sont incorporés dans le même boîtier, désigné comme transmetteur. Ce dernier peut même être monté à l'intérieur de la structure du capteur proprement dit, l'utilisateur ne pouvant alors choisir qu'une ou deux options de grandeur électrique de transmission. A l'autre extrémité du canal de transmission on trouve un récepteur capable de décoder le signal transmis avant de l'appliquer au circuit de mesure.
 - *La mesure* proprement dite consiste à comparer le signal épuré avec l'équivalent de l'unité de mesure, pour obtenir une valeur numérique de représentation du mesurande (un convertisseur A/D comprend toujours une tension de référence interne représentant l'unité de mesure; dans un appareil analogique l'unité de mesure est matérialisée: ce sont les marques sur l'écran d'affichage de l'appareil)
 - *Un traitement numérique* de la mesure peut encore être ajouté à la chaîne pour améliorer l'élimination du bruit, linéariser le résultat ou combiner les valeurs de plusieurs mesurandes en un résultat de mesure indirecte (par exemple déduire une énergie de la mesure d'un débit et d'une différence de température). Une transmission à distance peut également intervenir à ce niveau, vers un régulateur, un ordinateur central ou une salle de commande.

Certains éléments de la chaîne de mesure peuvent être partagés entre plusieurs mesurandes (économie de place, coût de l'installation) mais la conception et l'analyse du système de mesure peut toujours être décomposé en chaînes de mesure affectées momentanément à chaque mesurande.

1.2 - Transducteurs : capteur et actionneur

Définitions

Transducteur (*transducer*) : Tout élément assurant la liaison entre le monde physique (processus à contrôler, expérience, appareil à vérifier) et l'instrumentation proprement dite. Il convertit la grandeur physique en une grandeur mesurable, ou à l'inverse, il convertit une grandeur générée par le système de mesure en une grandeur physique permettant d'agir sur le processus.

Capteur (*sensor*) : Élément transducteur destiné à la mesure proprement dite : Conversion d'une grandeur physique du processus en une grandeur (généralement électrique) d'entrée du système de mesure. Par exemple un thermocouple est un capteur de température, dont la sortie est une tension électrique dépendant de la température.

Actionneur (*actuator*) : Élément transducteur destiné à l'action sur le processus : Conversion d'une grandeur de sortie du système de mesure en une grandeur physique agissant sur le processus. Par exemple une pompe est un actionneur.

Le capteur est construit pour exploiter une propriété de la matière, décrite par une **loi physique**, permettant de connaître la correspondance entre la grandeur électrique à la sortie du capteur et la grandeur physique à mesurer. Par exemple, pour mesurer une pression, on peut utiliser la résistance d'un fil et exploiter la loi de la piézorésistivité exprimant la variation de la résistance en fonction de la déformation du fil imposée par la pression. Ainsi à chaque valeur de la résistance correspond une valeur particulière de la pression et la loi physique nous permet de calculer la pression à partir de la mesure de la résistance du capteur.

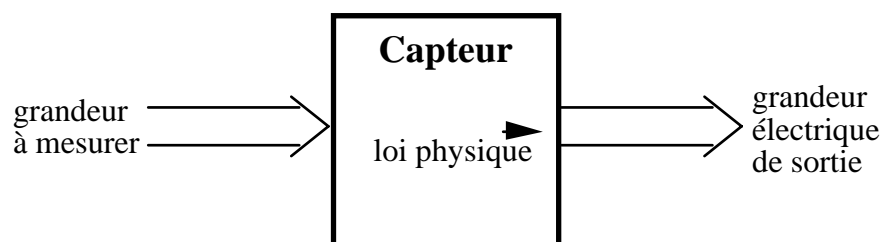


Figure 1.2 - Capteur idéal

Cependant le capteur est un élément réel, la conduction électrique interne conduit à l'apparition de petites variations aléatoires, le bruit interne qui va s'ajouter à l'information désirée. De plus la présence du capteur modifie quelque peu le comportement de l'objet que l'on mesure, modifiant ainsi légèrement les valeurs obtenues. Soumis à l'environnement, d'autres lois physiques modifient la réponse souhaitée du capteur et des perturbations externes (compatibilité électromagnétique) ajoutent d'autres erreurs au signal obtenu à la sortie de la chaîne.

Il faut donc bien admettre que cette sortie n'est qu'une approximation de la réponse idéale. Le problème de la mesure est donc de trouver, à partir de la sortie de la chaîne une estimation aussi exacte que possible du mesurande.

1.3 - Résolution du problème de mesure

Dans le processeur du système ou de l'appareil de mesure, on ne dispose que de la sortie numérique Y de la chaîne de mesure. Le problème est donc d'estimer la valeur du mesurande, à partir de la sortie Y , et de la connaissance de la caractéristique de la chaîne. Sachant que Y dépend non seulement de X , mais aussi des tolérances de fabrication, du bruit interne dans les éléments de la chaîne, des perturbations ajoutées par l'environnement, ainsi que de l'effet produit par la présence du capteur sur l'objet mesuré, une solution exacte est impossible.

Il convient donc d'établir un modèle mathématique de la chaîne de mesure, valable dans un certain domaine des conditions d'utilisation, et représentant une approximation de la réponse réelle:

$$Y = \mathcal{F}(X) \quad (1.1)$$

L'opération mathématique inverse, ne nous donnera qu'une estimation de la valeur du mesurande:

$$X_m = \mathcal{F}^{-1}(Y) \quad (1.2)$$

Définitions :

<u>Vraie valeur</u> (X) :	Valeur du mesurande, qu'on ne connaîtra jamais exactement.
<u>Valeur mesurée</u> (X_m) :	Valeur indiquée par l'appareil de mesure, soit une estimation de X.

Le fabricant d'un instrument de mesure ne peut spécifier l'incertitude de son appareil que pour un domaine bien défini des grandeurs d'influence, et en l'absence de perturbations externes.

Une fois qu'on a obtenu une estimation X_m du mesurande, il reste à déterminer quelle confiance on peut accorder à ce résultat. C'est là tout le problème de l'analyse des mesures.

Définition

<u>Validité des mesures</u> :	Degré de confiance que l'on peut accorder au résultat chiffré de la mesure.
--------------------------------------	---

En d'autres termes il s'agit de déterminer si l'on mesure vraiment ce que l'on désire, et d'analyser les causes d'erreurs qui peuvent influencer le résultat. Quelque soit l'équipement utilisé, la méthode d'analyse permettant de répondre à ces questions restera la même, alors que le choix proprement dit de la méthode et des appareils exige une connaissance plus détaillée des principes de mesure de la grandeur concernée.

A titre d'exemple, prenons un capteur de température dans une buse d'injection de PVC (fabrication de pièces injectées), réalisé au moyen d'un thermocouple. Si le montage est parfait, la température indiquée est celle du thermocouple, reste à savoir s'il s'agit bien de la température que l'on désire mesurer : pour éviter l'usure, il faut monter le capteur dans la paroi de la buse d'injection. Quelle est l'influence des échanges thermiques entre la masse à injecter, les parois de la buse et le thermocouple ? De plus le signal électrique fourni par le capteur est de l'ordre de quelques millivolts, et dépend de la température ambiante. L'appareillage tient-il correctement compte de la température ambiante ? Les moteurs utilisés dans l'équipement d'injection ne rayonnent-ils pas suffisamment de champ électrique et magnétique pour induire une tension parasite s'ajoutant au signal du thermocouple ? La validité des mesures dépendra des réponses à toutes ces questions.

L'exemple ci-dessus nous montre qu'en plus de l'incertitude de l'instrumentation l'analyse de la validité des mesures doit tenir compte des interactions du système de mesure avec l'objet que l'on veut mesurer ainsi qu'avec tout son environnement.

L'analyse de la validité des mesures consiste à vérifier l'ordre de grandeur des différentes causes d'erreur:

- modèle mathématique (non-conformité, ou non-linéarité)
- effet des grandeurs d'influence (modification du comportement de la chaîne)
- bruit interne (limite de détection)
- perturbations provoquées par l'environnement externe (compatibilité électromagnétique)
- effet de charge (échange d'énergie entre l'objet mesuré et la chaîne de mesure)

1.3.1 – Modèle mathématique – Non-linéarité ou non conformité

Du fait des fluctuations possibles de la fonction $\mathcal{F}(X)$, les fabricants se contentent de spécifier une approximation mathématique aussi simple que possible à résoudre. Cette approximation ne sera bien sûr pas valable quelque soit la valeur du mesurande, mais elle se limite à un intervalle bien précis, appelé étendue de mesure.

Définition

<u>Etendue de mesure:</u>	Domaine des valeurs du mesurande dans lequel le modèle mathématique est valable. <i>En d'autres termes c'est le domaine du mesurande pour lequel le fabricant peut garantir l'incertitude de mesure.</i>
----------------------------------	--

1.3.1.1 - Forme linéaire

C'est la forme mathématique que l'on retrouve dans la grande majorité des cas, en effet quelque soit la forme de la réponse, pour une étendue de mesure suffisamment faible il devient possible de remplacer la courbe par une droite. Nous l'écrivons:

$$Y = G \cdot X + Of$$

Même sur un simple amplificateur, l'étendue de mesure est limitée: lorsque la sortie s'approche des tensions d'alimentation, un phénomène de saturation intervient et l'équation ci-dessus n'est plus valable. On conçoit aisément que les paramètres de cette équation ne sont que des approximations de la réalité: le facteur de multiplication G dépend des valeurs de 2 résistances qui ont des tolérances de construction et qui dépendent de la température, de même le terme constant Of n'est généralement qu'un défaut du circuit (offset du circuit intégré) également dépendant de la construction et de la température.

1.3.1.2 - Forme polynomiale

Lorsque l'étendue de mesure désirée ne permet plus une approximation linéaire, on utilise souvent un polynôme de degré n :

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + \dots + a_n \cdot X^n$$

La forme générale de la réponse est donnée par les $n+1$ coefficients a_0 à a_n . Ceux-ci sont en général imposés par le type de capteur plutôt que par la chaîne de mesure, mais il faut rester conscient, que dans la chaîne au moins un ampli permet d'ajuster tant le décalage (a_0), que le gain (facteur de multiplication des termes a_1 à a_n).

La résolution du problème de mesure implique l'inversion de la fonction, ce qui revient à utiliser un autre polynôme de degré n exprimant X en fonction de Y ; c'est souvent ce polynôme qui est recherché par régression mathématique :

$$X_m = c_0 + c_1 \cdot Y + c_2 \cdot Y^2 + \dots + c_n \cdot Y^n$$

Exemple : capteur de débit à déprimogène

En plaçant un obstacle dans le débit à mesurer (diaphragme, tube Venturi, tube Pitot ou autre forme), on provoque une différence de pression proportionnelle au carré de la vitesse du fluide à mesurer (loi de Bernoulli). Dans un tube le débit est proportionnel à la vitesse du fluide. Si l'on mesure cette différence de pression on obtient un signal décrit par une équation de 2e degré dans laquelle les coefficients a_0 et a_1 sont nuls. La pratique nous montre cependant que a_2 ne peut être considéré comme constant que pour une étendue de mesure assez limitée: débits variant dans un rapport 1 à 3 seulement, car d'autres lois interviennent (détente adiabatique, frottements, ...)

Exemple : Mesure de température par thermocouple

*Un thermocouple est la combinaison de 2 conducteurs de matériaux différents a et b . La **jonction chaude** (ou soudure chaude, dont on veut mesurer la température) est le point de contact entre a et b . Les **jonctions froides** (ou soudures froides) sont les liaisons de a et b avec le circuit de mesure (fils de cuivre). Elles sont à la température ambiante.*

*La tension qu'il produit, fonction uniquement des températures de la jonction chaude et de la jonction froide, est de l'ordre de 5 à 50 $\mu V/^\circ C$ selon le type de matériaux. Les fabricants fournissent des tables indiquant degré par degré la tension produite lorsque la jonction froide est à $0^\circ C$. Il est donc indispensable de prévoir une **compensation de la jonction froide**. La théorie de la thermoélectricité nous indique que la tension indiquée dans les tables est égale à la somme de la tension produite U_{TC} lorsque les jonctions froides sont à une température différente de zéro et de la tension indiquée dans les tables des fabricants à la température des jonctions froides $U_{table}(T_{fr})$:*

$$U_{table}(T_{ch}) = U_{TC} + U_{table}(T_{fr})$$

Le circuit de mesure doit donc non seulement mesurer U_{TC} , mais également la température des jonctions froides T_{jf} (au moyen d'un 2e capteur). La résolution du problème de mesure consiste d'une part à retrouver $U_{table(T_{jf})}$ pour permettre le calcul de $U_{table(T_{ch})}$, puis à calculer T_{ch} à partir de $U_{table(T_{ch})}$.

Pour de grands domaines de températures, cette dernière opération exige un polynôme du 9e degré, alors que pour la compensation de jonction froide le domaine 0 à 50 °C est suffisant et peut être approché par un polynôme du 2e degré seulement.

1.3.1.3 – Loi physique du capteur

Enfin, beaucoup plus rarement, l'équation mathématique découle directement de la loi physique exploitée dans le capteur, au besoin corrigée et complétée par des termes de type expérimental.

Exemple : Mesure de température par thermistance

Une thermistance est une résistance en semiconducteur. La variation de résistance en fonction de la température se déduit des caractéristiques physiques des semiconducteurs :

$$R = R_{25} e^{b \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right]}$$

Avec T en Kelvin, R_{25} la résistance à 25 °C, soit à 298 K., et b un coefficient (en Kelvin) caractéristique du semiconducteur. En inversant la fonction on trouve

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{298} + \frac{\ln\left(\frac{R(T)}{R_{25}}\right)}{b} = A + B \cdot \ln(R)$$

L'expérience montre que le coefficient b ne peut être considéré comme constant que dans un faible domaine de température (15 à 25 °C), par conséquent, suite aux travaux expérimentaux de Steinhart-Hart, l'équation ci-dessus a été complétée (à la manière polynomiale):

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \ln^3(R)$$

Cette expression est alors valable dans un domaine de 100 à 150°C avec une incertitude de l'ordre de 0.01 °C.

1.3.1.4 - Erreurs de non conformité ou de non-linéarité

A l'intérieur du domaine de mesure, le modèle mathématique ne fait que s'approcher et lisser la réponse réelle. Ceci conduit à des erreurs que l'on appelle erreurs de non-conformité de manière générale, ou de non-linéarité, dans le cas d'un modèle mathématique linéaire. Ces notions seront détaillées au chapitre 3.

1.3.2 – Bruit interne

La conduction électrique se faisant par déplacement de charges électriques élémentaires, le signal de sortie ne peut être rigoureusement constant même si les conditions d'utilisation ne changent pas. On constate l'addition d'un petit signal aléatoire à l'information souhaitée : c'est le bruit interne d'agitation thermique dans les résistances, ou le bruit de grenaille typique dans les jonctions de semi-conducteur. Si ces bruits sont généralement totalement négligeables, ils représentent cependant la limite absolue de détection du circuit : Pour pouvoir distinguer une variation du signal, il faut que celle-ci soit nettement plus grande que le bruit interne du système.

1.3.3 - Grandeurs d'influence

Le capteur étant un élément réel, le comportement de la grandeur de sortie ne peut être décrit par une seule et unique loi physique: Tout irait bien si, dans l'exemple du capteur de pression, la déformation du fil n'était due qu'à la pression; en fait des vibrations, ou une modification de la température peuvent également provoquer une légère déformation du fil, donc une variation non désirée de la résistance; plus grave encore, la température provoque directement une variation de la résistance, indépendante de la déformation et décrite par une autre loi physique.

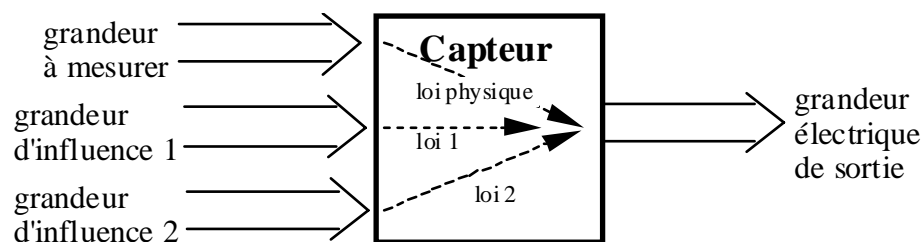


Figure 1.3 - Capteur réel

Il faut donc bien admettre qu'un capteur n'est jamais idéal, et qu'il doit être représenté par une combinaison de lois physiques, reliant la grandeur de sortie à différentes grandeurs d'entrées. L'une d'entre elles est la grandeur que l'on désire mesurer, appelée **le mesurande**, les autres sont des **grandeurs d'influence** car elles modifient la sortie et nous font croire à une variation de la grandeur désirée: le résultat de mesure est influencé par ces grandeurs.

Définition

Grandeurs d'influence Z_i :	toutes les grandeurs d'entrée non désirées du système, dont l'effet sera de modifier la grandeur de sortie.
---	---

Les grandeurs d'influence les plus courantes sont:

- *La température* - elle modifie les valeurs des composants électriques (dimensions, résistivité, tension de seuil dans les composants à semi-conducteur ...)
- *les tensions d'alimentation* - elles modifient la polarisation des éléments, donc leur caractéristique, et indirectement leur température
- *Le temps* - Les éléments vieillissent et se modifient avec le temps, d'où une dérive lente des caractéristiques
- *L'humidité relative* - modifie la constante diélectrique des isolants, provoque des courants de fuite

La spécification d'incertitude, donnée par le fabricant, tient compte du bruit interne ainsi que des grandeurs d'influences, dans un domaine particulier (qu'il se doit d'indiquer dans les spécifications, par exemple $23\pm 5^{\circ}\text{C}$, 1 an, alimentation $220\text{V}\pm 10\%$). Le rôle de l'utilisateur est donc d'abord de vérifier que les grandeurs d'influence sont bien à l'intérieur du domaine prévu par le constructeur, au moment où l'on effectue les mesures. Ensuite seulement, il pourra utiliser l'incertitude comme critère de validité.

Lorsque les grandeurs d'influence sortent des domaines d'utilisation prévus, il convient de tenir compte des coefficients d'influence, ou de calibrer l'instrumentation.

1.3.4 - Effet de charge

L'interaction entre l'objet à mesurer et le système de mesure exige un transfert d'énergie, si petit soit-il. La présence du capteur, et du système de mesure va donc un tant soit peu modifier l'état du processus que l'on cherche à observer. Il devient donc impossible de connaître l'état qu'aurait le processus en l'absence du système de mesure, mais en choisissant correctement le capteur et le système, on peut minimiser ces effets, et s'approcher de la "vraie" valeur qu'aurait le processus "à vide".

Le transfert d'énergie, n'est pas la seule cause d'effet de charge: pour pouvoir insérer le capteur à l'endroit de la mesure, il faut généralement modifier la structure de l'objet, donc en modifier le comportement. La difficulté est alors de choisir un capteur et un lieu de mesure permettant d'éviter trop de modifications du comportement du processus, tout en maintenant la possibilité d'obtenir des mesures significatives.

Définition

Effet de charge (*loading effect*) : modification de l'état du processus et du système de mesure dû aux sorties non désirées du transducteur (*échange d'énergie*) ou au *changement de structure* du processus imposé par la présence du transducteur.

Exemples

A) Un Vmètre a toujours une résistance interne R_v . La mesure d'une batterie de résistance interne R_i , s'accompagne du passage d'un courant $I = U_b / (R_i + R_v)$. La puissance transférée au Vmètre est donc $P = U_v \cdot I$. L'effet de charge se traduit par le fait que le Vmètre ne mesure pas exactement U_b , mais $U_v = U_b \cdot \frac{R_v}{R_v + R_i}$

B) Pour mesurer la résistance d'une jauge de contrainte, il faut faire passer un courant dans le fil. Ce courant provoque un échauffement du capteur, qui se transmet au support et conduit à une modification de la grandeur d'influence (la température), donc de la grandeur de sortie. Il y a effet de charge par échange d'énergie. De plus, le fait de coller la jauge sur son support modifie la constante d'élasticité locale. Pour une même contrainte, la déformation sera légèrement différente: c'est un 2e effet de charge dû à une modification de structure du processus.

C) Pour mesurer la vitesse des gaz à la sortie d'une tuyère, il faut placer une sonde, dans le flux de gaz. Aussi petite que soit la sonde, elle va modifier les lignes de flux. Il y a effet de charge par modification structurelle.

L'effet de charge se traduit par une erreur systématique (= elle se produit toujours dans le même sens: addition d'une petite constante ou multiplication de la valeur mesurée par un facteur proche de l'unité). C'est donc à la conception du système, que l'utilisateur doit analyser cet effet, et sélectionner une instrumentation adaptée à l'objet mesuré. Du fait que l'erreur est systématique, il est possible de corriger cette erreur, dans les rares cas où elle n'est pas négligeable; mais ceci suppose une analyse détaillée de l'objet mesuré, et au besoin des mesures préalables complémentaires permettant d'identifier "l'impédance" interne de l'objet mesuré.

1.3.5 - Perturbations

Le fait que les équipements de mesure et de contrôle sont placés dans un environnement naturel, les soumet à des perturbations : rayonnements cosmiques, éclairs dans un orage, de plus l'activité humaine est également source de perturbations : émission radio et TV, communications haute fréquence, champs électromagnétiques des lignes de distribution d'énergie, des moteurs et générateurs, étincelles d'allumage des moteurs à combustion etc. Dans un appareillage électrique, ces perturbations sont couplées par les champs électromagnétiques dans les circuits, ce qui se traduit par une tension ou un courant perturbateur s'ajoutant au signal sur la grandeur de sortie.

L'appareillage doit répondre à des normes de compatibilité électrique, assurant qu'il n'est pas perturbé par des champs externes, et qu'il n'émet pas trop de perturbations. Par contre le câblage entre appareils peut fort bien fonctionner comme antenne, et permettre l'introduction des perturbations dans le système de mesure.

Le chapitre 4 présente quelques méthodes pour se protéger contre de telles perturbations, essentiellement par le choix du câblage, des types d'amplificateurs, et des méthodes de transmission du signal.

Lors de l'analyse de validité, il convient de détecter la présence et l'ordre de grandeur des perturbations. Ceci implique une analyse du signal de sortie, soit sous la forme temporelle mais le plus souvent dans le domaine fréquentiel (détection d'une composante alternative non liée au mesurande).