

TIPE partie D

## **ORGANIGRAMME D'UNE CHAINE D'INSTRUMENTATION**

Temps de préparation : 2h15

Temps de présentation devant le jury : 10 minutes

Entretien avec le jury : 10 minutes

### **GUIDE POUR LE CANDIDAT :**

Le dossier ci-joint comporte :

Document principal d'après un article de Michel Hubin

Document annexe sur les jauges de contraintes

Total : 12 pages.

### Travail suggéré au candidat Soit :

- Faire une présentation de la structure d'une chaîne d'instrumentation
- Vous insisterez sur un ou deux points particuliers
  - Structure de la régulation de pression et son objectif
  - Précision de capteur de pression
  - Influence de la température
  - Ou tout autre point de votre choix

### **CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :**

-Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable

-Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury

## ORGANIGRAMME D'UNE CHAÎNE D'INSTRUMENTATION

---

### Introduction

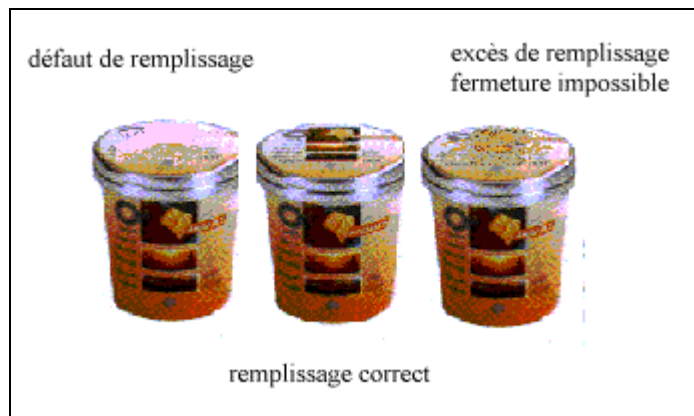
Dans ce chapitre, nous allons décrire les **maillons essentiels** rencontrés dans une chaîne de mesure en justifiant leur rôle dans l'ensemble. Ensuite chacun de ces maillons fera l'objet d'un ou plusieurs chapitres ultérieurs de l'ouvrage. Pour illustrer notre propos, nous allons prendre un exemple dans le monde industriel, et tout particulièrement dans le domaine agroalimentaire. Il s'agit d'**une unité de remplissage de pots de yaourt** dont les spécificités nous permettront de mettre en évidence un grand nombre de problèmes techniques et de contraintes totalement ignorées du consommateur mais très importantes pour le concepteur de la machine et pour la partie qui nous intéresse ici à savoir la chaîne instrumentale. Cet exemple nous permettra aussi d'insister sur les conséquences économiques parfois étonnantes d'une conception insuffisamment réfléchie.

---

### Les contraintes techniques et économiques

Nous ne considérerons dans cet exemple que le seul aspect remplissage. Il est bien évident qu'il y a d'autres problèmes techniques et économiques dans l'industrie du yaourt. Rappelons que dans un pot de yaourt, il doit y avoir une certaine quantité de produit et qu'en conséquence le problème du remplissage est le suivant:

- mettre dans chaque pot une quantité **identique** de produit,
- et faire en sorte que cette quantité soit la plus proche possible de celle imprimée sur le pot.
- En effet, si un pot est trop rempli l'industriel perd de l'argent.
- s'il n'est pas assez rempli le consommateur et surtout les services administratifs compétents de la répression des fraudes vont protester et l'industriel perdra beaucoup d'argent en procès et amendes.



La difficulté est qu'il est exclu de peser chaque pot **individuellement** car aucun système de pesage ne peut répondre assez vite. En effet la chaîne de remplissage qui nous sert de référence dans ce problème, sise en Haute-Normandie, possède une capacité de remplissage de 120000 pots/heure ce qui représente un peu plus de 33 pots par seconde. En pratique avec une ligne de remplissage de 12 pots en parallèle celui-ci s'opère donc en moins de 300ms. Dans ce temps il faut évidemment intégrer le temps de transfert du pot sous la buse de remplissage. On va donc devoir procéder à une mesure simultanément indirecte et globale.

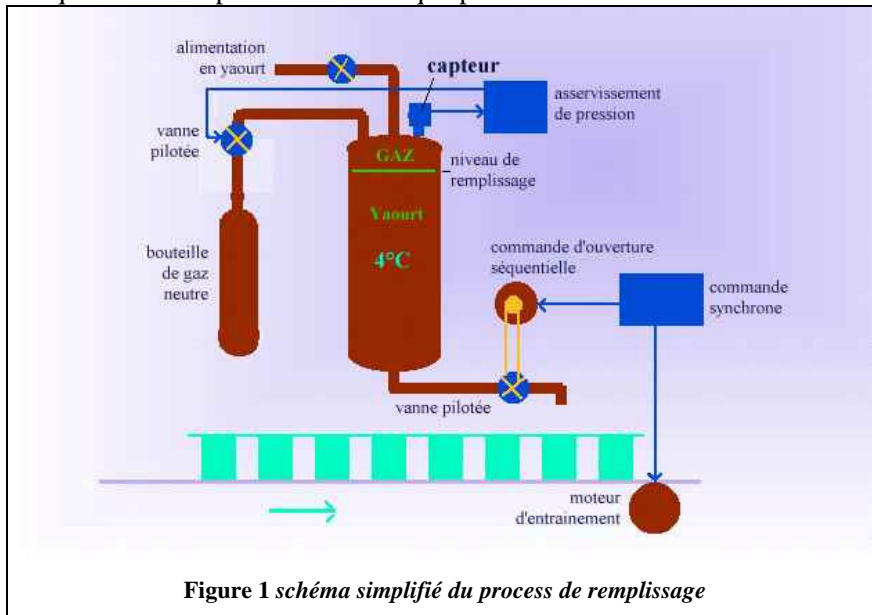
---

### Analyse du process

On va donc mettre en oeuvre un processus séquentiel schématisé sur la figure simplifiée ci-dessous:

- le débit de yaourt est maintenu constant dans les canalisations d'alimentation

- et chaque rangée de pots est présente pendant un temps prédéterminé sous l'orifice de remplissage, ainsi la quantité de yaourt dans chaque pot sera identique. En fait c'est la buse de remplissage qui est ouverte pendant un temps calibré et à débit constant cela garantit une quantité équivalente de produit dans chaque pot.



Le produit "yaourt" n'est pas exactement un liquide mais n'est pas non plus un vrai solide puisqu'il s'écoule lentement par gravité. Ce processus naturel est évidemment beaucoup trop lent pour assurer le taux de remplissage précité. Il convient donc d'accélérer ce processus. En outre il faut noter que l'écoulement par gravité va nécessairement évoluer dans le temps dans le sens d'un ralentissement au fur et à mesure de la baisse de niveau de produit dans le récipient de stockage schématiquement figuré ci-dessus.

Pour assurer un débit constant, il suffit d'exercer dans la cuve de stockage une **pression constante**, suffisamment importante pour que l'effet inconstant de la gravité soit minimisé, c'est à dire maintenu inférieur à la précision requise. Ainsi le problème de remplissage devient un problème de maintien d'une pression constante. Il convient donc de mesurer cette pression, et c'est cette chaîne instrumentale de contrôle qui va illustrer notre propos. Notons que pour des raisons de clarté de la figure nous avons figuré le capteur en position verticale au dessus du récipient de stockage, en fait dans l'unité de référence ce capteur se situe sur la canalisation de gaz en position horizontale ce qui ne change rien sur le principe mais a des conséquences pratiques et économiques insoupçonnées ainsi que nous le verrons plus loin.

## La chaîne d'instrumentation

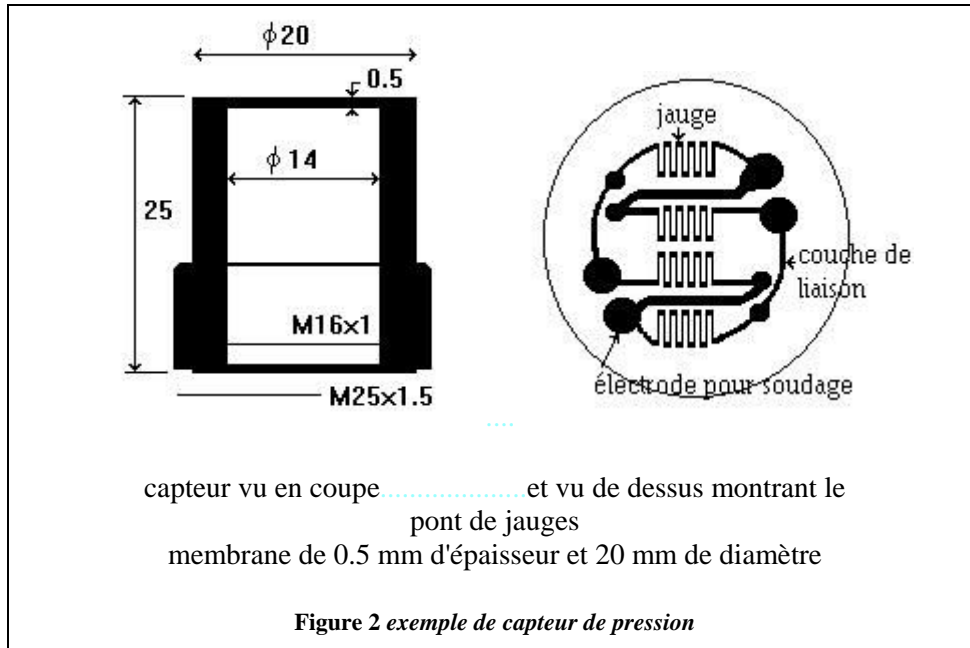
Dans tous les cas on est en présence d'un **phénomène physique en évolution**

- ici la cuve de stockage qui se vide progressivement
- phénomène dont on peut extraire plusieurs paramètres,
- dont la grandeur *fondamentale* qui nous intéresse (ici la pression),
- mais aussi généralement d'autres éléments, qui ont souvent une importance
- et viennent perturber le système (la température jouera ici un tel rôle).

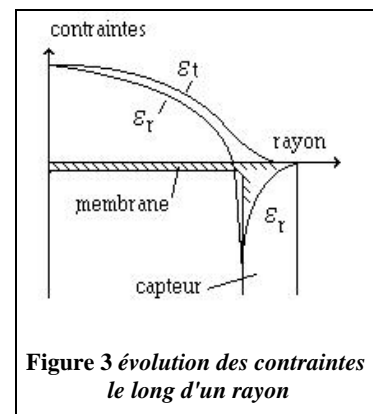
Cette grandeur physique est appréhendée par l'intermédiaire d'un **capteur de mesure physique** dans lequel on peut distinguer deux éléments fondamentaux:

- un élément mécanique, appelé **corps d'épreuve**, comportant une membrane circulaire en acier spécial qui va subir une déformation du fait de la pression

- auquel est associé solidairement un **transducteur**, ici un pont de **jauges de contrainte collé sur la membrane**, qui est chargé de générer un **signal** électrique lié, selon une relation supposée connue, à cette déformation.



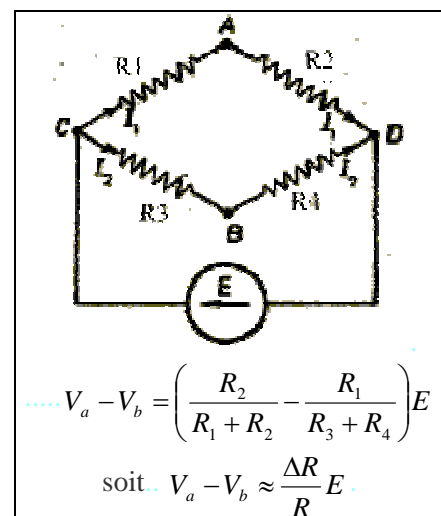
Précisons qu'une jauge de contrainte est une micro résistance électrique plane qui (dans le cas présent) collée sur la membrane va, en principe, subir les mêmes déformations qu'elle et voir sa résistance varier. Nous précisons ci-dessous l'évolution des contraintes sur un rayon du capteur : on voit que les contraintes tangentielles sont toujours positives, tandis que les contraintes radiales varient fortement à la périphérie du capteur passant de valeurs positives à fortement négatives sur une faible distance.



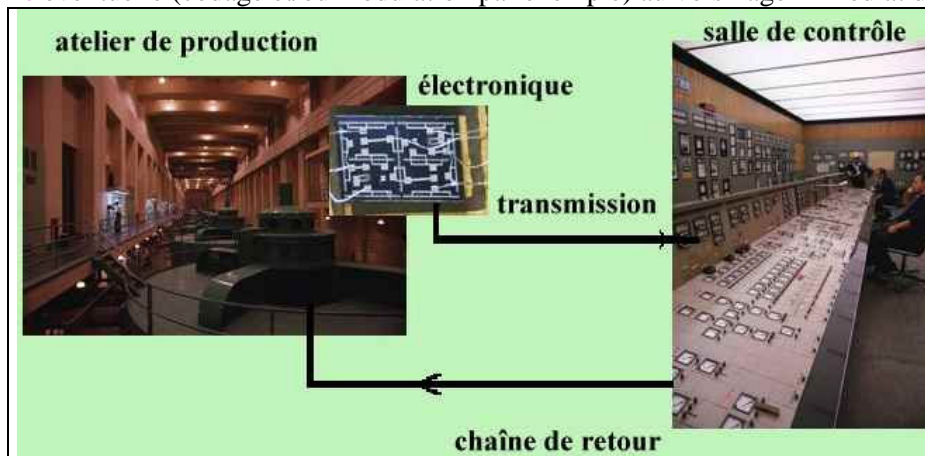
Le montage en pont, figuré ci-dessus et ci-dessous, permet d'une part, d'obtenir l'amplitude maximale du signal recueilli grâce au placement **judicieux** des jauges sur la membrane circulaire, et d'autre part, de réduire l'influence perturbatrice de la température. En l'absence de pression les 4 résistances ont la même valeur. En présence d'une pression, et par raison de symétrie de positionnement, les résistances R1 et R4 subissent du fait de la dilatation liée à la pression des variations  $+\Delta R$  équivalentes, tandis que compte tenu de leur positionnement respectifs sur la membrane R3 et R2 subissent une contraction et donc des variations de signe opposé  $-\Delta R$

Typiquement le pont de jauges est alimenté sous une tension de 10 volts (**continu**) et le signal recueilli entre les bornes A et B n'est que de quelques **millivolts (typiquement 2.2mV/V/Bars)**. La constance du remplissage d'un pot de yaourt à 1% près, implique donc celle de la pression et il en résulte que **la mesure devra avoir une précision** supérieure, donc être connue à quelques **microvolts** près.

Généralement, dans une entreprise importante, la salle de contrôle où sont centralisées toutes les mesures provenant des diverses unités de production se situe en dehors de celles-ci et parfois même assez loin. Il va donc falloir **transporter l'information** fournie par le capteur sur quelques dizaines



(parfois centaines) de mètres. Si l'on souhaite pouvoir l'exploiter, il va falloir (et c'est souvent ainsi) avant de la transmettre à la salle de contrôle lui faire subir un **prétraitement** qui consistera en premier lieu en une **amplification**, parfois un décalage de zéro, et, selon le mode de transmission retenu, en une **mise en forme** éventuelle (codage et/ou modulation par exemple) au voisinage immédiat du capteur.



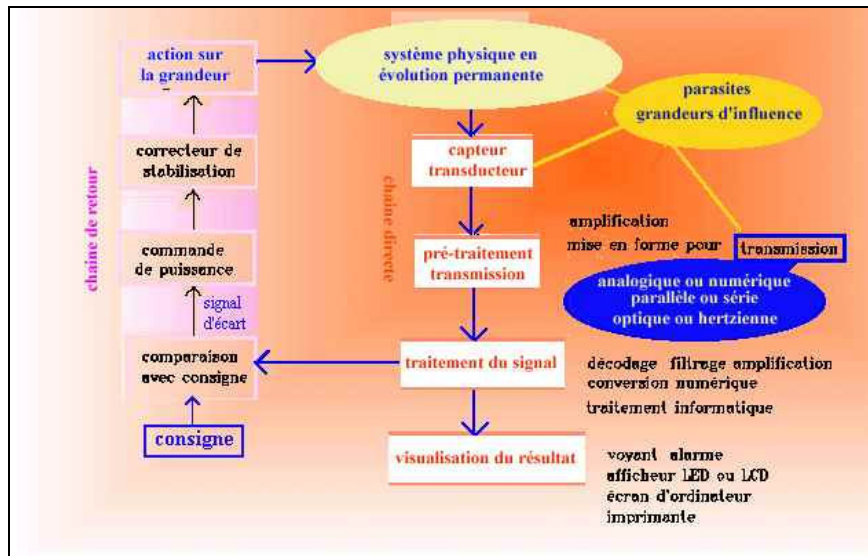
Il existe de multiples techniques de transmission de l'information présentant chacune des avantages spécifiques et des inconvénients (lignes multifilaires, fibres optiques, transmission radio..). Celle retenue ici constituera le meilleur compromis possible entre la qualité du résultat et le **coût** de l'investissement.

Le signal transmis, et reçu, sera généralement **bruité**. En effet tout au long de la chaîne de génération-transmission du signal, celui-ci peut être perturbé par des parasites qui viennent s'ajouter au signal utile et l'une des préoccupations principales de l'électronicien est d'**améliorer le rapport signal sur bruit**,

- soit en choisissant des techniques de génération et de transmission de signal peu sensibles aux parasites,
- soit en imaginant des dispositifs chargés d'extraire ce signal utile des bruits perturbateurs. Cela sera en particulier effectué dans un **module de filtrage** qui succédera dans la chaîne au module de réception-démodulation spécifique de la transmission retenue.

Le signal utile sera alors amplifié si nécessaire, souvent mis sous forme numérique pour être traité par un système informatique et exploité. Dans le cas le plus simple **sa valeur est visualisée** sur un dispositif qui peut aussi bien être un écran d'ordinateur, qu'un afficheur LED ou un antique cadran à aiguille. En pratique il est fréquent que plusieurs modes d'affichage soient mis en oeuvre simultanément, en fonction du destinataire. En effet celui-ci peut être l'opérateur chargé du contrôle du fonctionnement de l'unité de remplissage : un simple voyant lumineux vert quand c'est correct et rouge ou orange lorsque ça ne l'est plus pourrait éventuellement lui suffire. Par contre le chef d'atelier et le technicien de maintenance préféreront une information plus explicite sur leur ordinateur. Il faudra donc leur afficher en temps réel la courbe d'évolution de la tension de sortie du capteur pour leur permettre d'apprécier la situation exacte de l'unité. Le directeur de l'usine (ou le PdG éventuellement) quant à eux seront plus intéressés à une information économique du type évolution en temps réel de la production et des bénéfices escomptés (qui sont fonction de la qualité du remplissage), données qui peuvent être obtenues après traitement informatique adéquat des données physiques issues des capteurs.





Cet ensemble schématisé sur la figure ci-dessus constitue une **chaîne instrumentale directe**, encore appelée une boucle ouverte. Il est évident que dans notre installation de remplissage, il ne suffit pas de mesurer la pression, il faut assurer sa constance. Pour cela on va réaliser une boucle fermée (ou boucle d'asservissement) en adjoignant une **chaîne de retour** (partie gauche de la figure).

Le principe est le suivant : à chaque instant on compare la grandeur mesurée (dans notre exemple la pression exprimée en volts après transduction et amplification) à une valeur appelée **consigne** qui figure la valeur que **devrait avoir** la grandeur mesurée. L'écart éventuel est amplifié, et va servir à commander le système de réglage de la pression. Typiquement il s'agira d'une vanne dont le réglage d'ouverture ou de fermeture est commandé par un moteur dont le sens de rotation sera fonction du signe de l'écart.

Notons que si tous les éléments d'une chaîne de mesure directe sont toujours des systèmes de faible, et dans les dispositifs les plus récents, de très faible puissance (mW), il n'en est pas de même de la partie retour (ou commande) qui peut mettre en jeu des kW, et même des centaines de mégawatts dans certaines centrales nucléaires.

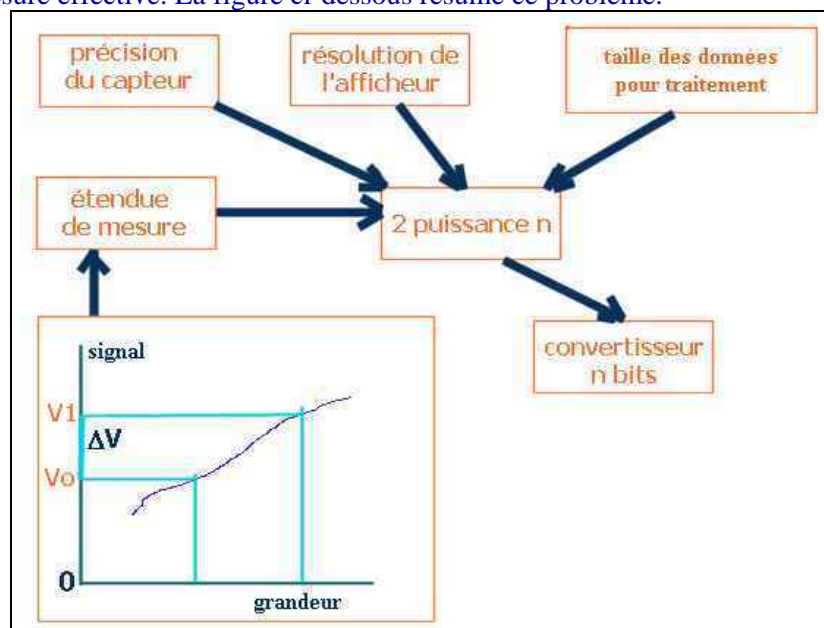
Enfin dans un système asservi tel celui-ci on sera généralement contraint d'introduire en un point judicieux de la chaîne un ou des **correcteurs** destinés à réduire autant que faire se peut les **oscillations** qui ne manqueront pas de se produire autour du point de consigne. En effet si la pression est trop faible on ouvre un peu plus la vanne, ce qui va, sans précautions particulières, conduire obligatoirement à dépasser la valeur requise, d'où une réaction de fermeture, et ainsi de suite. En effet on ne peut sous-estimer le temps qui s'écoule entre la prise d'information au niveau du capteur et l'action en résultant au niveau de la vanne commandée. Aussi faible soit-il, **il ne peut être nul** et lorsque après correction le niveau de pression sera exactement correct il s'écoulera ce même temps de transmission jusqu'à la vanne avant que sa commande d'ouverture ne se stabilise et obligatoirement la position d'équilibre idéal sera dépassée, d'où un processus d'oscillations autour de la valeur adéquate. Si le processus est mal maîtrisé on aura certes **en moyenne** un remplissage correct, mais avec pratiquement aucun pot exactement rempli et autant de pots trop remplis que de pots insuffisamment remplis, et peut être même des pots débordants et d'autres à moitié vides ce qui ne serait pas satisfaisant, ni pour le consommateur, ni pour l'entreprise puisque les pots débordants ne pourraient être fermés et donc seraient perdus. Des dispositifs de correction sont chargés, en **anticipant l'évolution de la commande**, de minimiser ces oscillations et de maintenir le remplissage dans la fourchette acceptable **de plus ou moins un pour cent**.

Précisons enfin que le capteur employé dans cet exemple est sensible aussi à diverses grandeurs, dites **grandeurs d'influence**, autres que la pression, et en particulier à la température et que le travail de l'électronicien sera aussi d'imaginer pour le système la configuration la plus efficace pour s'affranchir des **dérives thermiques** et ne prendre en compte que le signal utile.

## Compléments :

### amplification et conversion analogique numérique

Le signal fourni par un capteur est pratiquement toujours très faible et ne peut donc être transmis tel quel. On va donc dans une première étape l'amplifier pour l'adapter en amplitude aux dispositifs suivants de la chaîne. En exploitant les propriétés de l'amplificateur opérationnel on pourra aussi compenser des erreurs de zéro en procédant à un décalage du signal, voire parfois décaler fortement le signal pour le rendre compatible avec le système de conversion analogique numérique associé. Précisons que le taux d'amplification requis sera le résultat d'un compromis lié au choix du convertisseur analogique numérique, c'est à dire en fait de la résolution souhaitée. Celle-ci doit être mûrement réfléchi et résulte de plusieurs critères, dont en particulier le choix du système informatique et du langage dans lequel on va développer les programmes de traitement éventuel, ainsi que du procédé d'affichage retenu autant que de la qualité du capteur. On devra aussi tenir compte de l'étendue de mesure effective. La figure ci-dessous résume ce problème.



Dans cet exemple l'étendue de mesure est  $\Delta V$ , c'est à dire que le signal issu du capteur varie entre  $V_0$  et  $V_1$ . On aura donc avantage à procéder à un décalage de zéro d'amplitude  $-V_0$  avant amplification et à amplifier de telle sorte qu'à  $\Delta V$  corresponde la pleine échelle (à 10% près) du convertisseur. La marge de 10% étant supposée satisfaisante pour tenir compte des aléas éventuels de fonctionnement du système.

### techniques de transmission

Pour transmettre un signal à distance on dispose de plusieurs procédés que nous allons décrire succinctement ici en insistant sur leurs avantages et inconvénients plutôt que sur les aspects techniques. On va se limiter aux 4 principaux procédés effectivement utilisés en instrumentation : la liaison analogique 4-20mA, la liaison par bus informatique, la liaison optronique et la transmission radio.

- liaison 4-20mA.

Inventée vers 1930, par un ingénieur du groupe ESSO (S.O. = Standard Oil of New Jersey) aux Etats-Unis, ce procédé est destiné à transmettre un signal analogique à quelques dizaines ou centaines de mètres. Il repose sur le constat que le long d'un câble, aussi long soit-il, le courant continu qui le

traverse est constant. Par contre la différence de potentiel en raison de la chute de tension dans le câble va évoluer en fonction de la distance à la source et décroître avec l'augmentation de cette distance. Il est donc exclus de transmettre fiablement une faible ddp générée par un capteur en tant que telle. Cependant, si l'on sait transformer le générateur de tension équivalent à un capteur en générateur de courant, le problème est alors différent. Dans les années 30 les balbutiements de l'électronique à tubes dans lesquels les courants étaient de l'ordre de quelques 2 ou 3 dizaines de mA ont induit ce concept dit 4-20mA. L'idée est de réaliser un dispositif, capteur + circuit associé, dont la consommation en mA sera proportionnelle à la tension que l'on devrait mesurer aux bornes du capteur et de faire en sorte que celle-ci se situe dans la plage 4-20mA, ces limites correspondant alors aux limites d'utilisation du capteur. On aurait pu choisir 0-20mA mais c'eut été problématique en cas de dérive qui décale le courant vers les valeurs négatives, la plage 0-4mA constitue donc une marge de sécurité. Il est aisé de constater qu'aujourd'hui un simple transistor pourra jouer ce rôle de convertisseur tension-courant (la tension étant le  $V_{BE}$  du transistor auquel correspond un courant  $I_C$ ). La mesure en bout de ligne du courant consommé fournit l'indication de l'état du capteur et donc de la grandeur à contrôler. Ce procédé a eu un très grand succès car il implique l'emploi d'un simple câble bifilaire.

- liaison numérique.

L'emploi de l'ordinateur a induit l'exploitation de signaux numérisés transmis soit le long d'une ligne bifilaire (transmission série type RS 232 ou plus récemment lignes USB), soit d'un câble dit parallèle permettant une plus grande vitesse de transmission mais avec un coût d'investissement supérieur. On limitera l'emploi de ces deux procédés à des distances courtes (quelques dizaines de mètres). On notera l'existence d'une multitude de protocoles de transmission qui ne facilitent pas l'interopérabilité. La transmission série via un câble coaxial étant cependant celle qui assure les plus grandes distances de transmission.

- liaison optronique

Une variante de la transmission série consiste à remplacer le câble cuivre par une fibre optique ce qui accroît considérablement la vitesse de transmission. Celle-ci n'étant en pratique limitée que par la rapidité des circuits de conversion optique-électronique indispensables aux deux bouts de la fibre. On transmet des gigabits par seconde. Longtemps cette solution fut boudée par les industriels en raison de son coût. Ce n'est plus justifié aujourd'hui (la fibre est souvent moins chère que le cuivre). Cependant on notera une difficulté d'emploi qui est la relative fragilité de la fibre optique qui supporte assez mal les chocs transversaux (tels ceux que peut lui infliger accidentellement une pelleuse lors de travaux). Par contre la fibre présente un avantage fondamental sur les câbles métalliques, c'est son immunité aux parasites électro-magnétiques, et symétriquement son absence d'émission électromagnétique (donc une totale confidentialité, et une grande facilité d'emploi en environnement fortement bruité: aéronautique ou automobile).

- liaison radio

Le coût d'un système de transmission étant généralement constitué pour l'essentiel par le câblage et tous les travaux accessoires pour le réaliser, il apparait a priori intéressant de développer un procédé de transmission sans câblage, mettant en oeuvre une paire d'émetteur-récepteur radio. Cette solution est viable dans deux cas extrêmes : soit pour une liaison à grande distance (plusieurs dizaines de km), soit au contraire pour une liaison à moins de 100m. Dans ce dernier cas la technologie mise en oeuvre a été récemment développée pour l'interfaçage de périphériques informatiques, d'où son très faible coût. Il s'agit de la technologie bluetooth qui fait l'objet d'un chapitre spécifique. Notons simplement ici qu'un circuit bluetooth comporte l'ensemble du système radio sur un circuit intégré de la taille d'un timbre poste. Sa portée est selon sa puissance (normalisée) de 10 ou 100m. Cependant, jusqu'à nouvel ordre cette technologie est limitée en France à la portée de 10m en raison de l'utilisation (théorique) par les militaires de la bande de fréquence internationalement attribuée à cette technologie. Précisons que



L'avantage de la liaison radio (multiplicité potentielle des récepteurs liés à un même émetteur) est parfois considéré comme un inconvénient en milieu industriel sensible (confidentialité problématique et risque de brouillage).

### aspects économiques

L'exemple traité est typique de l'imbrication entre l'économie et la technique et de la nécessité permanente lors de la conception d'un système de tenir compte des contraintes économiques. Dans le domaine de l'agro-alimentaire tel celui des unités laitières la marge bénéficiaire du fabricant est souvent très réduite. Les statistiques économiques montrent en effet que les groupes les plus performants ne dépassent guère une marge de 2% (1).

Les données techniques fournies par le groupe Danone indiquent que le produit entre pour environ 50% dans le coût global du pot de yaourt en sortie d'usine. Il en résulte qu'une erreur de 1% du taux de remplissage d'un lot de pots de yaourts affecte la marge bénéficiaire considérablement (environ 25%). Ce qui justifie amplement le soin mis à contrôler la constance du débit du circuit de remplissage et la nécessité de réaliser la mesure de pression avec une précision statistique meilleure que 0.1%, d'où il résulte une incertitude sur la marge bénéficiaire de 2.5%. Ce qui est loin d'être négligeable rapporté au chiffre d'affaire annuel d'une unité de conditionnement de yaourts dont la ligne de production a une capacité de remplissage de 120 000 pots/heure.

Un simple calcul admettant un prix de 0.3€ par pot et 300 millions de pots remplis annuellement montre qu'une erreur par défaut de 1% sur la mesure de la pression engendre une perte de 1.15M€ ce qui représente sensiblement le coût salarial des cinquante personnes travaillant autour de cette unité de conditionnement.

(1) Source Henry Muller, Visions of Europe, Fortune, Vol 138, 12, 1998

### Perturbations

Nous allons maintenant examiner les principales causes de dérives et/ou d'erreurs de plus ou moins grande importance qui peuvent venir fausser la mesure et donc induire soit une perte, soit parfois un bénéfice indu selon le signe de l'erreur. Certaines sont faciles à imaginer, d'autres sont plus spécifiques de cette unité de remplissage et peuvent être plus difficiles à identifier, voire à quantifier.

#### a) Dérives liées à la température

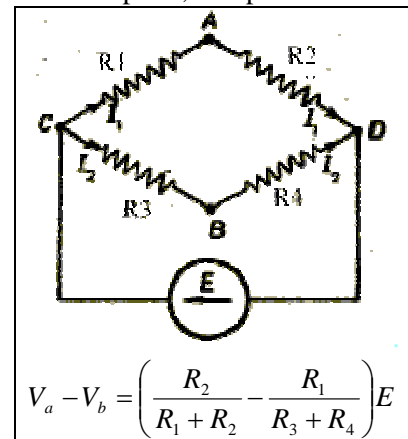
Ainsi qu'il est montré par ailleurs le signal de sortie du montage en pont s'exprime par

A température constante et variation de pression nulle cette ddp est constante et significative de la pression s'exerçant sur la membrane du capteur. Si la température vient à varier de façon homogène l'ensemble des résistances vont varier, en théorie, dans la même proportion et la ddp ne changera pas. Cela justifie le montage en pont.

Il convient cependant de noter que si, pour une raison ou une autre, le capteur est soumis à un **gradient de température** les variations relatives des résistances dues à ce gradient de température risquent d'être sensiblement différentes et eu égard à la précision requise pour la mesure celle-ci risque d'en être **sensiblement** affectée.

- En effet pour un capteur classique alimenté sous 10V le signal de sortie est d'environ 22mV/Bar. Supposons une pression de 7 bars soit un signal de mesure de 154mV. Les jauges de contrainte ont un coefficient de température  $\beta = 2.10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ .

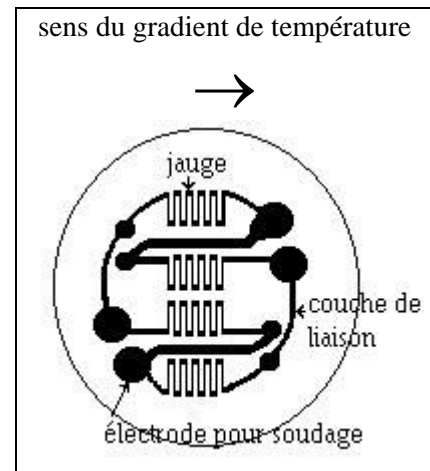
La résistance d'une jauge de contrainte évolue en fonction de la température selon la loi  $R=R_0(1+\beta T)$



En raisonnant sur le schéma simplifié ci-dessous, et en se rappelant que dans cette unité la membrane du capteur se trouve montée dans un plan vertical, on constate que deux cas extrêmes peuvent se produire :

- Dans le cas le plus favorable (figuré ci-contre) le gradient de température est dans la direction horizontale. Alors les 4 résistances, placées dans des conditions thermiques semblables, vont varier sensiblement d'une même quantité sous l'effet de la température. Dans ce cas l'effet de la température, ainsi qu'on peut le déduire de la relation (1), est alors négligeable.
- Par contre si le gradient s'exerce dans la direction verticale il n'y a plus de compensation entre les deux termes de l'équation.

- Notons que la position du capteur est imprévisible a priori : on sait qu'il va être vissé sur un tube fileté en relation avec l'intérieur du récipient et que, pour des raisons de commodité, le dessinateur, qui a établi les plans du dispositif, a choisi de placer cette canalisation horizontalement. Mais on ignore totalement la longueur exacte du pas de vis et le positionnement des jauges sur la membrane n'en tient pas compte. Il en résulte qu'en butée (pour assurer l'étanchéité) la position du pont de jauges en rotation est imprévisible. Gageons que la loi de Murphy fera qu'il sera dans une position la plus défavorable vis à vis des gradients thermiques potentiels.



Il en résulte qu'un écart de température de 1°C entre les résistances R1 et R3 se traduira par une variation relative du signal de  $2 \cdot 10^{-4}$  V soit 0.2mV et environ 13% de l'incertitude requise. Sur une année une telle erreur systématique entraînerait dans le cas le plus défavorable **une perte de près de 15000 €**

La probabilité de permanence d'une telle erreur est faible, il est cependant vraisemblable qu'elle puisse se produire temporairement et **aléatoirement** en raison de perturbations thermiques elles-mêmes aléatoires (rayon de soleil frappant directement le capteur, courant d'air lié à une porte ou une fenêtre ouverte, etc). En outre, il convient de noter que le yaourt est un produit laitier biologiquement sensible qui doit être manipulé à basse température. Typiquement l'unité de stockage est maintenue aux alentours de 4°C par le biais d'une double enveloppe dans laquelle circule un fluide réfrigéré. Il existe donc systématiquement un écart entre la température interne du récipient de stockage et la température de l'atelier et la probabilité que la température instantanée du capteur, dont la membrane est en contact avec le gaz réfrigéré sur sa face interne et l'air ambiant non régulé sur sa face externe, ne soit pas homogène n'est donc pas négligeable.

D'autres problèmes thermiques peuvent se présenter :

Ainsi la différence de température entre la membrane du capteur et son environnement, et tout particulièrement dans celui-ci les fils de liaison reliant le capteur à son électronique, peut induire par effet thermoélectrique des erreurs supplémentaires venant s'ajouter aux précédentes et de même ordre de grandeur (environ  $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ).

Par ailleurs une unité de remplissage n'est généralement pas dévolue à un seul type de produit, ce qui revient à dire que le produit dans le récipient de stockage va changer fréquemment (plusieurs fois par jour). Il en résulte la nécessité de nettoyer, entre chaque type de yaourt, l'ensemble de la chaîne. Cela s'effectue en injectant, en particulier, de la vapeur d'eau à 140°C dans le circuit. Pendant cette phase de nettoyage la chaîne instrumentale ne fonctionne pas, cependant le capteur de pression est soumis à l'action de la vapeur. Il en résulte un vieillissement accéléré de la colle qui assure la liaison mécanique entre la membrane et le pont de jauges de contrainte, c'est à dire à la longue une dérive sensible des caractéristiques du capteur qu'il conviendra soit de ré-étalonner, soit de changer. Il serait donc souhaitable de prévoir une vanne supplémentaire permettant d'isoler le capteur pendant les processus de nettoyage pour éviter cet inconvénient majeur, mais aussi de s'assurer de sa fermeture.

**b) Autre dérive thermique due à une dissymétrie géométrique:**

Il existe un autre problème pratique. On a supposé que les quatre jauges de contrainte étaient positionnées de manière symétrique et judicieuse de telle sorte que les  $\Delta R$  soient exactement de même ordre de grandeur ce qui garantit la compensation thermique en cas de variation homogène de température sur l'ensemble du pont. En fait, compte tenu des contraintes de précision souhaitées, on demande ici une précision de positionnement des jauges de contrainte particulièrement élevée et probablement impossible à garantir pour des capteurs de technologie classique à jauges collées. N'oublions pas que pour les deux jauges les plus périphériques les contraintes radiales varient fortement sur une très faible distance ainsi que le montre la figure présentée auparavant. Il est donc parfaitement plausible que la symétrie ne soit pas totalement respectée ce qui revient à dire que les variations de résistance des 4 jauges ne seront pas exactement équivalentes. Et que la relation

$$V_a - V_b \approx \frac{\Delta R}{R} E$$

n'est alors qu'une approximation grossière dans ce cas. Et la conséquence en est que la compensation de dérive thermique n'est plus parfaitement réalisée, même lorsque la température de la membrane est homogène, et que l'erreur qui en résulte n'est pas toujours négligeable sur le plan économique.

---

**c) Autres perturbations :**

Enfin on notera que souvent, pour des raisons de commodité, le câble de transmission de l'information capteur va "cohabiter" sur une portion de son parcours avec un câble de puissance (tel par exemple celui qui alimente le moteur d'entraînement du tapis roulant). Pour peu que ce dernier soit une ligne triphasée cela va induire, par un phénomène d'induction électromagnétique classique, des tensions parasites à 50 Hz dans le câble de mesure. Et la combinaison de trois tensions parasites déphasées de  $120^\circ$  dans ce câble donne lieu à un signal sensiblement continu qui va venir se superposer au signal issu du capteur. Il est tout à fait plausible que ce signal parasite soit d'un ordre de grandeur significatif vis à vis du signal de mesure et qu'il vienne alors fausser complètement celle-ci.

---

**Conclusion:**

Nous retiendrons de cet exemple plusieurs éléments :

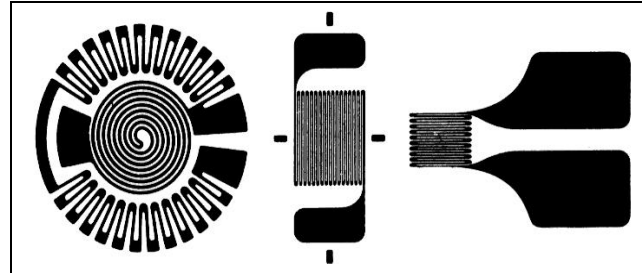
- un capteur n'est pas parfait, et son choix n'est pas innocent,
- dans la pratique il va toujours évoluer dans un environnement lui même évolutif dans lequel certains paramètres plus ou moins maîtrisés vont jouer le rôle de grandeurs d'influence et perturber la mesure.
- Il conviendra donc de connaître de manière approfondie le processus dans lequel ce capteur sera intégré
- d'avoir identifié toutes les causes de perturbations éventuelles et de les avoir quantifiées
- d'apprécier l'importance relative des erreurs potentielles non seulement en terme d'erreur relative ou absolue mais aussi en terme économique.
- Cette analyse d'un simple processus industriel nous montre à l'évidence les conséquences économiques parfois imprévues (et plus ou moins imprévisibles) d'un choix instrumental insuffisamment explicité lors de la conception du système.
- et que le meilleur capteur ne pourra pas compenser certaines erreurs de conception de l'ensemble du dispositif.

## Annexe jauges de contrainte

On distingue plusieurs technologies dans la réalisation de telles jauges :

- fils collés sur un support,
- jauges à trame pelliculaire,
- jauges diffusées,
- jauges en couche mince.

### d) jauges à fil ja



Elles sont constituées d'un fil résistant de faible diamètre (12µm par ex) collé sur un support dont la nature varie selon le type d'application et le domaine de température: ce peut être un papier fin poreux (0.1mm d'épaisseur) ou le plus souvent un film polyamide. De même la colle reliant le fil à son support sera du type époxy (-190,+100°C) phénolique (100 à 300 °C) ou un ciment réfractaire (au delà de 300°C).

Ces jauges devront généralement être protégées contre la corrosion et l'humidité à l'aide de produits susceptibles de former des films souples et étanches: vernis, résines époxy, élastomères silicones. Divers procédés de montage tendent à augmenter la sensibilité en augmentant la longueur utile: procédé à grille plane, bobinage en dent de scie.

### e) jauges à trame pelliculaire

De plus en plus on remplace les jauges à fils par ces dernières dont la technologie se prête mieux aux procédures automatisées propres aux fabricants de composants électroniques. Le fil est alors remplacé par un conducteur mince et plat obtenu par **photogravure**. Les récents progrès des techniques photo lithographiques autorisent la réalisation de brins de jauge de 3µm de largeur séparés par moins de 2µm.

Ces jauges présentent de nombreux avantages: masse plus faible donc moindre inertie, dissipation thermique accrue, effet transversal réduit (on peut varier la largeur), épanouissement aux extrémités facilitant la connexion, géométries complexes adaptées à des cas très particuliers facilement réalisables. On donne ci- dessus quelques exemples de géométries courantes.

### f) jauges à semi-conducteur

Il est possible d'utiliser le silicium comme matériau de jauge plutôt qu'un alliage métallique. Le principal intérêt réside dans le **facteur de jauge** accru d'un facteur 50, par rapport aux jauges métalliques et aux possibilités très récentes de fabrication de l'ensemble du capteur en silicium. Dans ce dernier cas on évite ainsi toutes les opérations de montage des jauges sur une membrane. Cependant le silicium présente l'inconvénient majeur d'avoir un fort coefficient de dérive thermique.

## 1.2.2. caractéristiques électriques

### coefficient de sensibilité longitudinale

$R = \rho l / \pi r^2$  Sous l'effet d'une traction  $l$  augmente et  $r$  diminue, c'est l'inverse en cas de compression. On définit un *facteur de sensibilité longitudinale*

$$K = (\Delta R/R) / (\Delta l/l)$$

dont on va exprimer la valeur ci-après  $\Delta R/R = \Delta \rho/\rho + \Delta l/l - 2\Delta r/r$  or  $\Delta r/r = -\sigma \Delta l/l$  ( $\sigma$  étant le coefficient de Poisson)

d'après Bridgman  $\Delta \rho/\rho = c \Delta V/V$  avec  $V = \pi r^2 l$  soit  $\Delta V/V = 2\Delta r/r + \Delta l/l$

il vient donc  $\Delta R/R = [c(1-2\sigma)+1+2\sigma]\Delta l/l$

et  $K = c(1-2\sigma)+1+2\sigma$

**coefficient de sensibilité transversale**

$(\Delta l/l)_T = -\sigma(\Delta l/l)_x$  ce que l'on écrit  $\varepsilon_y = -\sigma\varepsilon_x \Delta R/R = K_x\varepsilon_x + K_y\varepsilon_y = [K_x - \sigma K_y]\varepsilon_x$  On a donc du fait que les brins sont nécessairement raccordés entre eux par une liaison transversale une sensibilité réelle légèrement plus faible que  $K_x$ . En écrivant  $\Delta R/R = K_{\text{réel}} (\Delta l/l)_x$

on voit que  $K_{\text{réel}} = K_x [1 - \sigma K_y / K_x]$

$K_{\text{réel}}$  est d'environ 0.75% inférieur à  $K_x$  pour une jauge à fil classique. Cette erreur peut être réduite pour les jauges à trame pelliculaire en élargissant les bandes de raccordement.

**influence de la température**

deux effets liés à la température peuvent fausser les résultats :

- d'une part la dilatation différentielle entre jauge et support
- d'autre part, les effets thermoélectriques liés à un écart de température entre deux points de raccordement (on peut éliminer ce problème en alimentant les jauges en alternatif).

dilatation

jauge  $l_f = l_{f0} [1 + \lambda_f(T-T_0)]$

membrane support  $l_m = l_{m0} [1 + \lambda_m(T-T_0)]$

on peut admettre à  $T_0$  que  $l_{f0} = l_{m0} = l_0$  à  $T$ :  $l_m - l_f = l_0 [\lambda_m - \lambda_f][T - T_0]$

posons  $T - T_0 = \Delta T$  il vient:

$$(\Delta R/R)_T = (K_x + K_y)[l_m - l_f] / l_0 = A \Delta T$$

ex: pour une jauge en constantan collée sur aluminium on trouve:  $A = 5.310^{-5}/^\circ\text{C}$  et sur acier  $A = 310^{-5}/^\circ\text{C}$

Ce résultat est loin d'être négligeable aussi choisit-on de travailler avec un pont de jauges plutôt qu'une seule jauge afin de minimiser cette influence de la température.

**1.2.3. pont de mesures**

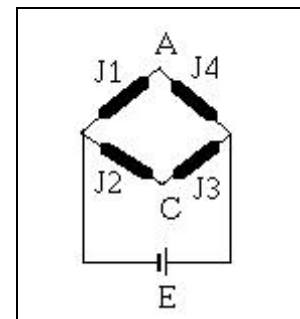
On travaille en pont de Wheatstone constitué de 4 jauges de résistance identique en l'absence de contrainte. Les jauges sont placées de façon symétrique sur la pièce en déformation de telle façon que J1 et J3 subissent des allongements positifs tandis que J2 et J4 seront comprimées.

$$V_A - V_C = R_1 E / (R_1 + R_4) - R_2 E / (R_2 + R_3)$$

sous l'action d'une contrainte,  $R_i$  devient  $R_i + dR_i$  avec  $dR_i > 0$  ou  $< 0$ , et on montre facilement que

$$d(V_A - V_C) = E/4R [dR_1 - dR_4 + dR_3 - dR_2]$$

Cette relation montre bien que la contribution à  $d(V_A - V_C)$  due à la température est nulle car à température homogène tous les  $dR_i$  sont identiques, tandis que la sensibilité aux contraintes est maintenue en plaçant les jauges comme précisé ci-avant ;





En pratique le pont n'est jamais parfait et on sera amené à ajouter une compensation de dérive de température du coefficient de jauge ainsi qu'un dispositif d'équilibrage du zéro. Dans ces conditions l'électronique associée pourrait être du type de celle figurée ci-dessous.

Les capteurs à jauges peuvent se présenter sous de nombreuses apparences selon leur destination. A titre indicatif et non limitatif nous donnons ci-dessous quelques exemples.

