

**OFPPT**

**ROYAUME DU MAROC**

**مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل**

**Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail**

**DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION**

**RESUME THEORIQUE  
&  
GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES**

**MODULE N°:28**      **INSTALLATION, DÉPANNAGE :  
INSTRUMENTATION  
INDUSTRIELLE**

**SECTEUR : INDUSTRIEL**

**SPECIALITE : ELECTROMECHANIQUE DE  
SYSTEMES AUTOMATISES**

**NIVEAU : TECHNICIEN SPECIALISE**

**Document élaboré par :**

**Nom et prénom  
HABACHI AZEDDINE**

**EFP  
ISTA SETTAT**

**DR  
CHAOUIA TADLA  
SETTAT**

## **SOMMAIRE**

### **1. Introduction à la régulation :**

- 1.1 Présentation :**
- 1.2 Définition :**
- 1.3 Analyse des activités dans la chaîne de régulation :**
- 1.4 Les éléments constitutifs d'une boucle de régulation :**
  - 1.4.1 Le procédé :**
  - 1.4.2 La variable manipulée ou grandeur réglante :**
  - 1.4.3 La variable commandée ou La grandeur réglée :**
  - 1.4.5 La consigne :**
  - 1.4.6 Les grandeurs perturbatrices :**
  - 1.4.7 Capteur :**
  - 1.4.8 Le régulateur :**
  - 1.4.9 L'élément final de commande :**
  - 1.4.10 La charge :**
- 1.5 Boucle ouverte et boucle fermée :**
  - 1.5.1 Boucle ouverte :**
  - 1.5.2 Boucle fermée :**
- 1.6 Exemples de système de régulation :**
  - 1.6.1 Conduite automobile :**
  - 1.6.2 Régulation de la température d'un four :**
- 1.7 Asservissement :**
- 1.8 Terminologie :**

### **2. Représentation symbolique et schémas**

- 2.1 Représentation par la norme I.S.A.**
- 2.2 La signification des lettres de l'étiquette**
- 2.3 La représentation de l'emplacement**
- 2.4 La représentation de la liaison**
- 2.5 Les symboles usuels**
- 2.6 Exemples de procédé**
- 2.6 Exemple complet**

### **3. La mesure et les capteurs industriels**

- 3.1 Le capteur**
  - 3.1.1 Définition**
  - 3.1.3 Capteur actif**
  - 3.1.4 Capteur passif**
- 3.2 Chaîne de mesure**
  - 3.2.1 Principe d'une chaîne de mesure**
  - 3.2.2 La chaîne de mesure analogique**
  - 3.2.3 La chaîne de mesure numérique**
  - 3.2.4 Le transmetteur "intelligent"**

- 3.3 Les caractéristiques générales des capteurs
  - 3.3.1 Les limites d'utilisation
  - 3.3.2 L'étendue de mesure
  - 3.3.3 L'erreur absolue et l'erreur relative et l'erreur systématique
  - 3.3.4 La sensibilité
  - 3.3.5 La résolution
  - 3.3.6 La linéarité
  - 3.3.7 Fidélité, justesse, précision
  - 3.3.8 Classe de précision
  - 3.3.9 La répétabilité
  - 3.3.10 L'hystérésis
  - 3.3.11 La finesse
  - 3.3.12 Le temps de réponse
- 3.4 Méthode de choix des capteurs industriels
  - 3.4.1 Définition du cahier des charges
  - 3.4.2 Les considérations techniques externes affectant le choix du capteur
  - 3.4.3 Les caractéristiques intrinsèques du capteur
- 3.5 Les mesures usuelles
  - 3.5.1 Liens entre les unités S.I. et celles employées dans d'autres pays (USA)
  - 3.5.2 La mesure de la température
  - 3.5.3 La mesure de la pression
- 3.6 La mesure du débit
- 3.7 La mesure du niveau

#### **4. Le raccordement capteur – transmetteur**

- 4.1 Les standards dans la transmission de signaux
  - 4.1.1 Le signal numérique TOR
  - 4.1.2 Le signal analogique
  - 4.1.3 Le transmetteur de signal 4-20mA
  - 4.1.4 Les standards de transmission pneumatiques
  - 4.1.5 Les standards de transmission numériques
  - 4.1.6 Conversion d'unités
  - 4.1.7 La grandeur physique ou grandeur d'ingénierie
  - 4.1.8 La grandeur normalisée en pourcentage
  - 4.1.9 La fonction de transfert
  - 4.1.10 Schématisation
  - 4.1.11 Les types de sorties
  - 4.1.12 Les types des sorties numériques TOR
  - 4.1.13 Les types de sorties analogiques
  - 4.1.14 Raccordement d'un transmetteur 4-20mA
  - 4.1.15 Bus de terrain
  - 4.1.16 Les types de lien de communication
- 4.2 L'étalonnage de l'instrumentation industrielle
- 4.3 Générateur d'étalonnage universel
  - 4.3.1 Procédure d'ajustement de la gamme de mesure
  - 4.3.2 Validation à l'aide du multimètre

## **5. Les capteurs**

- 5.1 Capteurs de position**
  - 5.1.1 Présentation**
  - 5.1.2 Capteurs analogiques**
    - 5.1.2.1 Présentation**
      - 5.1.2.2 Potentiomètre résistif**
        - 5.1.2.2.1 Rappel de physique**
        - 5.1.2.2.2 Principe de fonctionnement**
        - 5.1.2.2.3 Applications**
      - 5.1.2.3 Capteurs capacitifs**
        - 5.1.2.3.1 Rappel de physique**
        - 5.1.2.3.2 Principe de fonctionnement**
        - 5.1.2.3.3 Domaine d'utilisation**
      - 5.1.2.4 Capteurs inductifs**
        - 5.1.2.4.1 Rappel de physique**
        - 5.1.2.4.2 Principes de fonctionnement**
        - 5.1.2.4.3 Applications**
    - 5.1.3. Les codeurs rotatifs**
      - 5.1.3.1. Fonction d'un codeur de position rotatif**
      - 5.1.3.2. Le codeur incrémental**
        - 5.1.3.2.1 Principe de fonctionnement**
        - 5.1.3.2.2 Détermination du sens de rotation**
        - 5.1.3.2.3 Exploitation des voies A et B :**
        - 5.1.3.2.4 Élimination des parasites :**
      - 5.1.3.3. Le codeur absolu**
        - 5.1.3.3.1 Principe de fonctionnement :**
        - 5.1.3.3.2 Codes délivrés par un codeur absolu :**
        - 5.1.3.3.3 Codeur absolue simple tour /Codeur absolue multi-tour :**
        - 5.1.3.3.4 Choix des étages de sorties :**
      - 5.1.3.4. Comparaison des deux concepts codeur incrémental et codeur absolu :**
  - 5.3. Mesure et détection de niveau**
    - 5.3.1. Méthodes hydrostatiques**
      - 5.3.1.1. Rappel de physique**
      - 5.3.1.2. Flotteur**
      - 5.3.1.3. Plongeur**
      - 5.3.1.4. Mesure de pression**
        - 5.3.1.4.1 Principe de fonctionnement**
        - 5.3.1.4.2 Mesure de niveau à bulles**
        - 5.3.1.4.3 Mesure en réservoir fermée**
      - 5.3.1.5. Mesure de masse volumique**
    - 5.3.2. Méthodes électriques**
      - 5.3.2.1. Capteurs conductimétriques**
        - 5.3.2.1.1 Présentation**
        - 5.3.2.1.2 Détection**
        - 5.3.2.1.3 Domaine d'utilisation**
      - 5.3.2.2. Capteurs capacitifs**
      - 5.3.3. Ondes acoustiques**
        - 5.3.3.1. Principe**

- 5.3.3.3.2. Radar
- 5.3.3.4. Absorption de rayonnement gamma
  - 5.3.3.4.1. Principe
  - 5.3.3.4.2. Détection
  - 5.3.3.4.3. Mesure de densité
- 5.3.3.5. Comparaison des différentes méthodes
- 5.4. capteurs de débit
- 5.5. Les capteurs de température
  - 5.5.1.1. Lames bimétalliques ( bilame)
  - 5.5.1.2. Les thermomètres à bulbes ou à dilatation
- 5.5.2. Thermomètres électriques
  - 5.5.2.1. Présentation
  - 5.5.2.2. Thermomètres à résistance et à thermistance
    - 5.5.2.2.1. Thermomètres à thermistance
    - 5.5.2.2.2. Les thermomètres à résistances RTD
  - 5.5.2.3. Les thermocouples
- 5.5.3.1 Les thermomètres à rayonnement
- 5.5.3.2. Les thermomètres optiques
- 5.6. La mesure de poids et de déformation
  - 5.6.1 Les jauges de contrainte
  - 5.6.2. La cellule de charge
- 5.7. Les capteurs à effet Hall
  - 5.7.1. Rappel de l'effet Hall:
- 5.8. Les capteurs de vitesse de rotation

## **6. Définition du procédé**

- 6.1 Causes de modification de l'équilibre du procédé
  - 6.1.1 Les délais
  - 6.1.2 La variation de la consigne
  - 6.1.3 La variation de la charge
  - 6.1.4 Les perturbations et le bruit
- 6.2 Réponse des systèmes asservis
  - 6.2.1 En boucle ouverte
  - 6.2.2 En boucle fermée
  - 6.2.3 Objectifs de la régulation de procédé
- 6.3 Modélisation du procédé selon la réponse à l'échelon
  - 6.3.1 Les caractéristiques du procédé
  - 6.3.2 Méthode du 2 à 63%
  - 6.3.3 Méthode de la pente maximale
- 6.4 Autres caractéristiques du procédé
- 6.5 Les types de procédés
  - 6.5.1 Sens de l'action d'un régulateur
    - 6.5.1.1 Définition
  - 6.5.2.2 Choix du sens d'action du régulateur
- 6.6 Exercices

## **7. LES ACTIONNEURS**

- 7.1 Les moteurs**
- 7.2 L'embrayage magnétique**
- 7.3 Les éléments chauffants**
- 7.4 La vanne de réglage**
  - 7.4.1 Généralité**
    - 7.4.1.1. Schématisation**
    - 7.4.1.2. Situation**
      - 7.4.1.2.1. Régulation de niveau**
      - 7.4.1.2.2. Régulation de pression**
      - 7.4.1.2.3. Régulation de débit**
    - 7.4.1.3. Fonction de la vanne de réglage**
    - 7.4.1.4. Contraintes dues au fluide et à l'environnement :**
    - 7.4.1.5. Éléments constituant la vanne de réglage**
    - 7.4.1.6. Forme du corps de vanne**
    - 7.4.1.7. Type de corps de vanne**
    - 7.4.1.8. Les servomoteurs**
  - 7.4.2. Caractéristiques des vannes de régulation**
    - 7.4.2.1. Caractéristique intrinsèque de débit**
    - 7.4.2.2. Débit linéaire PL**
    - 7.4.2.3. Débit égal en pourcentage EQP**
    - 7.4.2.4. Débit tout ou rien PT**
    - 7.4.2.5. Caractéristique installée**
    - 7.4.2.6. Modélisation de la relation EQP entre le débit et la commande de vanne**
  - 7.4.3. Position de la vanne en cas de manque d'air**
    - 7.4.3.1. Un choix à effectuer**
    - 7.4.3.2. Cas des servomoteurs à diaphragme, à piston simple effet**
    - 7.4.3.3. Cas des servomoteurs à piston double effet**
    - 7.4.3.4. Maintien de la vanne régulatrice de position**
  - 7.4.4. Capacité de débit d'une vanne**
    - 7.4.4.1. Rappel**
    - 7.4.4.2. Capacité du corps de vanne**
    - 7.4.4.3. Cv du corps de vanne**
    - 7.4.4.4. Kv du corps de vanne**
    - 7.4.4.5. Cas des liquides visqueux, écoulement laminaire**
    - 7.4.4.6. Cas des gaz**
  - 7.4.5. Calcul de Cv**
    - 7.4.5.1. Cv équivalent de plusieurs vannes en parallèle**
    - 7.4.5.2. Cv équivalent de plusieurs vannes en série**
    - 7.4.5.3. Influence des convergents-divergents**
  - 7.4.6. Cavitation et vaporisation**
    - 7.4.6.1. Variation de la pression statique à travers une vanne**
    - 7.4.6.2. Cavitation**
    - 7.4.6.3. Vaporisation**
    - 7.4.6.4. Conséquences pratiques**

## **8. Contrôles de procédé**

- 8.1 Les différents modes de commande**
- 8.2 La commande à deux positions : Régulation Tout Ou Rien - TOR**
- 8.3 Action proportionnelle**
  - 8.3.1 Définition**
  - 8.3.2 Influence de la bande proportionnelle**
  - 8.3.3 Décalage de bande - Talon - Intégrale manuelle**
  - 8.3.4 Influence du décalage de bande**
  - 8.3.5 Représentation fonctionnelle d'une régulation proportionnelle  
Comparaison avec intégrale manuelle**
- 8.4 Qu'est-ce qu'une action intégrale ?**
- 8.5 Action dérivée**
- 8.6 Résumé des actions des corrections P, I et D**
- 8.7 Méthodes simples de détermination des actions PID**
  - 8.7.1 Principes fondamentaux**
  - 8.7.2 La commande proportionnelle à dérivation**
  - 8.7.3 La commande proportionnelle à intégration et dérivation (PID)**
- 8.8 Tableau récapitulatif**

## **9. Les techniques de mise au point du régulateur**

- 9.1 Méthodes simples de détermination des actions PID**
  - 9.1.1 Principes fondamentaux**
- 9.2 La mise au point avec le test de la réponse à l'échelon**
  - 9.2.1 Le gain de procédé**
  - 9.2.2 La constante de temps**
  - 9.2.3 Le temps de délai**
  - 9.2.4 Le réglage des paramètres (pour un contrôleur standard)**
- 9.3 La mise au point à l'aide de la fréquence naturelle d'oscillation**
  - 9.3.1 Le réglage des paramètres (pour un contrôleur standard)**
- 9.4 Les critères de performance**
  - 9.4.1 Le décroissement 4 à 1**

**Module 10 :                   INSTALLATION, DÉPANNAGE :  
  INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE**

**Code :**

**Durée :           90 h**

**OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU  
DE COMPORTEMENT**

**COMPORTEMENT ATTENDU**

Pour démontrer sa compétence l'apprenti doit  
**installer et dépanner une boucle d'instrumentation industrielle**  
selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

**CONDITIONS D'ÉVALUATION**

- À partir :
  - de directives;
  - du schéma de la boucle d'instrumentation industrielle;
  - d'un problème de fonctionnement provoqué.
- À l'aide :
  - des manuels techniques;
  - des outils et des instruments;
  - d'une boucle d'instrumentation industrielle;
  - de l'équipement de protection individuelle;

**CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE**

- Respect des règles de santé et de sécurité au travail.
- Respect des normes en vigueur.
- Utilisation appropriée des outils et des instruments.
- Respect des techniques de travail.
- Équipement fonctionnel et sécuritaire.

**OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU**

**DE COMPORTEMENT(suite)**

**PRÉCISIONS SUR LE  
COMPORTEMENT ATTENDU**

A. Prendre connaissance des directives, des plans et des manuels techniques.

B. Installer une boucle de régulation.

C. Analyser l'état réel de l'équipement.

D. Poser un diagnostic.

E. Remplacer les composants défectueux.

F. Régler les paramètres de fonctionnement.

G. Vérifier le fonctionnement de l'équipement.

H. Consigner les interventions.

**CRITÈRES PARTICULIERS  
DE PERFORMANCE**

- Interprétation exacte des symboles et des conventions du plan.
- Repérage de l'information pertinente dans les manuels techniques.
- Exactitude de la terminologie.

- Installation conforme à la méthode et au plan.

- Vérification minutieuse et complète de l'équipement.
- Exactitude des mesures relevées :
  - tension;
  - courant;
  - résistance;
  - pression, débit, niveau et température.
- Justesse de la comparaison de l'état réel à l'état de référence de l'équipement.

- Justesse du diagnostic.
- Indication valable du phénomène destructeur.
- Choix judicieux des correctifs à apporter.

- Choix approprié du composant de remplacement.
- Démontage et montage précis.
- Mise en place correcte et solidité des composants de remplacement.

- Réglage fonctionnel des paramètres.

- Prise en considération des spécifications de fonctionnement.
- Mise en marche appropriée et sécuritaire de l'équipement.
- Fonctionnement approprié :
  - des dispositifs de commande;
  - des dispositifs de protection.

- Concision et pertinence de l'information présentée.

## **OBJECTIFS OPÉRATIONNELS DE SECOND NIVEAU**

L'apprenti DOIT MAÎTRISER LES SAVOIRS, SAVOIR-FAIRE, SAVOIR PERCEVOIR OU SAVOIR ÊTRE JUGÉS PRÉALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :

### **Avant d'apprendre à prendre connaissance des directives, des plans des manuels techniques (A) :**

1. Définir la terminologie et les concepts relatifs à une boucle d'instrumentation industrielle.
2. Définir les principales grandeurs physiques et les capteurs usuels.
3. Distinguer les différents types de pression.
4. Calculer les conversions d'unités d'ingénierie et des signaux standards.
5. Interpréter des schémas, des plans et des devis.
6. Lire des diagrammes de boucles utilisant les symboles ISA.
7. Interpréter des diagrammes d'écoulement.

### **Avant d'apprendre à installer une boucle de régulation (B) :**

8. Identifier les normes en vigueur au regard de l'installation d'une boucle de régulation.
9. Expliquer les méthodes d'installation.
10. Installer des câbles et des canalisations.
11. Reconnaître les mesures de sécurité à prendre lors de l'installation.
12. Expliquer les principes de mesure électronique couramment rencontrés en milieu industriel.
13. Expliquer l'étalonnage d'un transmetteur à deux fils.
14. Décrire les caractéristiques d'un système d'acquisition de données.
15. Décrire les standards de transmission analogique et numérique.
16. Distinguer l'appareillage usuel utilisé en milieu industriel.

### **Avant d'apprendre à poser un diagnostic (D) :**

17. Analyser un circuit à c.c.
18. Analyser un circuit à c.a.
19. Analyser des circuits à semi-conducteurs.
20. Appliquer des notions de logique combinatoire.
21. Appliquer des notions de logique séquentielle.
22. Utiliser un automate programmable.
23. Analyser des circuits pneumatiques.
24. Analyser des circuits hydrauliques.

(à suivre)

## **OBJECTIFS OPÉRATIONNELS DE SECOND NIVEAU**

**L'apprenti DOIT MAÎTRISER LES SAVOIRS, SAVOIR-FAIRE, SAVOIR PERCEVOIR OU SAVOIR ÊTRE JUGÉS PRÉALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :**

25. Expliquer les méthodes de dépannage.
26. Distinguer les sources de problèmes dans une boucle d'instrumentation industrielle.
27. Décrire les particularités d'un système asservi et d'un procédé industriel.
28. Décrire un procédé simple.
29. Distinguer des actionneurs proportionnels

### **Avant d'apprendre à remplacer les composants défectueux (E) :**

30. Reconnaître les règles de sécurité relatives au dépannage d'une boucle d'instrumentation industrielle.
31. Sélectionner les composants de remplacement.
32. Expliquer la procédure de remplacement des pièces défectueuses.
33. Expliquer l'importance de la qualité dans l'exécution des travaux.

### **Avant d'apprendre à régler les paramètres de fonctionnement (F) :**

34. Définir la terminologie et les modes de commande du régulateur de procédé.
35. Expliquer l'écart permanent retrouvé sur le procédé.
36. Justifier l'utilisation de l'action intégrale.
37. Expliquer le réglage des paramètres d'un régulateur PID.
38. Décrire les procédures pour détecter les anomalies du système de régulation de procédé.

### **Avant d'apprendre à vérifier le fonctionnement de l'équipement (G) :**

39. Vérifier le fonctionnement des dispositifs de sécurité.

### **Avant d'apprendre à consigner les interventions (H) :**

40. Utiliser un micro-ordinateur pour produire des documents techniques.
41. Utiliser la terminologie appropriée.

# 1. Introduction à la régulation

## 1.1 Présentation :

Un **procédé** est une opération ou une suite d'opérations accomplies dans un but déterminé, il peut être défini comme une série d'opérations apportant des modifications physiques ou chimiques à un produit. La fabrication du papier, du ciment, du verre, le traitement des eaux, sont des exemples de procédés industriels.

La régulation automatique est la technique des méthodes et des outils nécessaires à la prise de contrôle d'une ou plusieurs grandeurs physiques (vitesse, température, pression, courant, etc.) d'un procédé en vue d'en imposer le comportement bien déterminé. Les grandeurs physiques, ou signaux, doivent être mesurés afin de vérifier leur état pour ensuite déterminer à l'aide d'un traitement approprié l'action à entreprendre sur le système pour qu'ils se comportent comme souhaité. Avec le qualificatif automatique, on admet qu'aucune intervention manuelle n'est nécessaire le procédé doit s'exécuter de lui-même, sans qu'un opérateur humain intervienne dans le processus. Un tel projet implique nécessairement la participation de moyens mécaniques et électroniques.

On souhaite qu'une certaine grandeur physique (vitesse, courant, température) ait une valeur moyenne donnée en régime permanent, malgré l'influence de l'environnement (perturbations). Les méthodes de la régulation automatique ont donc la possibilité de modifier le comportement statique et dynamique d'une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système, afin qu'elles évoluent conformément aux exigences de l'application.

## 1.2 Définition :

**La régulation consiste à maintenir automatiquement une grandeur physique à la valeur désirée quelles que soient les perturbations qui peuvent survenir.**

La régulation d'une grandeur est couramment appelée régulation de procédé.

Exemples de régulation de procédé :

- Régulation du niveau d'un réservoir
- Régulation de la température d'un four
- Régulation de la vitesse d'un moteur
- Régulation du débit dans une canalisation

### 1.3 Analyse des activités dans une chaîne de régulation :

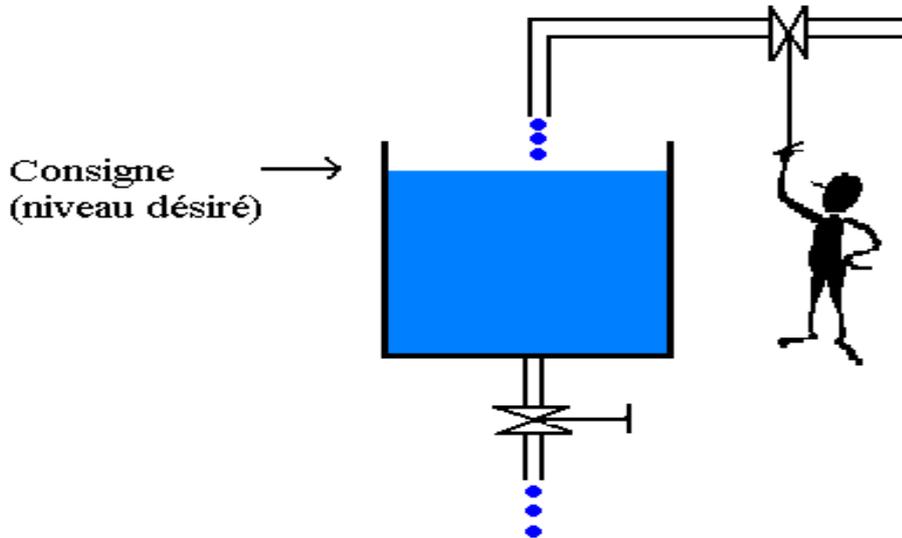


Figure 1-1. Régulation du niveau par un être humain

Pour réguler le niveau dans un réservoir par un être humain, il doit :

- observer le niveau,
- le comparer à la valeur désirée, de raisonner, de décider des action à entreprendre,
- manipuler la vanne en l'ouvrant plus ou moins

**Ces opérations sont effectuées en continu, et chacune influence les autres. Par exemple, si le niveau tend à monter, la personne décide de fermer légèrement la vanne, ce qui diminue le débit et provoque une diminution du niveau.**

La personne surveille le niveau du réservoir et règle le débit afin de maintenir le niveau constant peu importe les variations de pression du réseau de distribution d'eau et le débit de sortie.

Pour maintenir le niveau constant la personne utilise trois organes :

- l'œil pour mesurer le niveau
- le cerveau pour comparer et traiter
- la main pour réagir

Fondamentalement, la régulation du niveau consiste donc à :

#### ACTION

#### PAR

Mesurer

œil



Comparer/Traiter

cerveau



Corriger

main(et la vanne)



Le cycle Mesurer, Comparer et Corriger est un cycle à boucle fermée .

Le schéma de principe de la boucle de régulation est présenté à la Figure2.

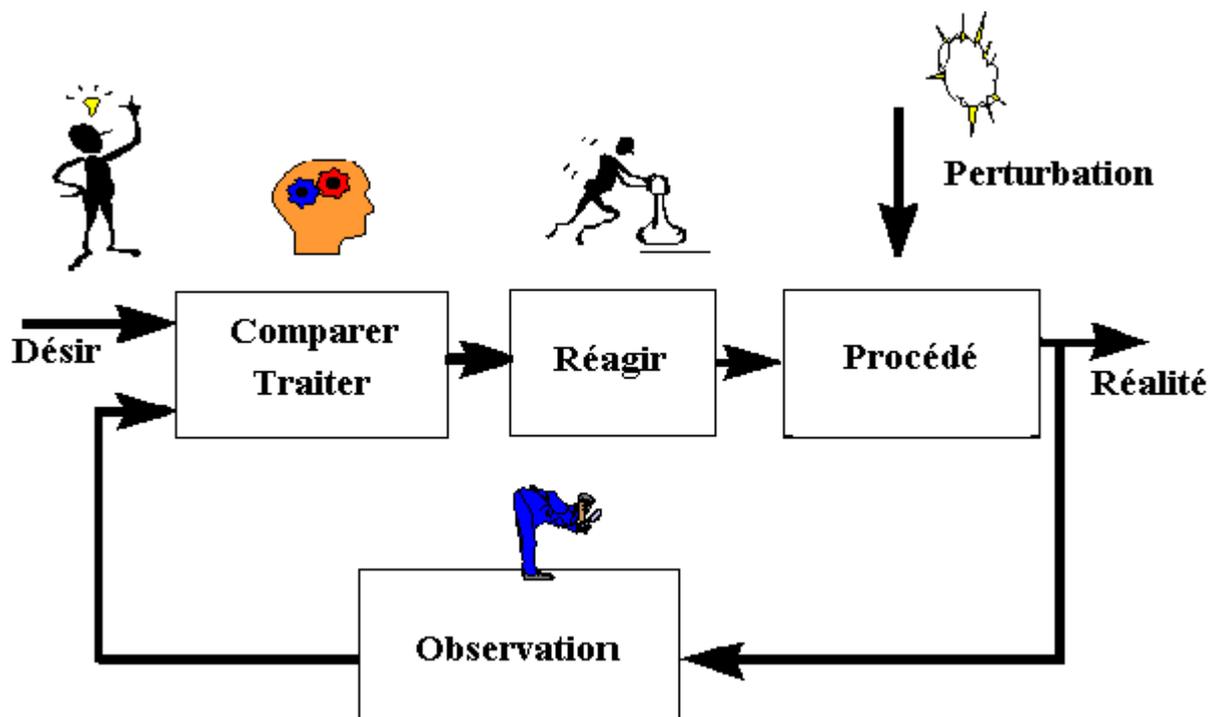
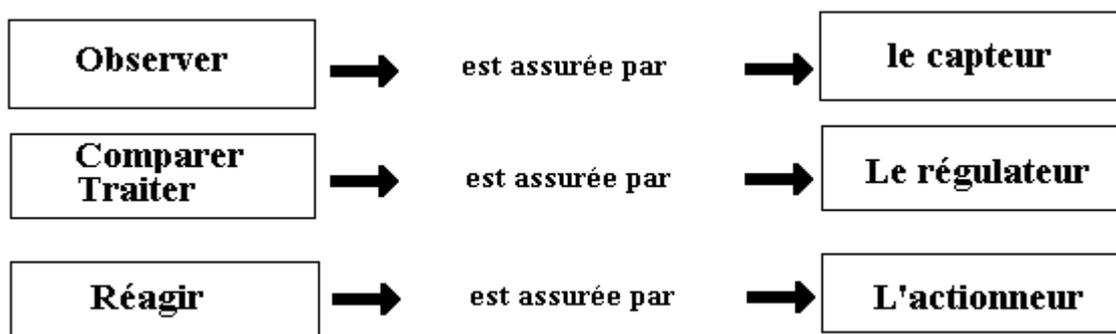


Figure 1-2. Boucle de la régulation

#### 1.4 Les éléments constitutifs d'une boucle de régulation :

Il est possible d'utiliser des appareils pour effectuer la même tâche en réalisant ainsi les mêmes fonctions que l'homme, éliminant ainsi les risques d'erreur. L'installation de figure réalise les mêmes fonctions que la personnes de la figure



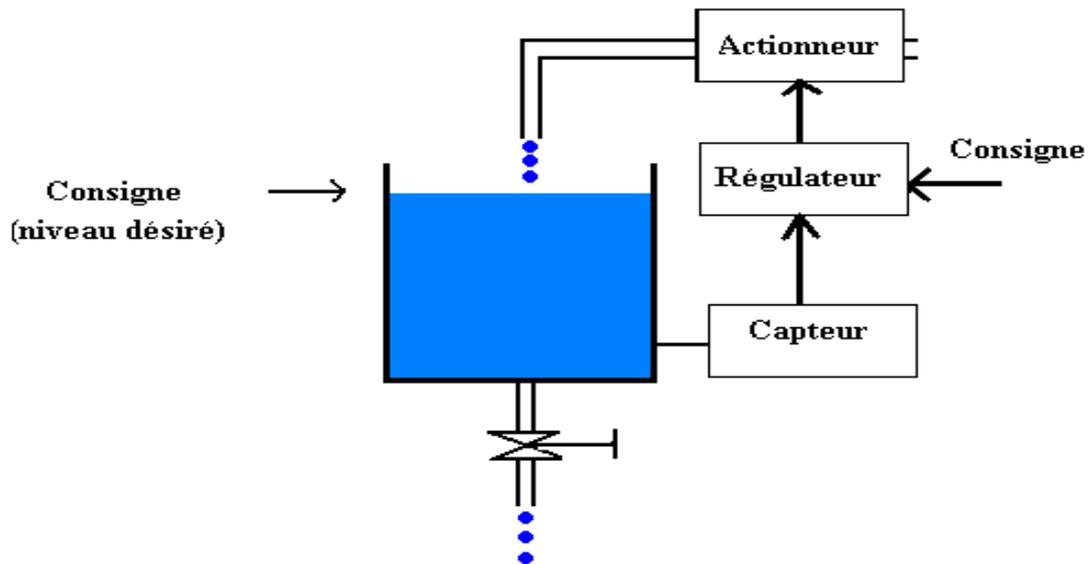


Figure 1-3. Régulation du niveau par des appareils

Le schéma de la régulation devient alors :

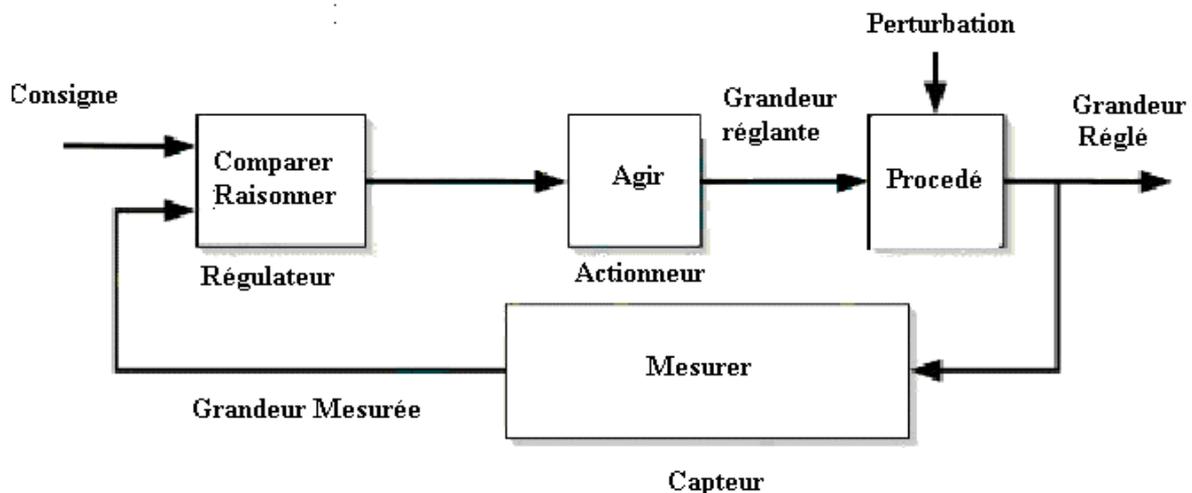


Figure 1-4. Schémas de principe de la régulation

### 1.4.1 Le procédé

Cette portion du schéma de principe représente l'environnement où l'équipement est affecté par le système de commande. L'action de la commande constitue évidemment la source principale de modification de l'état d'équilibre du procédé. Cependant, le procédé est également affecté par des agents perturbateurs extérieurs.

### 1.4.2 La variable manipulée ou grandeur réglante

Il est possible de définir la variable manipulée ou grandeur réglante comme étant la variable qui est modifiée afin d'influencer directement la grandeur physique que l'on tente de réguler. Ainsi, dans une commande de température, la variable manipulée (aussi nommée la grandeur manipulée) serait la puissance fournie à l'élément chauffant.

### 1.4.3 La variable commandée ou la grandeur réglée

C'est la grandeur physique que l'on désire contrôler , *en anglais Process variable*, PV  
Elle donne son nom à la régulation. Par exemple : régulation de température.

**1.4.5 La consigne** : C'est la valeur désirée que doit avoir la grandeur réglée.

**1.4.6 Les grandeurs perturbatrices** sont les grandeurs physiques susceptibles d'évoluer au cours du processus et d'influencer la grandeur réglée.

### 1.4.7 Capteur

Élément primaire de mesure élabore un signal proportionnel à la grandeur physique à mesurer grandeur mesuré(ou mesurande), ce sont donc des organes sensibles, transformant la grandeur à mesurer en un signal électrique, pneumatique, hydraulique ou numérique, normalisé, représentatif de l'information originelle. Puisqu'il est nécessaire de connaître l'effet du signal de commande sur la variable commandée, l'utilisation d'un capteur, que l'on nomme aussi l'élément primaire de mesure, nous permet alors d'en obtenir la mesure. Les caractéristiques électriques de l'élément primaire sont modifiées par une grandeur physique quelconque:

- la température;
- la pression;
- l'humidité;
- l'acidité
- etc.

Puis, cette information électrique est dirigée vers le transmetteur qui se charge alors de convertir cette lecture en un signal normalisé.

### 1.4.8 Le régulateur

On appelle régulateur la partie du système de commande qui compare le signal de mesure ou, en anglais, le « *Process variable*, PV ». avec le signal de consigne ou, en anglais, le « set point,SP et en fonction de l'écart entre ces deux valeurs et de l'algorithme de calcul pour lequel il a été configuré, il délivre un signal de commande dirigé vers l'actionneur afin d'annuler cet écart et de ramener la mesure vers la valeur de consigne .

### 1.4.9 L'élément final de commande

Par ailleurs, le signal de commande élaboré par le contrôleur actionne ce que l'on appelle l'**élément final** de la boucle, c'est-à-dire l'organe actionneur qui travaille généralement à haute puissance. Cet élément final agit sur la **variable manipulée**; c'est-à-dire la variable qui affecte directement le flux d'énergie ou de matériel injecté dans le procédé. Dans une commande de température, l'élément final pourrait être un élément chauffant, la variable manipulée - la puissance électrique fournie à cet élément, et la variable commandée serait, bien entendu, la température.

### 1.4.10 La charge

Tout changement de la variable commandée, qui ne correspond pas à une variation de consigne, devra se traduire par un changement de la variable manipulée en vue de restaurer l'état d'équilibre. Pour cette raison, la valeur du signal de commande est un bon indicateur de l'importance de la charge du système.

Ainsi, supposons qu'un agent perturbateur provoque une chute de température. La valeur de la variable manipulée (courant) devra alors augmenter pour ramener l'erreur à zéro et rétablir la température de consigne. Pour annuler cette perturbation, il y a eu, dans ce cas-ci, une élévation de la charge puisque la température avait chuté.

Donc, la charge symbolise la consommation du système.

Conclusion pour réguler un procédé, il faut :

- Mesurer la grandeur réglée avec un capteur.
- Réfléchir sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- Agir sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage c'est l'actionneur.

Cependant, chaque procédé possède ses exigences propres, chaque appareil possède ses propres conditions de fonctionnement. Il est donc indispensable que la régulation soit conçue pour satisfaire aux besoins particuliers liés à la sécurité, aux impératifs de production et aux matériels

## 1.5 Boucle ouverte et boucle fermé

### 1.5.1 Boucle ouverte

Une boucle est dite ouverte si la grandeur de la correction est indépendante de la grandeur de la mesure, le régulateur est en mode manuel. le mode manuel consiste à laisser à l'utilisateur le choix de la valeur du signal de commande appliquée à l'actionneur.

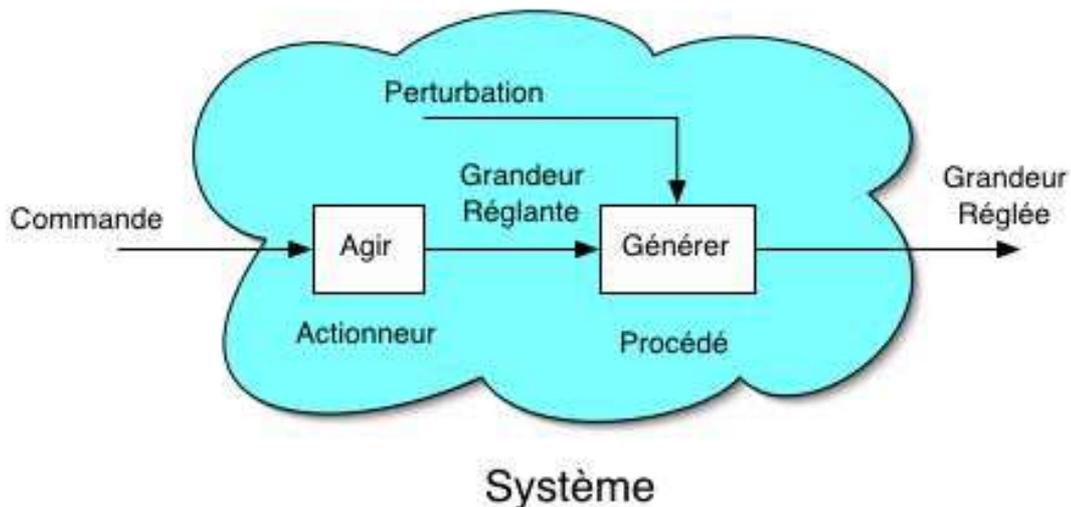


Figure 1-5

### 1.5.2 Boucle fermé

Une boucle est dite fermée si la grandeur de la mesure affecte la grandeur de la correction (grandeur manipulée).

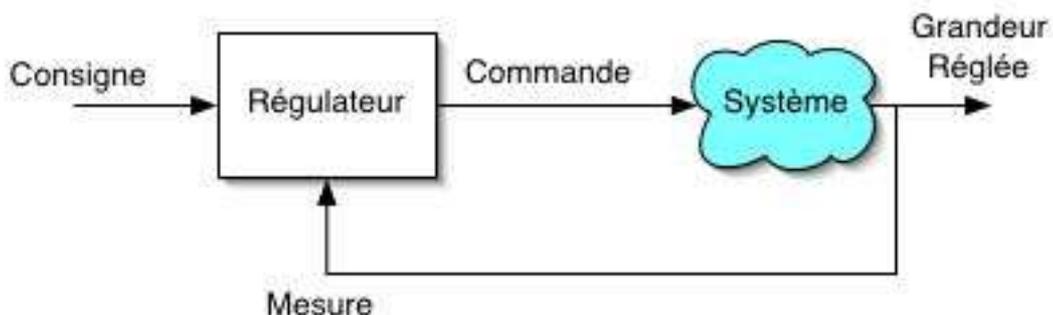


Figure 1-6

## 1.6 Exemples de système de régulation

### 1.6.1 Conduite automobile

Pour maintenir une voiture au centre de la route, un conducteur doit **OBSERVER** la voiture, **COMPARER** la position de celle-ci par rapport au bord de la route, c'est la consigne, et **REAGIR** en conséquence en tournant le volant afin de maintenir la voiture au milieu de la route

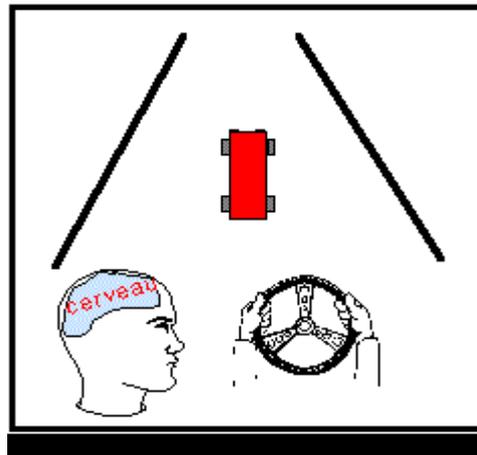


Figure 1-7

Le cycle **OBSERVER** (ou **MESURER**), **COMPARER** et **REAGIR** est un cycle à boucle fermée .

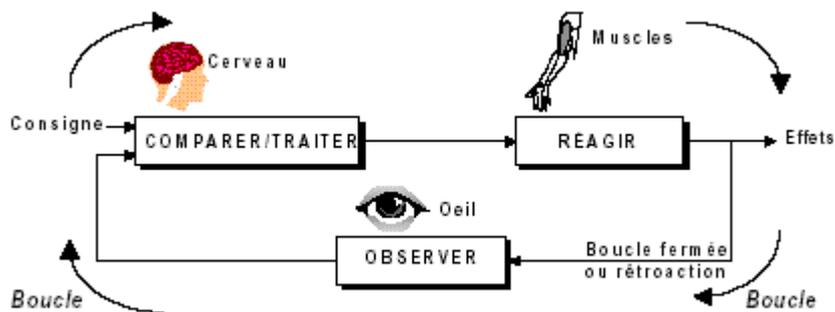


Figure 1-8

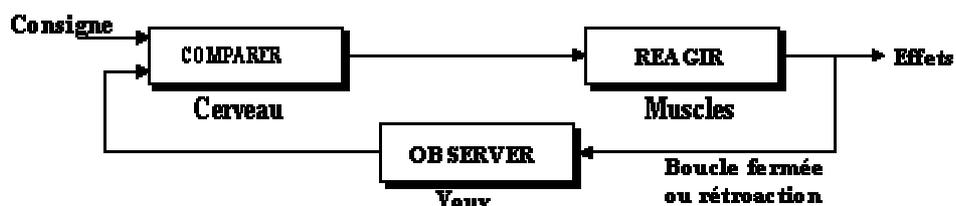


Figure 1-9

### 1.6.2 Régulation de la température d'un four

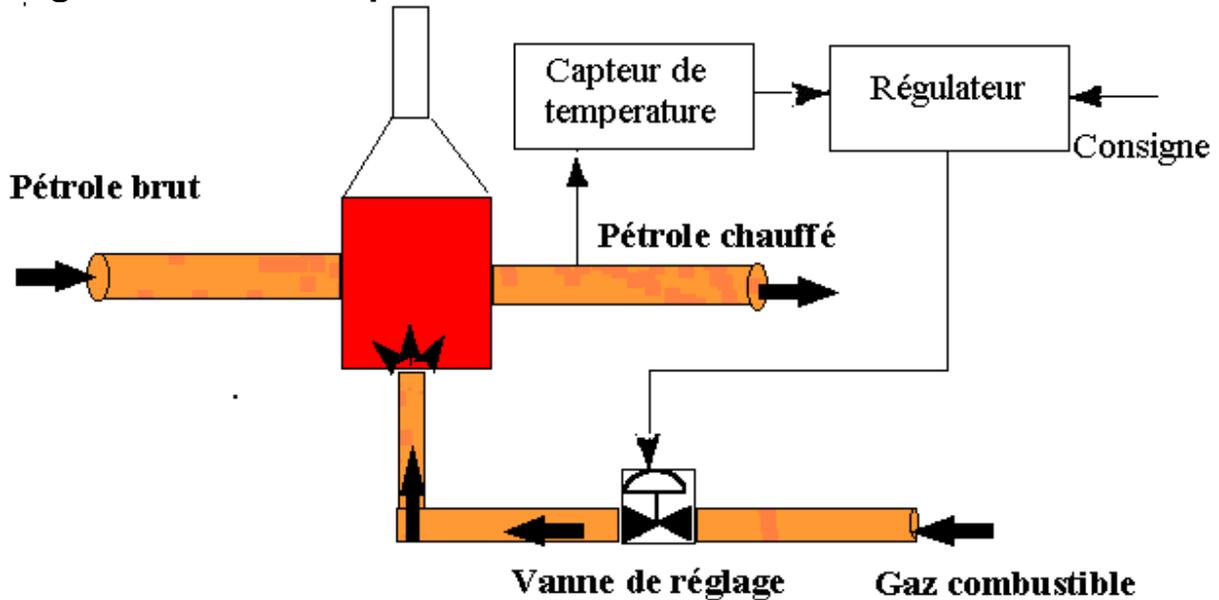


Figure 1-10

### 1.7 Asservissement :

Un **système asservi** ou **suiveur** (en anglais « follow-up system ») travaille plutôt avec une consigne qui change continuellement de valeur. Le système asservi a alors pour fonction d'assujettir la variable commandée afin qu'elle suive aussi fidèlement que possible les changements de consigne : exemple ; une machine outil qui doit usiner une pièce selon un profil donné, un missile qui poursuit une cible sont des systèmes asservis car les consignes changent continuellement. Par contre dans un système de régulation la consigne est fixée et le système doit compenser l'effet des perturbations, à titre d'exemple, le réglage de la température dans un four, de la pression dans un réacteur, le niveau d'eau dans un réservoir.

## 1.8 Terminologie

Tableau -1. Terminologie utilisée pour définir un système asservi		
Système de régulation	Appellation	Définition (et synonyme)
Les éléments	Procédé	Ensemble de l'équipement (excluant l'équipement de contrôle) et des fluides d'une opération industrielle pour laquelle l'alimentation et la demande doivent être équilibrées. (Processus, <i>Process</i> )
	Régulateur	Dispositif qui régule automatiquement l'élément final de commande pour maintenir la variable commandée à la valeur du point de consigne. (Contrôleur, <i>Controller</i> )
	Élément final de commande	Dispositif qui contrôle la variable manipulée du procédé. (Actuateur, <i>Final control element</i> )
	Élément de mesure	Ensemble capteur / transmetteur qui ramène en feedback la mesure de la variable commandée pour qu'elle soit comparée avec le point de consigne. ( <i>Measuring means</i> )
Les signaux	Variable commandée	La variable du procédé qui doit être asservie au point de consigne, indépendamment des perturbations que doit subir ce procédé. (Variable régulée, <i>Controlled variable, Process variable, PV</i> )
	Variable manipulée	La variable du procédé qui doit être modulée par l'élément final de commande pour annuler l'écart entre la variable commandée et le point de consigne. (Grandeur régulante, <i>Manipulated variable</i> )
	Mesure de la variable commandée	Valeur mesurée de la variable commandée: 4-20mA, 0-100%, ... (Feedback, <i>Measured value of controlled variable, Measured value of process variable, PVf</i> )
	Point de consigne	Valeur à laquelle la variable commandée est maintenue par le contrôleur. (Valeur de consigne, Référence, <i>Set point, SP</i> )
	Signal de commande	Signal de sortie du contrôleur appliqué à l'élément final de commande. (Signal de correction, <i>Controller output, Process demand, DM</i> )
	Perturbations	Toutes variables indépendantes, indésirables et souvent imprévisibles qui tendent à modifier la valeur de la variable commandée. (Grandeurs perturbatrices, <i>Disturbances</i> )
La charge	Charge du procédé	Ensemble de toutes les variables (à l'exception de la variable commandée) qui tendent à rompre l'équilibre du procédé. Cette définition inclue les variations à la source, les variations de la demande ainsi que celles du point de consigne. ( <i>Process load</i> )

## 2. Représentation symbolique et schémas

### 2.1 REPRESENTATION PAR LA NORME I.S.A.

La norme de présentation des procédés ISA a été développée par un organisme des États-Unis, la « Instrument Society of America ». La norme ISA est très répandue en Amérique du nord ainsi qu'un peu partout dans le monde.

Le but de cette norme est de représenter les différents éléments et les interconnexions requis pour un procédé de régulation industriel. La définition d'élément regroupe ici tout ce qui est inclus dans la boucle de régulation:

- le capteur;
- le régulateur;
- l'actionneur;
- l'enregistreur;
- le type d'interconnexion.

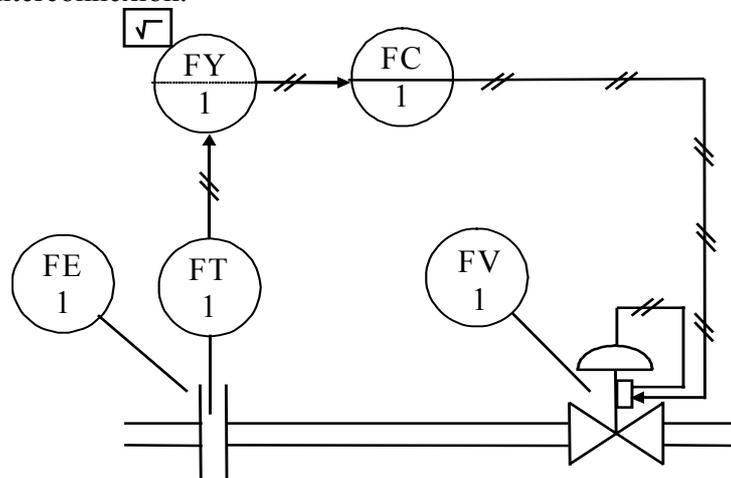


Figure 2-1. Exemple d'utilisation de la norme ISA pour un régulateur de débit

En instrumentation, la norme ISA comprend:

- des lettres majuscules pour préciser les fonctions de chacun des instruments;
- des symboles graphiques représentant les instruments;
- des chiffres et des lettres codés pour l'identification des instruments.

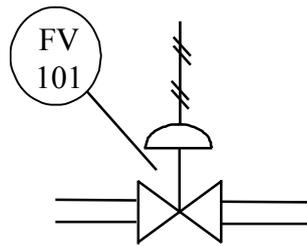
Concrètement, chacun des symboles (voir Figure 2-1 ) se compose:

- d'une étiquette alphanumérique qui désigne la variable commandée et les fonctions de l'appareil;
- d'une représentation graphique de l'appareil;
- de liens avec les autres éléments du système de régulation.

### 2.2 LA SIGNIFICATION DES LETTRES DE L'ÉTIQUETTE

Tout d'abord, il est important de mentionner que chaque symbole représente la fonction d'un appareil en relation avec la variable commandée et non pas l'appareil lui-même. Par exemple, la vanne, qui contrôle le débit de vapeur dans un échangeur de chaleur, est codifiée comme étant une vanne de température plutôt que de débit. L'étiquette de chaque bulle est donc composée de chiffres et de lettres.

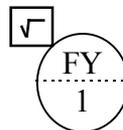
La première lettre indique la variable commandée par la boucle de régulation. Par exemple, pour une boucle de régulation de débit, nous utiliserons le F - « flow » comme première lettre (voir Figure 2-2).



**Figure 2-2 Valve de débit à commande pneumatique**

La seconde lettre indique la fonction de l'élément. Si nous désirons identifier un régulateur, nous utilisons, comme seconde lettre, le C - « controller ».

Lorsque la lettre Y est utilisée en seconde place (Figure 2-3 ), elle indique une fonction de conversion et de calcul. Une abréviation ou un symbole est inscrit à l'extérieur de la bulle afin de préciser cette fonction. Le Tableau 2-1 illustre les principales abréviations des fonctions de calcul et de conversion.



**Figure 2-3 Appareil extracteur de racine carrée pour une boucle de débit**

<b>Tableau 2-1 Principales abréviations de calcul et de conversion</b>	
<b>Abréviation</b>	<b>Fonction</b>
I/P	convertisseur courant à pression
P/I	convertisseur pression à courant
☐	sommation
☐	différence
X	multiplication
☐	extracteur de la racine carrée
f(x)	caractérisation
REV	fonction inverse

Quant à la troisième lettre (qui est facultative), elle représente la fonction du signal de sortie de l'élément. Si nous désirons identifier un commutateur de surpression, la troisième lettre sera S - « switch ».

De plus, il est possible d'utiliser deux lettres pour représenter deux fonctions dans la même étiquette. Toutefois, une étiquette ne peut jamais comporter plus de quatre lettres représentant la variable commandée ainsi que les fonctions de l'appareil; si le nombre de fonctions est plus élevé, il suffit alors d'ajouter des bulles supplémentaires disposées tout près les unes contre les autres.

<b>Lettres les plus utilisées dans la norme ISA</b>			
	Première lettre (Variable commandée)	Deuxième lettre (Fonction de l'instrument)	Troisième lettre (Fonction de la sortie)
A	Analyse	Alarme	
B	Brûleur	Choix de l'utilisateur	Choix de l'utilisateur
C	Conductivité électrique		Régulation ou contrôle
D	Densité ou différentiel		
E	Tension	Élément primaire	
F	Débit - « flow » ou rapport		
H	Commande manuelle - « hand »		Haute - « high »
I	Courant	Indicateur	
L	Niveau - « level »	Lumière	Basse - « low »
M	Humidité - « moisture »		Intermédiaire
O	Choix de l'utilisateur	Choix de l'utilisateur	Choix de l'utilisateur
P	Pression - « pressure »	Point de test	
R	Radioactivité	Enregistreur - « recorder »	
S	Vitesse - « speed »	Sécurité	Commutateur - « switch »
T	Température		Transmetteur
V	Viscosité		Vanne - « valve »
Y	Choix de l'utilisateur	Fonction de conversion et de calcul	Calculateur ou relais

De plus, les lettres sont suivies de la numérotation qui représente chaque boucle de régulation. Si des appareils ne sont pas dans une boucle de régulation, ils portent alors un numéro différent. Sommes toutes, les symboles relatifs à une même variable commandée portent le même numéro.

### 2.3 LA REPRESENTATION DE L'EMPLACEMENT

Toutes les bulles, qui représentent des appareils, sont codées en relation avec l'emplacement physique de l'appareil concerné.

Appareil qui est dans l'usine	
Appareil qui est dans un panneau de commande	
Appareil qui est sur un panneau secondaire (habituellement dans l'usine)	
Appareil qui est dans la salle de commande	

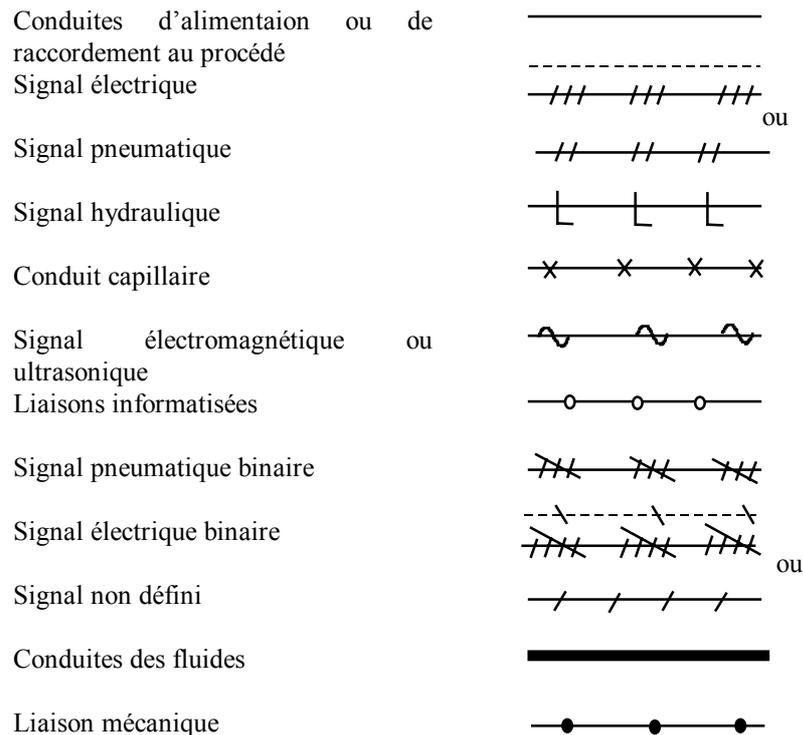
**Figure 2-4 Représentation des appareils selon leur emplacement**

Lorsqu'il est nécessaire de symboliser une séquence programmée (comme dans un automate programmable) ou câblée, on remplace la bulle par un losange. Aussi, on inscrit, à l'intérieur du losange, le numéro de la boucle ainsi qu'un renvoi au plan de la séquence.

Par contre, si la fonction est réalisée par un appareil autonome et que l'information est présentée sur un écran, les bulles ou les losanges sont entourés d'un carré. Celui-ci indique alors que l'affichage est partagée entre plusieurs fonctions et que les informations ne peuvent pas être toutes consultées simultanément.

## 2.4 LA REPRESENTATION DE LA LIAISON

Afin de relier adéquatement les symboles entre eux, la norme ISA stipule que les liaisons sont dessinées selon le type de signal qui y circule. Dans le cas des lignes de connexions et des liaisons mécaniques, le trait plein doit être utilisé.



**Figure 2-5 Lignes de liaison**

Enfin, les alimentations ne sont dessinées que sur les diagrammes de raccordement et les abréviations du Tableau 2-2 sont à utiliser.

<b>Tableau 2-2 Les alimentations</b>	
Abréviation	Alimentation - « supply »
AS	air
ES	électrique
GS	gaz
HS	hydraulique
NS	azote
SS	vapeur - « steam »
WS	eau - « water »

## 2.5 LES SYMBOLES USUELS

Principalement, les symboles servent à illustrer:

- l'élément primaire de mesure;
- les accessoires;
- l'élément final de commande;
- etc.

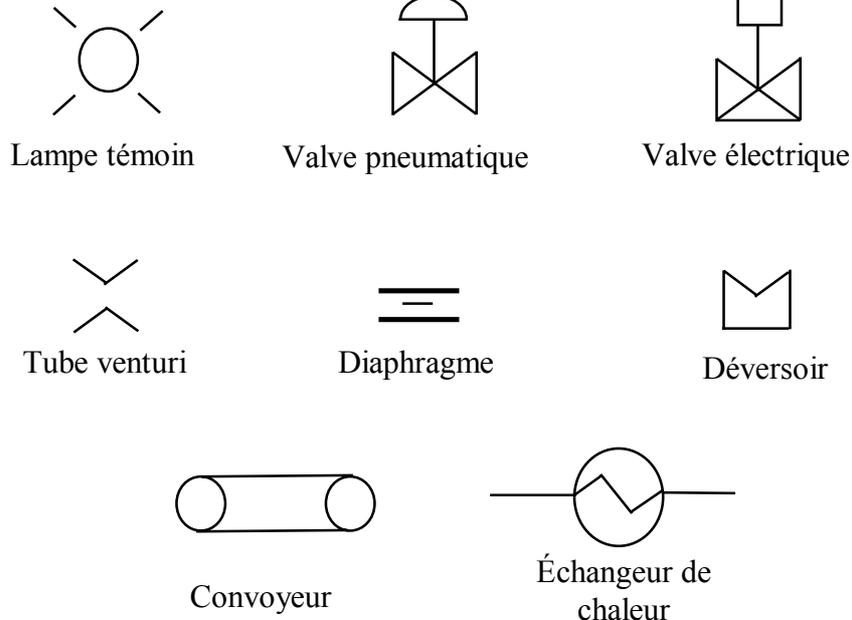


Figure 2-6 Exemples de symboles graphiques

## 2.6 EXEMPLES DE PROCÉDE

Afin de bien maîtriser les notions relatives à la norme ISA, voici présentés les schémas de principe des quatre procédés associés aux postes de régulation Lab-Volt. Ces postes de régulation représentent différents procédés:

- un procédé de niveau;
- un procédé de pression;
- un procédé de température;
- un procédé de débit.

Tout d'abord, analysons le procédé de niveau dont le schéma de principe est fourni à la Figure 2-7.

On remarque qu'une conduite d'alimentation sous pression alimente un réservoir. Puisqu'on tente de réguler le niveau, on manipule donc le débit d'eau qui entre dans le réservoir en modifiant l'ouverture de la valve pneumatique.

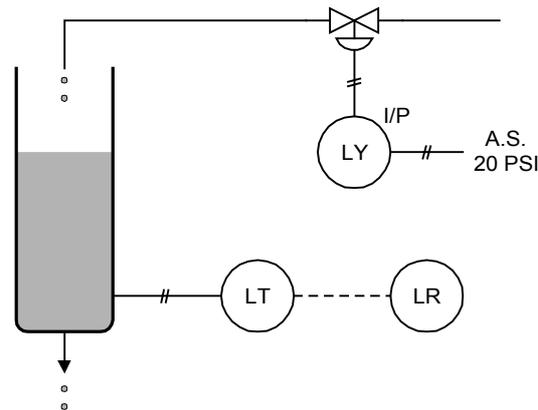


Figure 2-7 Schéma de principe d'un procédé de niveau

Dans un tel procédé, le niveau tend à se stabiliser de par lui-même et ce, sans l'aide d'un régulateur. En effet, lorsque le débit d'entrée est équivalent au débit de sortie, le niveau d'eau devient alors stable. Le débit de sortie étant directement relié à la hauteur de la colonne du liquide, toute augmentation du niveau d'eau tend à augmenter le débit de sortie. Donc, ce procédé peut être qualifié d'auto-régulateur.

L'analyse du schéma de principe nous renseigne sur la variable commandée. En effet, puisque la première lettre des étiquettes est L - « level », c'est bien le niveau du liquide du bassin que l'on veut réguler. Aussi, on constate que l'on enregistre les variations de niveau grâce à un enregistreur (la bulle LR) qui reçoit la mesure de la variable commandée.

Pour ce qui est du procédé de pression (Figure 2-8), il se caractérise par la manipulation du débit du fluide afin de réguler la pression. En effet, tous les éléments de la boucle de régulation possède une étiquette indiquant que la pression est la variable commandée (la première lettre est P - « pressure »).

Le convertisseur courant /pression (la bulle PY - I/P-) est l'élément qui permet le transfert d'une commande électrique, qui est de 4 à 20mA, à une commande pneumatique de 3 à 15 psi. Cette conversion est essentielle car l'élément final de commande est une valve pneumatique et le signal de commande est électrique et non pneumatique.

Aussi, un tel procédé réagit rapidement; c'est pourquoi le système de commande doit également réagir très promptement.

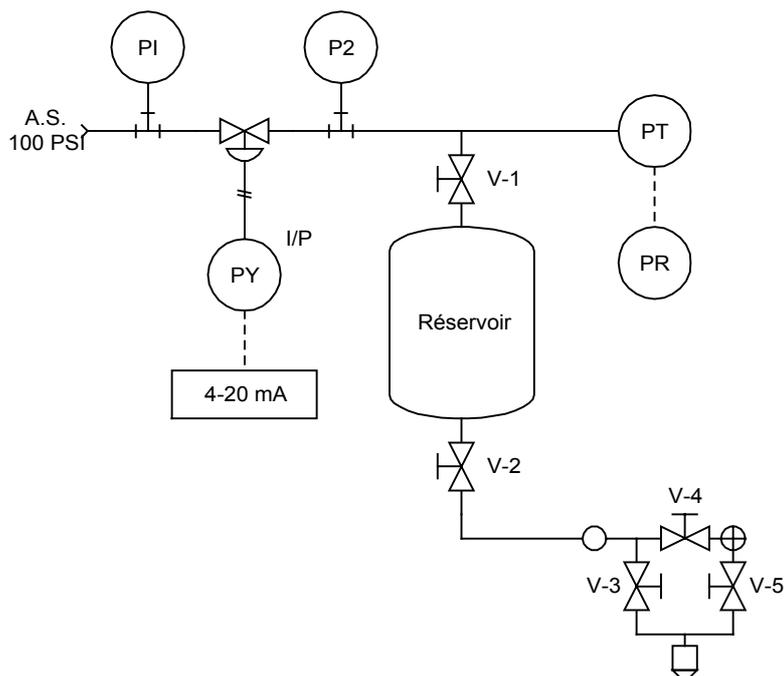


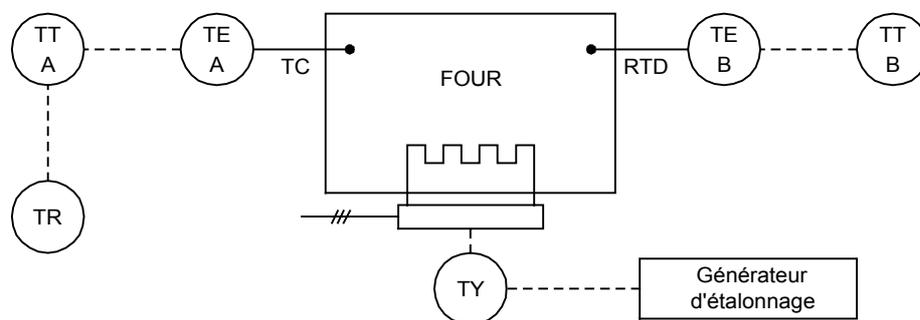
Figure 2-8 Schéma de principe d'un procédé de pression

Quant au procédé de température (Figure 2-929), il est caractérisé par un comportement très lent. Le temps nécessaire, pour atteindre la stabilité à la suite d'un changement quelconque, est souvent de l'ordre des dizaines de minutes. Dans ce procédé, on régule la température du four en manipulant la puissance fournie à l'élément chauffant.

Par ailleurs, il est possible de constater que deux éléments primaires de mesure soient installés dans ce procédé:

- un thermocouple;
- un RTD.

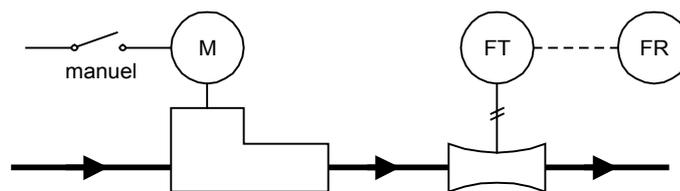
Aussi, l'ensemble des signaux sont de nature électrique, ce qui permet l'utilisation des lignes pointillées pour les liaisons des symboles.



**Figure 2-92 Schéma de principe d'un procédé de température**

Pour le procédé de débit (Figure 2-30), il est à remarquer que ce type de procédé est très fréquemment rencontré en industrie.

Un procédé, où le débit est régulé, réagit aussi très rapidement aux multiples perturbations qui peuvent lui faire perdre son état d'équilibre.

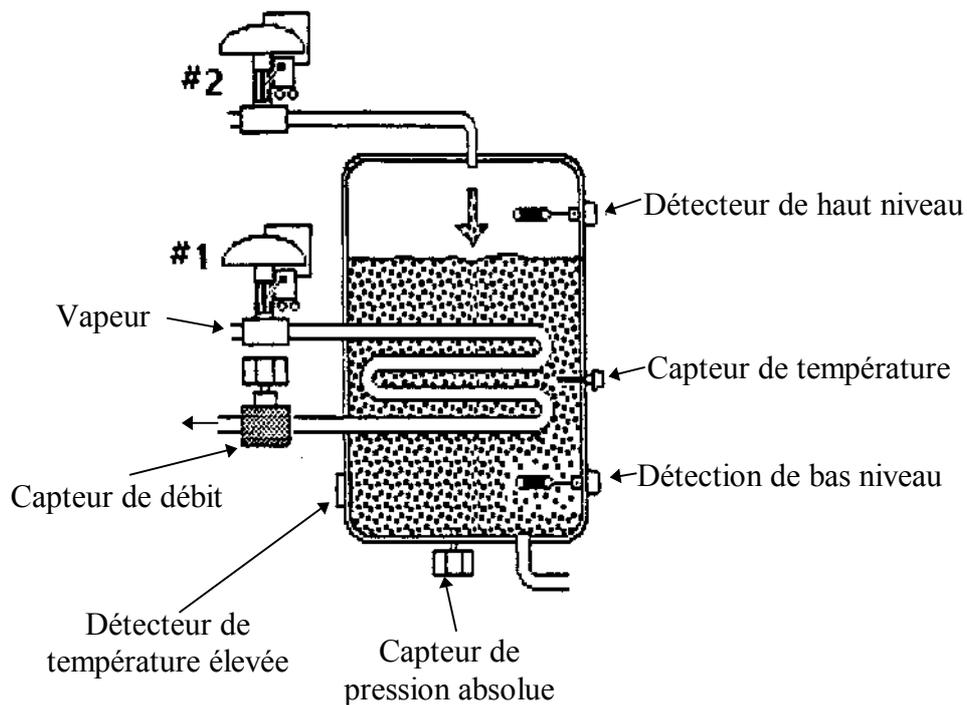


**Figure 2-30 Schéma de principe d'un procédé de débit**

Lors de l'analyse du schéma de principe, on constate que l'élément primaire de mesure (le capteur) est un venturi. En effet, la mesure de pression différentielle que l'on obtient (avec l'aide du transmetteur de pression) est fonction du débit à l'intérieur de la canalisation. Aussi, il est à noter que les symboles utilisent la lettre F- « flow », ce qui est l'indication que le débit est la variable commandée.

## 2.7 EXEMPLE COMPLET

L'exemple suivant nous permettra d'approfondir l'analyse de la norme ISA. Il s'agit d'une boucle de régulation de température industrielle typique.



**Figure 2-41 Procédé de régulation de température**

La boucle de régulation de température (boucle externe) est réalisée par deux boucles (interne et externe) reliées en cascade. C'est donc un système multi-variable.

La température interne du réservoir est obtenue via un thermocouple. Ce dernier est directement relié au régulateur PID #1. La sortie de ce régulateur doit commander le débit de vapeur grâce à l'action de la valve #1. Si on désire avoir une régulation stable et performante, il faut s'assurer que le débit de vapeur réel corresponde bien à ce qui est demandé par le régulateur PID. Ce résultat est assuré par une deuxième boucle placée en cascade (boucle interne). Ce deuxième régulateur PID contrôle le débit de vapeur grâce à un débitmètre placé sur le retour du serpentins. Le régulateur PID utilisé est du type numérique programmable, il offre de nombreuses possibilités dont celle du contrôle en cascade utilisée dans le présent procédé. Sur ce régulateur PID, seules la consigne, la température du procédé et la commande de la valve sont affichées sur le régulateur.

Les deux régulateurs PID (boucles interne et externe) sont inclus dans le programme du régulateur #1.

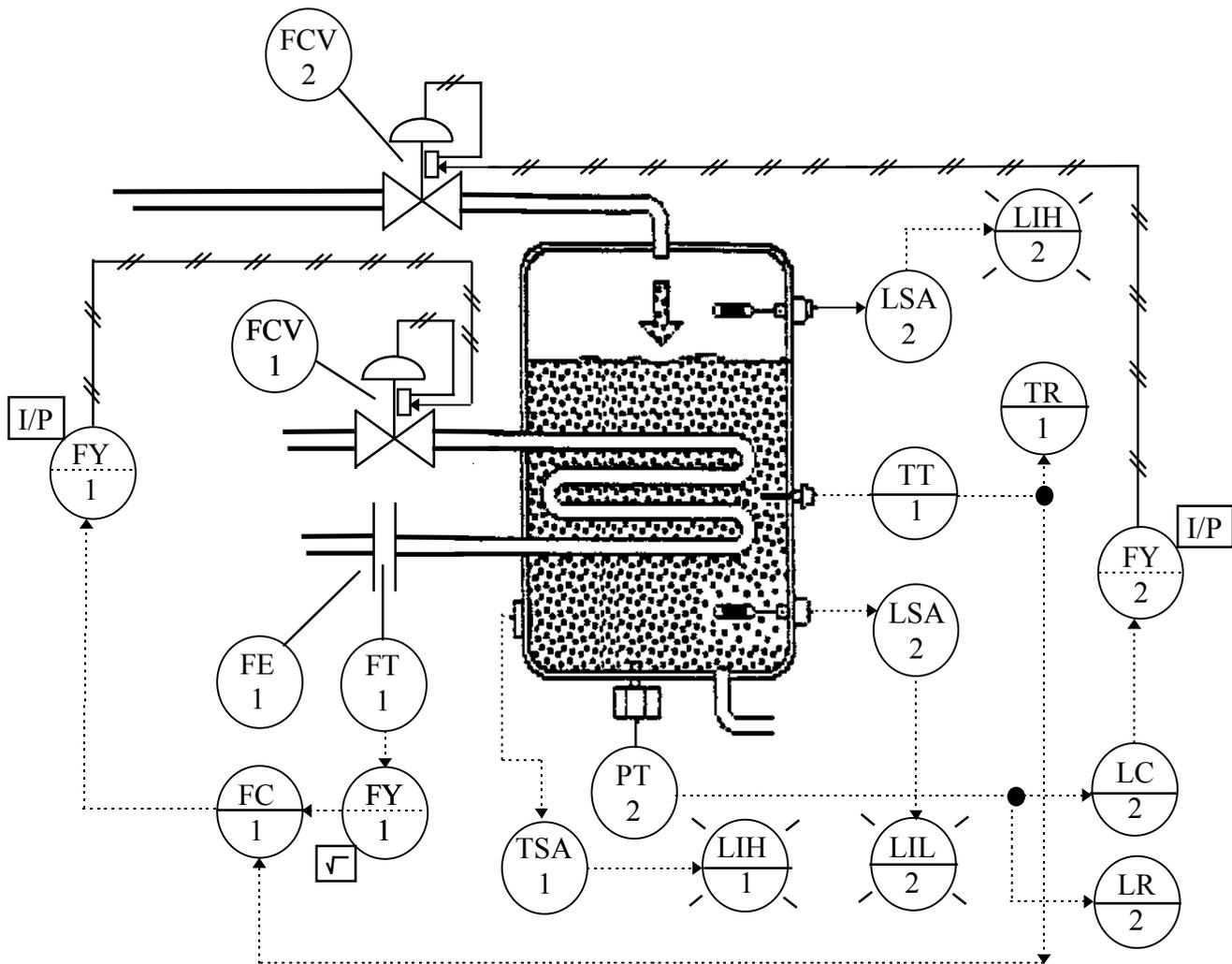


Figure 2-52 Représentation complète du procédé suivant la norme ISA

Analysons maintenant chacun des éléments présents de la Figure 2-52.

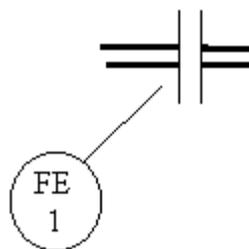


Figure 2-63 Restriction

Ce symbole représente la restriction (causée par la plaque orifice) de l'élément primaire du capteur de débit.

- F = débit - « flow »
- E = élément primaire de mesure « element »

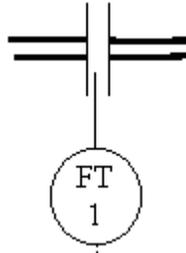
Rappelons que ce type de capteur de débit est constitué d'une restriction au passage du liquide. La relation entre la différence de pression (de part et d'autre de la plaque orifice) et le débit est donné par l':

$$D = K (\Delta P)^2$$

**Equation 2-1**

où :

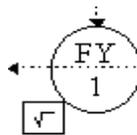
- D est le débit
- $\Delta P$  est la différence de pression sur la plaque orifice
- K est la constante de proportionnalité



**Figure 2-74 Capteur de pression différentielle**

Ce symbole représente le capteur de pression différentielle. Sa fonction est de mesurer la différence de pression sur la plaque orifice (FE/1). La sortie de ce capteur est un signal électrique de 4 à 20 mA.

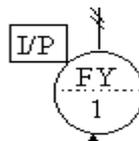
- F = débit - « flow »
- T = transmetteur



**Figure 2-85 Fonction mathématique**

Ce symbole représente une fonction mathématique. Dans ce cas, la sortie de la fonction représente la racine carrée de l'entrée.

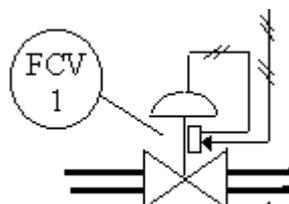
- F = débit - « flow »
- Y = « relay »



**Figure 2-96 Convertisseur courant / pression**

Ce symbole représente le convertisseur courant / pression de la boucle #1. Rappelons qu'aujourd'hui encore, la plupart des vannes industrielles est commandée par des dispositifs pneumatiques. L'ouverture de la vanne dépend d'un signal variant de 3 à 15 PSI. Le régulateur fournit à la vanne un signal électrique de 4 à 20 mA. La fonction du convertisseur I / P est donc de transformer le signal électrique en un signal pneumatique.

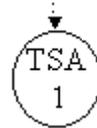
- F = débit - « flow »
- Y = « relay »
- I = courant
- P = pression



**Figure 2-17 Vanne pneumatique**

Ce symbole représente la vanne qui contrôle le débit de vapeur.

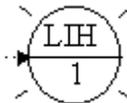
- F = débit - « flow »
- C = régulation - « control »
- V = vanne



**Figure 2-1810 Détecteur de température**

Ce symbole représente un détecteur de température excessive.

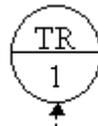
- T = température
- S = commutateur - « switch »
- A = alarme



**Figure 2-19 Indicateur lumineux**

Ce symbole représente l'indicateur lumineux de haute température. La barre dans le centre du cercle indique que la lumière est située sur la console de l'opérateur.

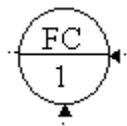
- L = lumière
- I = indicateur
- H = haut - « high »



**Figure 2-110 Enregistreur**

Ce symbole représente la première entrée de l'enregistreur, placée sur la console de l'opérateur (la seconde entrée étant le LR 2).

- T = température
- R = enregistreur - « recorder »



**Figure 2-121 Régulateur**

Ce symbole représente le régulateur de débit de la boucle #1.

- F = débit - « flow »
- C = régulateur - « controller »

## 3 La mesure et les capteurs industriels

Le progrès des technologies utilisées pour la fabrication des capteurs industriels aura permis d'améliorer l'efficacité de la chaîne de mesure. En effet, la multitude de capteurs disponibles permet d'exploiter le système de mesure adéquatement pour toutes les grandeurs physiques que l'on mesure dans une entreprise (température, pression etc.); elles sont mesurées avec la précision qu'exige l'application industrielle visée. Qu'il s'agisse d'une mesure par un système analogique ou numérique, par la reconnaissance et par l'utilisation de standard de transmission reconnu font que les éléments sont de plus en plus fiables et d'utilisation facile.

Le substantif *mesure* représente le résultat de l'action de mesurer, à savoir la valeur de la grandeur physique mesurée. Pour un système de régulation de procédé, cette grandeur physique mesurée exprime, de façon électrique, l'état de la variable que nous voulons réguler. Cette variable qui évolue dans le temps en fonction de perturbation extérieure ou de variation au sein du procédé est communément appelée la grandeur mesurée (« process value » ou PV).

Les méthodes de mesure aussi ont progressé considérablement. Les méthodes de mesure plus traditionnelles par substitution ou par comparaison, ou par une grandeur étalon effectuées en comparaison à partir d'un échantillonnage, sont encore utilisées en contrôle de qualité. Cette méthode, appliquée dans des conditions particulières, est fiable et précise mais elle est plus longue et requiert beaucoup de manipulations de la part du technologue.

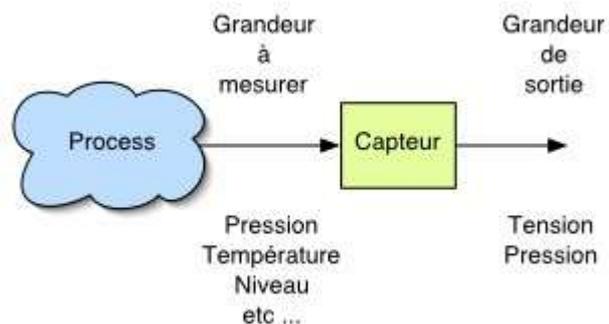
La méthode qui est maintenant la plus répandue est la mesure à l'aide de circuit électronique. Que ce soit avec une chaîne de mesure analogique ou numérique, la valeur de la grandeur physique est traitée, enregistrée ou affichée par un système intégré de plus en plus complet. Pensons notamment aux systèmes de mesure qui, grâce à un algorithme de contrôle, peuvent effectuer une correction (signal de sortie) sur l'environnement de la variable en fonction d'une consigne donnée. Ces systèmes permettent l'affichage, le contrôle et l'enregistrement de la grandeur mesurée par une communication avec un ordinateur si nécessaire. Évidemment, cette méthode de mesure électronique est moins précise que la méthode par substitution, mais la manipulation de la valeur est la plus simple et, de loin, la plus rapide.

L'objectif de ce module est de familiariser le lecteur avec les différents concepts entourant la chaîne de mesure que nous retrouvons en milieu industriel lorsque la lecture d'une grandeur physique devient essentielle. Le capteur

### 3.1 Le capteur

#### 3.1.1 Définition

Un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.



### 3.1.2 Transmission du signal de mesure.

Selon le type de capteur, le signal électrique de mesure peut être de différentes natures : analogique, numérique ou logique.

- **signal de mesure analogique** : il est lié au mesurande par une loi continue, parfois linéaire, qui caractérise l'évolution des phénomènes physiques mesurés. Il peut être de toute nature :
  - courant 0 – 20 mA , 4 – 20 mA.
  - tension 0 – 10 V , 0 – 5 V.
- **signal de mesure numérique** : il se présente sous la forme d'impulsions électriques générées simultanément (mode parallèle, sur plusieurs fils) ou successivement (mode série, sur un seul fil). Cette transmission est compatible avec les systèmes informatiques de traitement.
- **signal de mesure logique** : il ne compte que deux valeurs possibles, c'est un signal tout ou rien.

### 3.1.3 Capteur actif

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement.

Les plus classiques sont :

- **Effet thermoélectrique** : Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente, dont les jonctions sont à des températures  $T_1$  et  $T_2$ , est le siège d'une force électromotrice  $e(T_1, T_2)$ .
- **Effet piézo-électrique** : L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électrique (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées.
- **Effet d'induction électromagnétique** : La variation du flux d'induction magnétique dans un circuit électrique induit une tension électrique.
- **Effet photo-électrique** : La libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement d'une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est inférieure à un seuil caractéristique du matériau.
- **Effet Hall** : Un champs  $B$  crée dans le matériau un champs électrique  $E$  dans une direction perpendiculaire.
- **Effet photovoltaïque** : Des électrons et des trous sont libérés au voisinage d'une jonction PN illuminée, leur déplacement modifie la tension à ses bornes.

Grandeur physique à mesurer	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
	Pyroélectricité	Charge
Flux de rayonnement optique	Photo-émission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photo-électrique	Tension
Force	Piézo-électricité	Charge
Pression		
Accélération	Induction électromagnétique	Tension
Vitesse		
Position (Aimant)	Effet Hall	Tension

Courant

### 3.1.4 Capteur passif

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

- Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.
- Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensiométrie liée à une structure déformable).

Grandeur mesurée	Caractéristique électrique sensible	Type de matériaux utilisé
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre ...
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de Nickel, silicium dopé
	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto résistants : bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur.

Généralement, pour une variation de la résistivité du capteur, nous utiliserons un circuit de résistances en pont; pour les variations du type magnétique ou capacitif, nous utiliserons un pont d'impédances ou un oscillateur.

## 3.2 CHAÎNE DE MESURE

### 3.2.1 Principe d'une chaîne de mesure

La mesure d'une grandeur physique ou chimique consiste à utiliser une suite d'élément afin d'obtenir une indication ou un signal représentatif de cette grandeur .

On appelle chaîne de mesure l'ensemble des éléments ,à partir de l'élément primaire de mesure jusqu'au dispositif final d'indication ,d'enregistrement, de stockage ou de traitement .

### 3.2.2 La chaîne de mesure analogique

La chaîne de mesure analogique illustrée à la figure1 est constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possibles le traitement du signal mesuré et la transmission d'un signal normalisé 4-20mA.

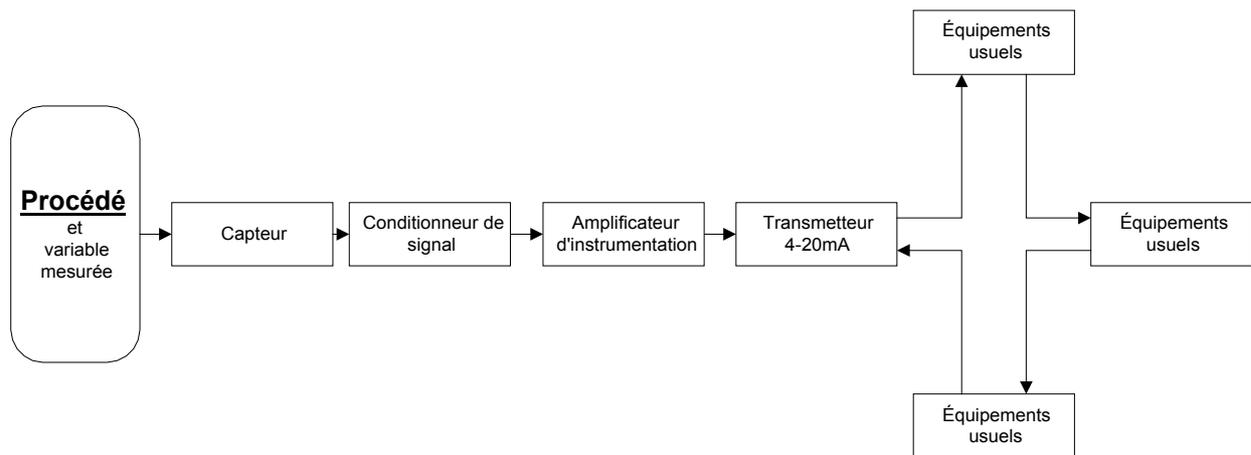


Figure 3-1 Schéma de principe d'une chaîne de mesure analogique

Pour optimiser et exploiter adéquatement la variable mesurée, des blocs fonctionnels assurent un conditionnement du signal exempt de bruit, linéaire et compensé thermiquement. Voici la description des blocs que nous retrouvons dans ce schéma de principe.

1. *Procédé et variable mesurée* : Environnement dans lequel évolue la variable mesurée, occasionnellement appelée la mesurande.
2. *Capteur* : Élément primaire de mesure qui subit une modification de ses caractéristiques intrinsèques.
3. *Conditionneur de signal* : Un ensemble de circuits qui délivre un signal électrique proportionnel à la variation du capteur soumis à une contrainte physique. Le conditionneur de signal comporte dans certains cas des circuits d'amplification bas niveau, des circuits de linéarisation ou de compensation thermique, ou des circuits de traitement du bruit. Pour d'autres cas, nous retrouvons simplement un circuit en pont ou un oscillateur.
4. *Amplificateur d'instrumentation* : Circuit d'amplification aussi appelé amplificateur différentiel de signal. Ce circuit électronique est utilisé pour amplifier des signaux qui sont en mode différentiel, par exemple, un signal de ligne balancée ou d'un pont de mesure. Un des principaux avantages de cet amplificateur est qu'il possède un grand taux de rejet du bruit.
5. *Transmetteur 4-20mA* :

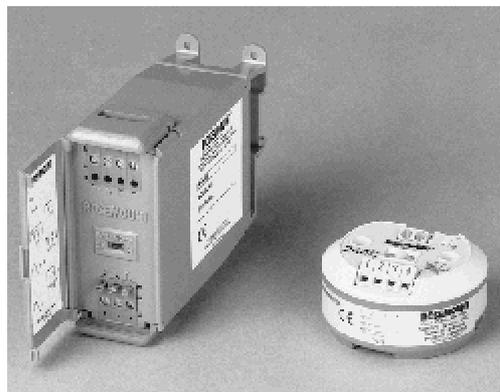


Figure 3-2 Transmetteurs

*Le transmetteur*: Un ensemble d'éléments électroniques qui conditionne, amplifie et transmet un signal électrique normalisé en fonction de la variation que subit le capteur. En principe, le signal de sortie est transmis sur une boucle de courant normalisée 4-20mA correspondant linéairement à la gamme de mesure reproduite.

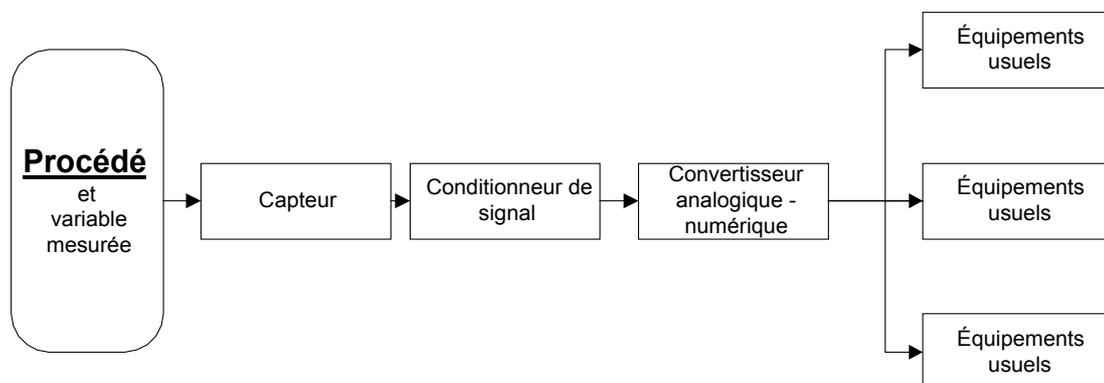
La fiabilité d'un tel dispositif en terme de détection rapide de rupture de ligne, de transport sur une grande distance avec un faible taux de bruit sans perte de signal et la précision du transfert de la grandeur mesurée en font l'une des normes des plus reconnues. Par exemple, pour une gamme de mesure de 0°C à +50°C, le transmetteur fournira un signal de 12mA pour une température mesurée de +25°C.

6. *Équipements usuels* : Beaucoup d'instruments de mesure et de contrôle de procédé, commercialisés par les fabricants, possèdent une entrée analogique 1-5V. À l'aide d'une résistance de 250Ω de précision, un signal venant d'un transmetteur 4-20mA peut facilement être exploité puisque le transfert de 4-20mA, dans une résistance de 250Ω, donne un signal standardisé 1-5V. Les instruments usuels sont :

- l'enregistreur ;
- l'afficheur ;
- le régulateur de procédé ;
- le système d'acquisition de données ;
- le système de gestion des alarmes.

### 3.2.3 La chaîne de mesure numérique

Les progrès de l'électronique numérique ont influencé considérablement le domaine de la mesure en milieu industriel. Les circuits de conversion de signal analogique à numérique (« A/D converter ») et l'utilisation grandissante des micro-contrôleurs spécialisés, dédiés et autonomes ont facilité le traitement et la transmission numérique de signaux de mesure. En effet, nous retrouvons des standards de communication série pour transmettre des signaux entre les différentes unités du système industriel. Il suffit de doter l'ensemble de mesure d'un système à micro-contrôleur pour faciliter le traitement et la communication. En effet, la chaîne de mesure numérique illustrée à la est constituée de circuits permettant d'effectuer le traitement numérique de l'information.



**Figure 3-3 Schéma de principe d'une chaîne de mesure numérique**

Voici la description des blocs que nous retrouvons dans ce schéma de principe.

1. *Procédé et variable mesurée* : Environnement dans lequel évolue la variable mesurée, occasionnellement appelée la mesurande.
2. *Capteur* : Élément primaire de mesure qui subit une modification de ses caractéristiques intrinsèques.
3. *Conditionneur de signal* : Circuit qui délivre un signal électrique proportionnel à la variation du capteur soumis à une contrainte physique. Dans ce cas, le conditionneur de signal comporte beaucoup moins de circuits électroniques. En effet, les opérations de linéarisation et de compensation peuvent avantageusement être effectuées par le micro-contrôleur.

4. *Convertisseur analogique à numérique* : Circuit intégré avec ou sans échantillonnage, permettant le transfert du signal électrique analogique en code binaire pour une plage donnée. Dans certaines applications, le convertisseur fait partie d'un ensemble intégré à base de microcontrôleur. Dans ce cas, nous retrouvons des fonctions complexes de filtre numérique du signal d'entrée, de fonctions de transfert particulières ou de linéarisation. La fréquence de l'échantillonnage (contrôlée de façon matérielle ou logicielle) doit être beaucoup plus élevée que la fréquence du signal mesuré pour obtenir une conversion optimale et pour une représentation numérique du signal valable.
5. *Équipements usuels* : Circuit à base de microprocesseur (micro-ordinateur, micro-contrôleur ou autre) pour le traitement numérique du signal ou pour des fonctions d'instrumentation :
  - transmission numérique ;
  - afficheur numérique ou enregistreur numérique ;
  - système d'acquisition de données et gestionnaire d'alarmes.

### 3.2.4 Le transmetteur "intelligent"



Figure 3-4 Transmetteur intelligent

Le transmetteur intelligent est un transmetteur muni d'un module de communication et d'un microcontrôleur :

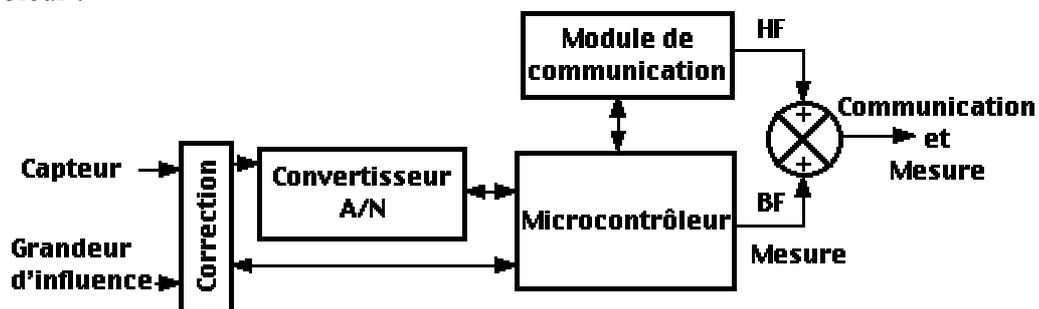


Figure 3-5 Structure d'un transmetteur intelligent

Le module de communication permet :

- De régler le transmetteur à distance ;
- De brancher plusieurs transmetteurs sur la même ligne.

Le microcontrôleur permet :

- De convertir la mesure en une autre grandeur, appelée grandeur secondaire. Par exemple, il peut convertir une mesure de différence de pression en niveau (voir chapitre sur les mesures de niveau).
- De corriger l'influence des grandeurs d'influence sur la mesure.

### **3.3 LES CARACTERISTIQUES GENERALES DES CAPTEURS**

Toutes les opérations de commande sont basées sur une mesure. Il en résulte que les capteurs sont conçus pour reproduire la plus grande variation possible à la sortie pour une variation donnée à l'entrée. À l'instar de tout dispositif de mesure de qualité, ils doivent avoir un comportement stable, reproductible et fiable. Avant d'aborder systématiquement l'étude des principes de fonctionnement des capteurs, il serait bon de préciser quelques caractéristiques générales utilisées pour spécifier les capteurs.

Bien que certaines caractéristiques de capteurs soient standardisées, il serait préférable de se référer toujours aux procédures que le fabricant a utilisées pour apprécier les caractéristiques du capteur. En effet, la plupart des conditions de test n'est pas uniformisée et le vocabulaire utilisé est totalement différent d'un fabricant à l'autre, voire d'une nationalité à l'autre.

Voici un aperçu général des caractéristiques usuelles d'un capteur; les plus importantes sont:

- limites d'utilisation ;
- étendue de mesure;
- sensibilité ;
- résolution ;
- linéarité ;
- fidélité, justesse, précision
- classe de précision
- répétabilité ;
- hystérésis ;
- finesse ;
- temps de réponse.

Voici l'exemple qui illustre les caractéristiques d'une cellule de charge - capteur permettant la mesure d'une masse.

**Tableau 3-1: Spécifications d'une cellule de charge**

Capacité nominale (« Rated capacity (R.C.) »)	50Kg
Signal de sortie nominal (« Rated output (R.O.) »)	2mV/V $\pm$ 0,5%
Sensibilité (« Sensitivity »)	2mV/V/50Kg
Non- linéarité (« Non linearity »)	0,03% R.O.
hystérésis (« Hysteresis »)	0,03% R.O.
Répétabilité (« Repeatability »)	0,03% R.O.
Résistance en pont (« Terminal resistance »)	input: 350 $\Omega$ $\pm$ 3.5 $\Omega$ output: 350 $\Omega$ $\pm$ 5 $\Omega$
Résistance d'isolation (« Insulation resistance »)	bridge to ground: 2000M $\Omega$ shield to ground: 1000M $\Omega$
Alimentation recommandée (« Excitation recommended »)	10V
Alimentation maximale (« Excitation max. »)	15V
Charge maximale (« Safe overload »)	150% R.C.

### 3.3.1 Les limites d'utilisation

Les limites d'utilisation définissent les limites extrêmes (inférieure et supérieure) de la grandeur physique que l'on peut reproduire sans détériorer ou modifier les caractéristiques métrologiques du capteur. C'est une caractéristique nominale fournie par le fabricant du capteur.

La gamme de mesure de la chaîne de mesure ne doit jamais excéder les limites d'utilisation du capteur.

### 3.3.2 L'étendue de mesure

En anglais « span », l'étendue de mesure est la différence algébrique entre les valeurs extrêmes (minimale et maximale) pouvant être mesurée par la chaîne de mesure. L'étendue de mesure doit être obtenue à l'intérieur des limites d'utilisation du capteur. Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée **pleine échelle**.

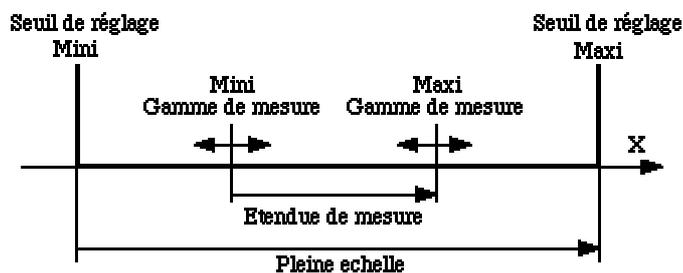


Figure 3-6 Axe de grandeur X

### 3.3.3 L'erreur absolue et l'erreur relative et l'erreur systématique

L'erreur absolue est la valeur de l'erreur directement liée à la mesure. Par exemple, si le capteur a une valeur nominale de  $100\Omega$ , et que l'on spécifie une incertitude de  $0,2\Omega$ , on notera l'erreur absolue à  $\pm 0,2\Omega$ .

L'erreur relative est le rapport entre l'erreur absolue sur le résultat de la mesure. Pour le capteur précédent, nous avons une erreur relative de  $\frac{0,2\Omega}{100\Omega} \times 100 = 0,2\%$ .

L'erreur systématique pour une valeur donnée, exprime l'écart entre la valeur mesurée et la valeur recherchée, soit la valeur nominale, en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure.

Par exemple, pour une chaîne de mesure dont l'étendue de mesure est de  $200^\circ\text{C}$ , on mesure, dans des conditions données, une température de  $+50,2^\circ\text{C}$  comparée à une valeur nominale ou de référence de  $+50,0^\circ\text{C}$ . L'erreur systématique (souvent appelée l'erreur de précision d'échelle) est donc de

$$\frac{0,2}{200} \times 100 = 0,1\%$$

### 3.3.4 La sensibilité

De façon générale, cette caractéristique traduit le rapport entre la variation du signal de sortie et la variation du signal d'entrée pour une plage d'utilisation donnée. Si le capteur possède une fonction de transfert linéaire sur toute la gamme d'utilisation, la sensibilité sera unique pour toute l'étendue de mesure. Toutefois, si le capteur possède quelques imperfections, le fabricant fournira la sensibilité pour différents points de la fonction de transfert. Le calcul de la pente de la tangente à un point donné du graphique, exprimant le signal de sortie en fonction de la grandeur mesurée, donne la sensibilité au point donné.

Des exemples de sensibilité:

- mesure de température :  $10\text{mV}/^\circ\text{C}$  ;

- mesure de débit : 1mA/Litre/sec ;
- mesure de vitesse : 12pas/sec.

Pour certains capteurs, la sensibilité est influencée par l'alimentation. C'est souvent le cas pour des capteurs de température ou des capteurs de pression dont le transducteur est basé sur un pont de mesure. Des exemples:

- mesure de température : 1mV/V/°C ;
- mesure de pression : 10mV/V/kPa.

Dans le cas d'une sensibilité de 1mV/V/°C, pour chaque volt d'alimentation, le signal de sortie augmentera de 1mV pour une augmentation de la température de 1°C. Donc, si le circuit est alimenté à l'aide d'une source de 10V, nous pouvons considérer que la sensibilité de sortie est de 10mV/°C. Mais attention, si vous modifiez l'alimentation, la sensibilité sera affectée.

Nous pouvons augmenter la sensibilité du capteur précédent, si nous augmentons l'alimentation du circuit. Mais attention, cette nouvelle alimentation doit respecter les caractéristiques du capteur fournies par le fabricant concernant les limites de l'alimentation.

Si nous alimentons le circuit à l'aide d'une source de 20V et que cette tension est dans les limites technologiques du capteur, la sensibilité sera augmentée à 20mV/°C. Ce qui correspond aussi à une multiplication du gain du circuit par 2.

### 3.3.5 La résolution

La résolution de la chaîne de mesure nous informe de la plus petite valeur que le système peut mesurer avec précision. Normalement, cette caractéristique est fournie dans le cas d'une chaîne de mesure possédant une interface numérique (convertisseur a/n ou n/a) à une étape de la conversion. Plus le convertisseur aura de bits, meilleur sera la résolution. on définit la résolution par la formule suivante :

$$\text{Résolution} = \frac{\text{étendue de la mesure}}{\text{Nombre de point de mesure}}$$

Pour un convertisseur 8 bits (256 codes de \$00 à \$FF), effectuant la conversion d'un signal de mesure de la vitesse de moteur pour une gamme de 0000-5000 tours/minute, recevant à son entrée un signal électrique de 0-10v, la résolution sera d'environ 39,2mV. En effet, considérant 255 paliers (256 codes - 1) pour une conversion 0-10V , nous aurons:

$$10 \text{ volts} / 255 \text{ paliers} = 39,2\text{mV/palier}$$

$$5000 \text{ tpm} / 255 \text{ paliers} = 19,6 \text{ tpm/palier}$$

Alors, pour chaque multiple du signal mesuré de 39,2mV, correspond un multiple de vitesse de 19,6tpm.

Donc, si le capteur de la vitesse du moteur apporte un signal de +4,3v à l'entrée du convertisseur, celui-ci fournira un code équivalent aux paliers 109(\$6D) ou 110(\$6E). Le choix entre les deux valeurs sera aléatoire et dépendra du comportement du convertisseur. Alors, la vitesse affichée sera de 2136,4tpm ou 2156,0 soit exactement 19,6tpm de plus.

Or, le système numérique ne pourra pas afficher la vitesse réelle qui est de 2150,0tpm puisque la résolution ne le permet pas.

### 3.3.6 La linéarité

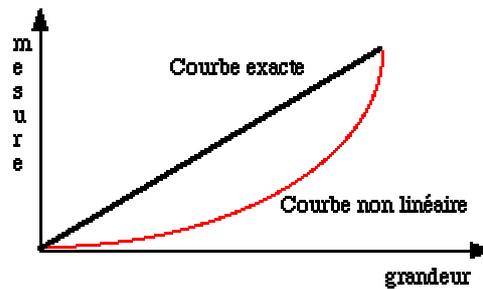


Figure 3-7 Linéarité

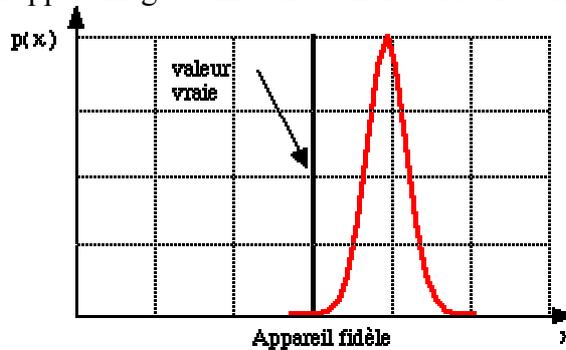
L'erreur de linéarité spécifie le plus grand écart entre la courbe d'étalonnage et une ligne droite appelée « meilleure droite ». L'écart de linéarité s'exprime en % de l'étendue de mesure comme l'erreur systématique.

La fonction de transfert est linéaire dans une plage déterminée si les variations du signal de sortie (la variable dépendante) sont proportionnelles aux variations de la grandeur mesurée (variable indépendante). Si la sensibilité est la même sur toute la plage d'utilisation du capteur, il en résulte un capteur linéaire. Les écarts de cette droite sont appelés écarts de linéarité; ils sont spécifiés en pourcentage de l'étendue de mesure par rapport à la droite idéale (erreur systématique).

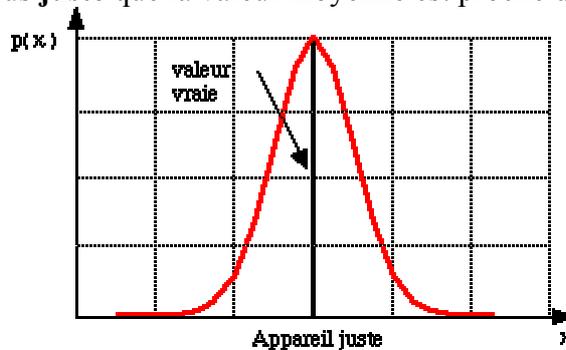
Par exemple, un capteur de température dont la gamme de mesure est de  $-50^{\circ}\text{C}$  à  $+100^{\circ}\text{C}$  possède un « span », étendue de mesure de  $150^{\circ}\text{C}$ . Si le fabricant spécifie un écart de 0,05% pour une mesure de  $50^{\circ}\text{C}$ , alors le capteur peut donner une erreur de  $0,075^{\circ}\text{C}$  (0,05% de  $150^{\circ}\text{C}$ ) à  $50^{\circ}\text{C}$ , ce qui n'est pas si mal. Évidemment, plus le chiffre est petit, meilleur est le capteur.

### 3.3.7 Fidélité, justesse, précision

La **fidélité** est la qualité d'un appareillage de mesure dont les erreurs sont faibles



Un instrument est d'autant plus **juste** que la valeur moyenne est proche de la valeur vraie.



Un appareil **précis** est à la fois fidèle et juste.

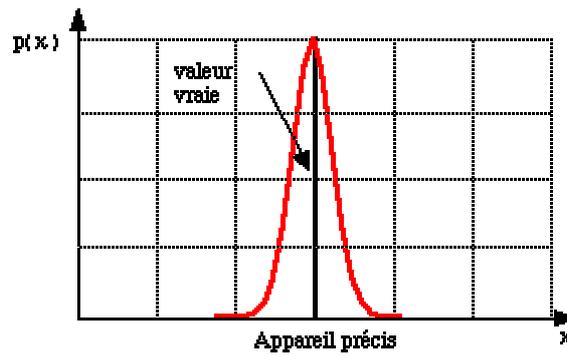


Figure 3-8 Fidélité

En pratique, la précision est une donnée qui fixe globalement l'erreur maximum (en + ou en -) pouvant être commise lors d'une mesure. Elle est généralement exprimée en % de l'étendue de mesure.

Pour les applications courantes, la précision d'un capteur industriel est comprise entre  $\pm 0,5\%$  et  $\pm 2,0\%$  de l'étendue de mesure.

### 3.3.8 Classe de précision

La classe d'un appareil de mesure correspond à la valeur en % du rapport entre la plus grande erreur possible sur l'étendue de mesure.

$$\text{Classe} = 100 \times \frac{\text{Plus grande erreur possible}}{\text{étendue de mesure}}$$

### 3.3.9 La répétabilité

Un capteur idéalement précis reproduira toujours le même signal de sortie lorsque soumis à une même grandeur physique. Cette caractéristique est généralement exprimée en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure pour une valeur donnée.

### 3.3.10 L'hystérésis

Un capteur est soumis à une variation croissante de la grandeur mesurée, puis subit la même variation décroissante. Idéalement, le point de retour devrait être le même que le point de départ. Si ce n'est pas le cas, nous obtenons une erreur de réversibilité due à l'hystérésis du capteur. Cette caractéristique est généralement exprimée en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure pour une valeur donnée.

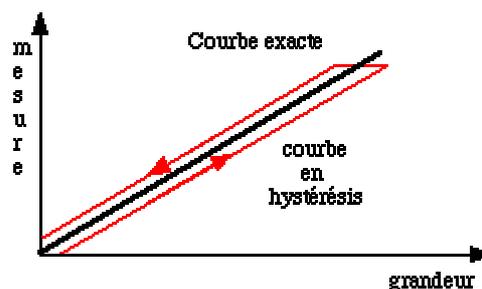


Figure 3-9 Hystérésis

### 3.3.11 La finesse

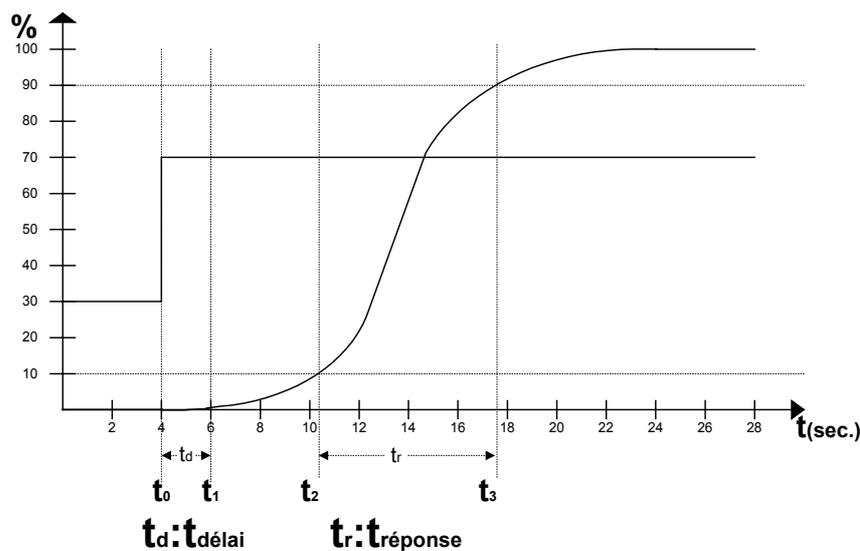
Qualité exprimant l'aptitude d'un capteur à donner la valeur de la grandeur à mesurer sans modifier celle-ci par sa présence.

Par exemple, certains hygromètres vaporisent de l'eau (psychrométrie) pour mesurer l'humidité de l'air. Une telle opération modifie l'humidité de l'air. Cette opération doit être prise en compte lors de l'établissement de l'humidité réelle mesurée.

### 3.3.12 Le temps de réponse

Le temps de réponse, ou temps de montée, est l'intervalle de temps que prend le signal de sortie pour retrouver un nouvel équilibre après une variation brusque de la grandeur à mesurer. Certains fabricants de capteur considèrent que le temps de réponse (ou temps de montée) est l'intervalle de temps qui s'écoule entre le moment où la sortie du capteur passe de 10% à 90% de sa variation sur une échelle normalisée.

La figure illustre la réponse temporelle d'un capteur subissant une variation instantanée de la grandeur mesurée. Il est à remarquer qu'un capteur requiert un certain délai avant d'être influencé par la grandeur physique à reproduire. Cette caractéristique est nommée *le temps de délai*.



**Figure3-10: Représentation de la réponse temporelle d'un capteur**

### 3.4 METHODE DE CHOIX DES CAPTEURS INDUSTRIELS

Pour choisir correctement le capteur industriel pour une application donnée, la démarche proposée se fera en tenant compte de trois informations:

1. définition du cahier des charges ;
2. considérations techniques externes affectant le choix du capteur ;
3. caractéristiques intrinsèques du capteur.

Il sera important d'être bien documenté chez les fournisseurs pour connaître les technologies et les dispositifs disponibles sur le marché. Le choix adéquat du capteur sera fait en considérant une foule de compromis en fonction des caractéristiques générales de la mesure.

#### 3.4.1 Définition du cahier des charges

Les critères de choix sont déterminés en fonction de l'environnement où la mesure sera prise, la qualité de la mesure demandée et la disponibilité financière.

Prioritairement, nous devons définir le besoin:

- lisez attentivement le cahier des charges pour identifier précisément:
  - a) la nature et le type de grandeur physique à mesurer ;
  - b) la précision demandée par l'application ;
  - c) le signal de sortie requis ;
  - d) les contraintes financières ;
- déterminez la technologie appropriée pour l'application:
  - a) électrique ;
  - b) électronique ;
  - c) mécanique ;
  - d) pneumatique ;
  - e) hydraulique ;
- faites le choix de l'élément de mesure :
  - a) en fonction du cahier des charges ;
  - b) en fonction de l'application et des solutions technologiques ;
  - c) en fonction de la disponibilité chez les fournisseurs.

### **3.4.2 Les considérations techniques externes affectant le choix du capteur**

Les éléments les plus importants sont :

1. la disponibilité en alimentation :
  - la distribution électrique de courant alternatif est-elle disponible ?
  - devons-nous plutôt utiliser une alimentation à courant continu ?
2. la technologie à utiliser :
  - sommes-nous en présence d'une application requérant un circuit tout-ou-rien (alarme ou détection de seuil) ou est-il nécessaire d'obtenir une information proportionnelle ?
  - quel est l'ordre de grandeur de la précision recherchée ?
  - quelle distance sépare l'ensemble capteur-transmetteur de l'alimentation ?
  - quel est le type de signal requis à la sortie ?
3. l'environnement est-il :
  - poussiéreux ?
  - humide ou sec ?
  - en atmosphère explosive ?
  - à haute ou basse température (température ambiante) ?
4. la dimension et la fixation du capteur :
  - la dimension et le poids ;
  - les modes de fixation ;
  - l'endurance mécanique ;
  - la résistance aux chocs et aux vibrations ;
  - le degré d'étanchéité.

### **3.4.3 Les caractéristiques intrinsèques du capteur**

Nous devons définir quelques éléments importants pour choisir le capteur:

1. La gamme de mesure: Les valeurs minimales et maximales de la grandeur physique à mesurer.
2. La sensibilité: L'expression d'un signal suffisant élevé en fonction d'une grandeur physique donnée.
3. La qualité: Il doit être relativement précis, posséder une bonne répétabilité et être exempt d'hystérésis. Il doit fournir un signal de sortie exact pour la valeur de la grandeur physique mesurée
4. La linéarité: Il doit être linéaire dans la plage d'utilisation de l'application qui nous intéresse.
5. Le type de transduction: Il faut déterminer le type de signal de sortie. Si la mesure se fait à une grande distance par rapport aux circuits d'acquisition de donnée ou de traitement, le capteur doit être accompagné d'un transmetteur 4-20mA.
6. Il doit être peu encombrant et bon marché.

Il appartiendra au concepteur de la chaîne de mesure de bien établir l'importance de chaque critères énoncés en fonction de la nature de la mesure à effectuer, de la précision demandée et de la disponibilité financière.

## **3.5 LES MESURES USUELLES**

Les applications de mesure en milieu industriel que nous rencontrons le plus fréquemment sont:

- la mesure de la température ;
- la mesure de la pression ;
- la mesure du débit ;
- la mesure du niveau.

Chacune de ces mesures procure une information qui décrit l'aspect de la grandeur physique mesurée. L'unité de mesure informe l'utilisateur concernant le système de référence utilisé pour représenter la grandeur mesurée.

### 3.5.1 Liens entre les unités S.I. et celles employées dans d'autres pays (USA)

#### Distances :

- pouce (inch) : 1 in. = 2,54 cm
- pied (foot) : 1 ft = 12 in = 30,48 cm
- mile (miles) = 5280 ft = 1,609 km

#### Volume :

- pinte (pint) = 0,94 l
- gallon (US gallon) : 1 USgal = 4 pintes = 3,786 l
- baril (US barrel) : 1 bbi = 42 USgal = 159 l

#### Masse :

- once (ounce) : 1 oz = 28,35 g
- livre (pound) : 1 lb = 0,454 kg

#### Puissance :

- cheval vapeur (horsepower) : 1 hp = 0,736 kW = 1 CV

### 3.5.2 La mesure de la température

La mesure de la température nous informe sur la quantité de chaleur qu'un corps ou un environnement contient. Cette mesure peut être lue à l'aide de la dilatation d'un liquide, par un thermomètre, ou par la variation d'un élément primaire via capteur. L'unité de mesure la plus utilisée est l'échelle en degré Celsius ou centigrade.

Les points de références et fixes de cette échelle de température sont:

- la température de fusion de la glace est de 0°C ;
- la température d'ébullition de l'eau distillée est de 100°C.

Dans certain cas plus particuliers, une échelle absolue, soit l'échelle en Kelvin, est utilisée.

Les points de références et fixes de cette échelle de température sont:

- le zéro thermodynamique ou 0 Kelvin qui correspond à l'absence de tout mouvement moléculaire, soit la température la plus basse que nous pouvons atteindre ;
- la température où nous retrouvons les trois phases de l'eau (liquide, gazeuse et solide) ou 273.01 Kelvin qui correspond à 0.01°C.

La correspondance entre l'échelle Celsius et Kelvin est tout simplement un décalage de 273 degrés. En effet, une température de 0°Celsius équivaut à 273 Kelvin. Pour une température ambiante de 22°Celsius, nous obtenons 295 Kelvin, si nous appliquons la relation suivante ():

$$temp_{(Celsius)} = temp_{(Kelvin)} - 273^{\circ}C.$$

Quelques procédés industriels (particulièrement aux États-Unis) représentent la mesure de la température par une autre échelle. Il s'agit de l'échelle en degré Fahrenheit.

Les points de références et fixes de cette échelle de température sont:

- la température de fusion de la glace est de +32°F ;
- la température d'ébullition de l'eau distillée est de +212°F.

Les correspondances entre l'échelle Celsius et l'échelle Fahrenheit sont exprimées par les équations suivant):

$$temp_{(Celsius)} = 5/9 \times (temp_{(Fahrenheit)} - 32)$$

$$temp_{(Fahrenheit)} = ((9/5) \times temp_{(Celsius)}) + 32$$

Il faut remarquer qu'à une température de -40°F. correspond une température de -40°C.

### 3.5.3 La mesure de la pression

La mesure de la pression est une information fort utile pour de nombreuses applications industrielles. En effet, dans certains cas, la mesure de la pression permet de déterminer le niveau d'un liquide; la température d'une chaudière thermique, le débit, la densité ou la viscosité de certains gaz ou liquides.

#### 3.5.3.1 Définition de la pression.

La pression est la force appliquée à une surface ou répartie sur celle-ci.

Elle se définit comme suit :

$$P = \frac{F}{S}$$

P : pression en N/m<sup>2</sup> ( 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>)

F : force en Newton

S : surface en m<sup>2</sup>

Un Pascal est la pression que produit une force de un Newton appliquée sur une surface de un mètre carré.

Le compare les unités du système international et du système anglais utilisées pour l'évaluation des paramètres mesurés.

TABLEAU 3-2: Unités pour la mesure de pression		
Grandeur	Système international	Système anglais
Pression	Pascals (Pa)	livres/pouce <sup>2</sup> (lbs/po <sup>2</sup> ) ou psi
Force	Newtons (N)	livres (lbs)
Surface	mètres <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	pouces <sup>2</sup> (po <sup>2</sup> )

#### 3.5.3.2 Différents types de pression.

Pression absolue : pression mesurée au dessus du vide total ou du zéro absolu. Le zéro absolu représente une absence de pression.

Le vide : il correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni même dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

Pression atmosphérique (ou barométrique) : C'est la pression exercée par l'atmosphère de la terre. La pression atmosphérique au niveau de la mer est de 1,012 bar.

Elle peut varier de +/- 25 mbar avec la pluie ou le beau temps.

La valeur de la pression atmosphérique décroît lorsque l'altitude augmente.

Pression relative : C'est la pression au dessus de la pression atmosphérique. Elle représente la différence positive entre la pression mesurée et la pression atmosphérique existante.

C'est celle qui est le plus souvent utilisée, parce que la plupart des capteurs sont soumis à la pression atmosphérique et mesurent en relatif. Pour faire une mesure en absolu, il leur faut un vide poussé dans une chambre de référence (pression de gonflage d'un pneu par exemple).

Pression différentielle : C'est la différence de deux pressions ou la différence de grandeur entre une valeur de pression donnée et une pression de référence donnée.

Pression hydrostatique : C'est la pression exercée au dessous de la surface d'un liquide par le liquide situé au dessus, quand le fluide est au repos.

A l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse de fluide sur la surface considérée.

Cette pression est  $P = r \cdot g \cdot h$  (avec r masse volumique du fluide).

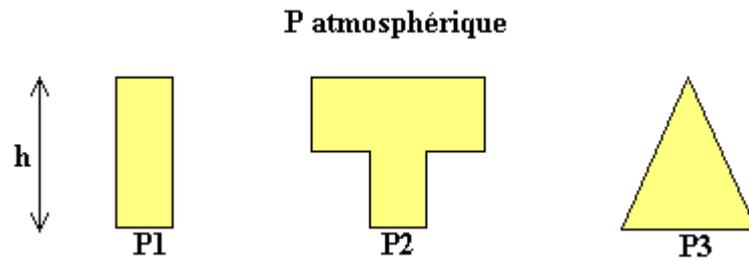


Figure 3-11 Pression hydrostatique

Pour chacun de ces récipients, la pression au fond de ceux ci est identique :

$$P1 = P2 = P3 = P_a + r . g . h$$

Si nous considérons que la pression atmosphérique normale autour de la terre est de 101,3 kPa et que la masse volumique de l'eau est de 1000 Kg/m<sup>3</sup>, quelle doit être la hauteur d'une colonne d'eau qui exercera cette même pression?

$$\text{hauteur} = \frac{\text{pression}}{\rho \times g} = \frac{101\,300}{1000 \times 9,81} = 10,3 \text{ mètres}$$

Ceci explique pourquoi il est pratiquement impossible, à l'aide d'une pompe aspirante, de retirer l'eau d'un puit si celle-ci se situe à 10,3 mètres ou plus au dessous du niveau de la pompe.

Pression hydrodynamique : elle résulte de la vitesse du fluide en mouvement.

Un fluide qui se déplace crée une pression supplémentaire :

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Avec v : la vitesse de déplacement du fluide en m/s

**Dépression** : pression en dessous du niveau atmosphérique.

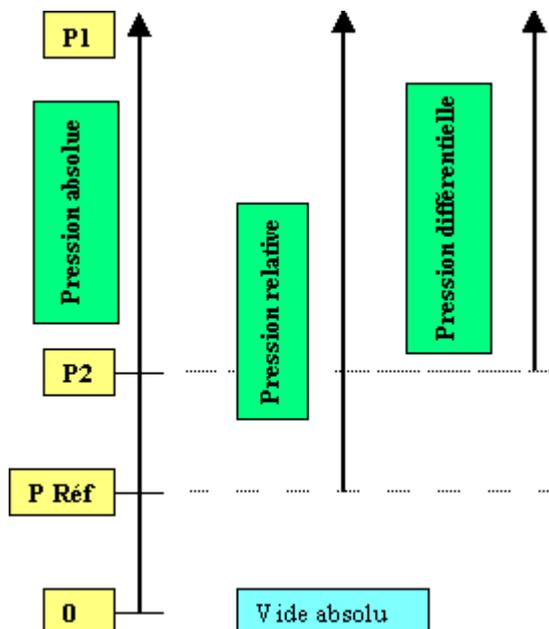


Figure 3-12 Echelle de pressions

### 3.5.3.4 Les différentes unités de pression

Le présente quelques conversions des unités de pression pour différents systèmes.

**Tableau 3-3: conversion des unités de pression**

	Pascal	Bar	Atmosphère	Mètre d'eau	psi
Pascal	1	0,000 01	$9,87 \times 10^{-6}$	$1,020 \times 10^{-4}$	$0,145 \times 10^{-3}$
Bar	$1 \times 10^5$	1	0,987	10,197	14,504
Atmosphère	101 325	1,013	1	10,332	14,696
Mètre d'eau	$9,81 \times 10^{-3}$	0,098	0,097	1	1,419
psi	6 895	$68,9 \times 10^{-3}$	0,068	0,705	1

psi : (« pound per square inch ») livres par pouce carré

Atmosphère : Pression normale exercée par l'air qui entoure la terre dans des conditions données.

0	100 000	pascal
0	1	bar
0	10,194	m d'eau
0	750	mm de Hg (Torr)
0	14,5	psi
0	1 000 000	barye
0	1,02	kgf/cm <sup>2</sup>

### 3.6 La mesure du débit

La mesure de débit est une information fort utile pour de nombreuses applications industrielles. Les systèmes de contrôle industriels nécessitent souvent des mesures de fluides dans des canalisations. Les mesures de débit sont donc importantes, fréquentes, mais aussi très complexes.

La mesure du débit définit la quantité de fluide qui s'écoule en un point donné par unité de temps.

On entend par fluide un liquide, un gaz ou même, dans certaines conditions, un solide pulvérulent (produit sec réduit en poudre circulant par gravité ou à l'aide d'un dispositif mécanique, par exemple une vis sans fin).

On distingue deux types de débit, soit le *débit volumique* ( $Q_v$ ) et le *débit massique* ( $Q_m$ ).

Lorsque la quantité de fluide en écoulement par unité de temps est exprimée en volume, le débit est volumique; lorsque la quantité de fluide en écoulement par unité de temps est exprimée en masse, le débit est massique. Généralement, le débit volumique s'exprime en mètres cubes par seconde ( $m^3/sec$ ) ou en litres par seconde (L/sec). Le débit massique s'exprime souvent en kilogramme par seconde (Kg/sec).

Pour évaluer le débit volumique d'écoulement  $Q_v$  (SI: système international) en régime stable dans une conduite, il suffit d'appliquer l'.

$$Q_v = \frac{\text{volume}}{\text{temps}}$$

### Équation de base pour la mesure du débit volumique

Pour évaluer le débit massique d'écoulement  $Q_m$  (SI) en régime stable dans une conduite, il suffit d'appliquer l' Aussi, le débit massique peut être évalué à partir de la valeur du débit volumique puisque c'est le résultat de la multiplication du débit volumique par la masse volumique du fluide analysé ().

$$Q_m = \frac{\text{masse}}{\text{temps}}$$

### Équation de base pour la mesure du débit massique

$$Q_m = Q_v \times \rho$$

### Débit massique en fonction du débit volumique

Le présente quelques conversions des unités de volume pour différents systèmes.

**Tableau 3-4 : Conversion des unités de volume**

	mL = cm <sup>3</sup>	L	ft <sup>3</sup>	GPM(USA)	GPM(UK)
cm <sup>3</sup>	1	1 x 10 <sup>-3</sup>	3,531 x 10 <sup>-5</sup>	2,641 x 10 <sup>-4</sup>	2,199 x 10 <sup>-4</sup>
L	1000	1	0,035 3	0,264	0,220
ft <sup>3</sup>	28 316	28, 316	1	7,480	6,228

L : litres                                      ft<sup>3</sup> : pieds cubes

1mL occupe un volume de 1 cm<sup>3</sup>  
1L occupe un volume de 1000 cm<sup>3</sup>

Le présente quelques conversions des unités de débit pour différents systèmes.

**Tableau 3-5: conversion des unités de débit**

	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /sec	L/sec	GPM(USA)	GPM(UK)
m <sup>3</sup> /h	1	278 x 10 <sup>-6</sup>	0,2778	4,403	3,667
m <sup>3</sup> /sec	3 600	1	1000	15 852	13 198
L/sec	3,6	0,001	1	15,85	13,198
GPM(USA)	0,2271	6,3 x 10 <sup>-5</sup>	0,0631	1	0,833
GPM(UK)	0.2728	7,58 x 10 <sup>-5</sup>	0,0758	1,201	1

m<sup>3</sup>/h : mètres cubes par heure                                      m<sup>3</sup>/sec: mètres cubes par seconde

L/sec : litres par seconde

GPM(USA): gallon par minute                      GPM(UK): gallon par minute

### 3.7 La mesure du niveau

La mesure de niveau est aussi une information fort utile pour de nombreuses applications industrielles. La mesure du niveau définit la position ou la hauteur d'un point par rapport à un plan horizontal utilisé comme référence.

Nous pouvons exprimer la quantité mesurée en terme de poids, masse, volume ou hauteur. Évidemment, pour déterminer le volume, la masse ou le poids d'un liquide, il est nécessaire de tenir compte de la forme du réservoir et de la masse volumique du matériau mesuré.

Généralement, pour effectuer la mesure du niveau, une simple canalisation transforme la hauteur du niveau (de la colonne) en une différence de pression. Cette pression ainsi mesurée nous informe de la hauteur de la colonne et, par conséquent, du volume, de la masse ou du poids du liquide.

La représentation de la mesure du niveau peut être graduée en hauteur en masse, en poids ou en volume.

## 4. Le raccordement capteur - transmetteur

Pour certaines applications de détection de seuil ou de gestion des alarmes, c'est le dépassement d'une valeur critique qui est important. Par exemple, citons la mesure de la température pour démarrer un système de refroidissement. Le signal est de type numérique (TOR: tout-ou-rien).

Pour d'autres applications de contrôles de procédés industrielles, nous voulons obtenir une information plus complète. Par exemple, il faut connaître précisément la valeur de la température; une information analogique à la température mesurée.

### 4.1 LES STANDARDS DANS LA TRANSMISSION DE SIGNAUX

Dans cette section, nous étudierons les différents standards utilisés dans la transmission de signaux électriques.

#### 4.1.1 Le signal numérique TOR

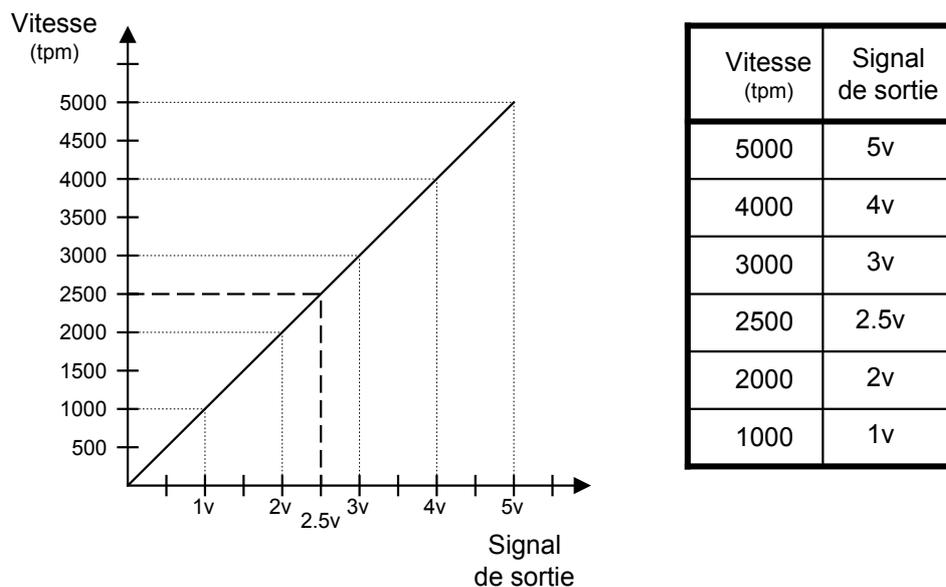
Pour signifier la présence ou l'absence d'un événement ou pour informer un opérateur d'une condition d'alarme, nous utilisons un signal numérique (TOR: tout-ou-rien). La logique des contacts permet, entre autre chose, d'indiquer:

- l'absence (logique 0) ou la présence (logique 1) d'un carton;
- une température inférieure (logique 0) ou supérieure (logique 1) à un seuil;
- le niveau d'un liquide inférieur (logique 0) ou supérieur (logique 1) à un seuil;

sont des exemples où l'information acheminée vers la partie commande indique l'état de la grandeur mesurée.

#### 4.1.2 Le signal analogique

Le signal analogique fournit une information comprise entre deux limites définies par la gamme de la mesure. Un capteur ou d'un transducteur proportionnel délivre un signal analogique à la sortie. La Figure 0-1 illustre la correspondance d'un signal de sortie compris entre 0-5v pour un tachymètre indiquant la vitesse d'un moteur pour une gamme de mesure comprise entre 0000 et 5000 tours/minute.



**Figure 0-1 : Signal de sortie en fonction de la vitesse d'un moteur**

Les standards industriels les plus utilisés pour représenter une échelle de mesure analogique sont:  
pour les signaux électriques:

- 0 à 1V;
- 0 à 5V;
- 1 à 5V;
- 4 à 20mA;

et pour les signaux pneumatiques:

- 3 à 15psi;
- 20 à 100kPa;
- 0,2 à 1,00 Bar.

### 4.1.3 Le transmetteur de signal 4-20mA

Le transport d'un signal analogique de tension offre quelques difficultés puisqu'il est très sensible au bruit, et, sur une grande distance, il subit une atténuation qui est néfaste. Toutefois, le transport d'un signal analogique de courant offre, entre autres avantages, une immunité au bruit qui est très élevée, et aucune atténuation.

Donc, particulièrement lorsque que le signal analogique doit être transmis sur une grande distance, nous utilisons un transmetteur 4-20mA. Ses principaux avantages sont les suivants:

1. C'est un standard reconnu par tous les fabricants.
2. Il n'y a pas d'atténuation de signal due à la distance.
3. Nous pouvons détecter facilement la rupture de ligne (fil brisé): pour une rupture de ligne, le courant vaut 0mA.
4. Nous pouvons relier facilement des instruments compatibles 4-20mA en série sans dépasser la valeur de la charge maximale: l'ajout d'un afficheur par exemple devient plus simple.
5. Comme nous avons une basse impédance, le signal n'est pas affecté par le bruit.

Cependant, il faut noter que la valeur de la charge maximale, limite la quantité d'instruments que nous pouvons relier en série sur la sortie du transmetteur. L'évaluation de la résistance totale doit tenir compte de toutes les résistances en série ainsi que la résistance du fil utilisé. Généralement, cette résistance maximale dépend de l'alimentation utilisée. La Figure 0-2, tel que fourni par plusieurs manufacturiers, démontre graphiquement la façon de calculer la charge maximale permise selon la tension d'alimentation.

Le manufacturier précise deux paramètres importants:

1. la valeur de la tension minimale permettant au transmetteur de fonctionner correctement  $V_{tmin}$ ;
2. la valeur de l'alimentation maximale  $V_{tmax}$ .

Donc, à l'aide de l'équation suivante, vous pouvez évaluer la valeur de la charge maximale que le transmetteur peut fournir pour une alimentation donnée. L'évaluation de la charge maximale est faite pour le courant maximal, c'est-à-dire, 20mA.

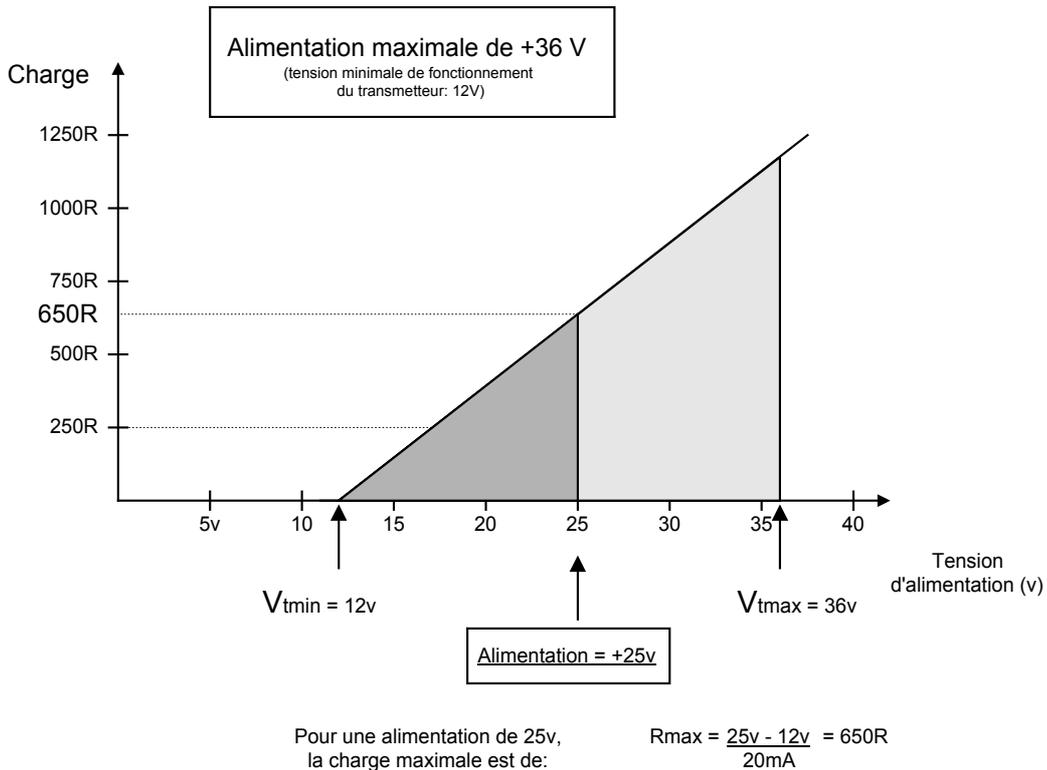
$$R_{max} = \frac{V_a - V_{tmin}}{20 \text{ mA}}$$

#### Équation 0-1 : Calcul de la résistance maximale permise

où:

- $R_{max}$  est la charge maximale;
- $V_a$ : la tension de l'alimentation;

- $V_{tmin}$ : la tension minimale de fonctionnement du transmetteur.

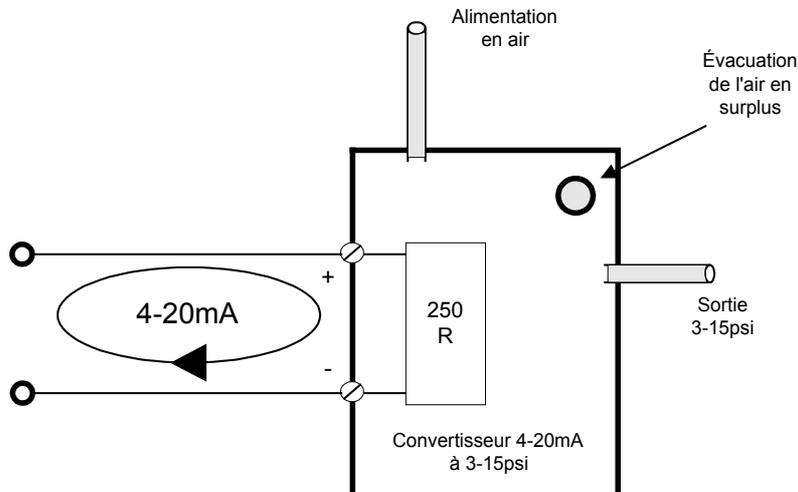


**Figure 0-2 : Calcul de la charge maximale pour un transmetteur 4-20mA**

#### 4.1.4 Les standards de transmission pneumatiques

Pour piloter des composants électromécaniques, nous utilisons une interface qui converti le signal électrique en signal pneumatique. Pour recueillir l'information d'un système pneumatique et la convertir pour un système de nature électrique, nous utilisons un convertisseur pneumatique à électrique.

La Figure 0-3 montre un convertisseur courant/pression (I/P) couramment utilisé pour interfacer un courant de 4-20mA vers 20-100kPa. On y retrouve une alimentation en air d'environ 110kPa, une sortie d'évacuation pour l'air supplémentaire, et la sortie d'air correspondant au transfert de courant.



**Figure 0-3 : Convertisseur 4-20mA à 3-15psi**

Si 12mA pilote le convertisseur, la sortie convertie vaudra 60kPa ou 9psi.

Des convertisseurs du même type sont utilisés pour le standard 3-15 psi ou 20-100kPa.

#### **4.1.5 Les standards de transmission numériques**

Pour transmettre des signaux sur une grande distance, nous utilisons fréquemment des circuits de conversion numérique. Les principaux avantages sont:

- une très grande immunité au bruit;
- la vitesse de communication;
- la validation du signal par code d'erreur;
- la possibilité de relier en réseau;
- la facilité de l'adressage et le multiplexage du signal;
- et la communication en temps partagé.

Le système de codification le plus populaire est le standard BCD (« binary coded decimal »). On retrouve des convertisseurs 8bits, 12 bits et même 16 bits. La résolution de gamme de mesure est excellente pour un transfert sur 8 bits, mais généralement, nous utilisons des conversions sur 12 bits.

Malheureusement, les coûts d'une telle conversion sont encore aujourd'hui assez dispendieux.

De plus, chaque fabricant développe son propre standard de communication. Donc, il faut utiliser les bons pilotes de communication pour intervenir au près des systèmes de régulation répartie, des micro-ordinateurs ou des systèmes dédiés numériques telles les interfaces opérateurs.

Les standards de communication les plus répandus sont: RS-232, RS-422, RS-485 et IEEE-488. Plusieurs appareils de mesure numériques font maintenant usage des ces standards.

L'étude de ces standards ne fait pas objet de ce cours.

#### **4.1.6 Conversion d'unités**

Pour un opérateur de système automatisé, la valeur du signal électrique transmet à peu de signification. Donc, il faut afficher cette valeur en convertissant celle-ci dans un système avec lequel l'opérateur sera familier. Cette mesure sera affichée en grandeur d'ingénierie, soit la représentation usuelle utilisée pour représenter la grandeur physique.

Or, pour le technicien qui fait l'étalonnage des appareils de la chaîne de mesure, il doit procéder à une série de conversions pour apprécier la qualité du signal mesuré. D'où l'importance de bien connaître les principes de conversion d'unités.

Par exemple, la vitesse d'une chaîne de production n'offre pas la même représentation pour un opérateur et pour le technicien d'entretien. En effet, pour l'opérateur, la quantité de pots à la minute que le système automatisé fournit est la bonne donnée. Mais, à l'étalonnage, la vitesse recherchée pour le moteur est donnée en tour par minute. De plus, la grandeur électrique fournie par le générateur tachymétrique pour indiquer la vitesse du moteur est exprimée en voltage.

Un autre exemple: si nous disons à l'opérateur que la température mesurée à l'aide du capteur est de 10mV, quelle conclusion pourra-t-il déduire?

Alors, la conversion de signal à l'aide de la fonction de transfert, en tout point, de la chaîne de mesure permet le passage d'une échelle à un autre.

Pour décrire la chaîne de mesure, nous utilisons la terminologie suivante:

- la grandeur physique ou grandeur d'ingénierie;
- la grandeur normalisée en pourcentage;
- la grandeur électrique;
- la gamme de la mesure (« range »), la limite inférieure (« offset ») et la limite supérieure;
- l'étendue (la plage) de la mesure (« span »);
- la sensibilité de la chaîne de mesure;
- la résolution de la chaîne de mesure;
- et la fonction de transfert.

### 4.1.7 Grandeur physique ou grandeur d'ingénierie

La grandeur physique ou grandeur d'ingénierie exprime la mesure à l'aide d'une unité connue par l'opérateur ou par le technicien en contrôle de qualité. Par exemple : la température exprimée en degré centigrade, la longueur exprimée en centimètre, la masse exprimée en kilogramme et le niveau exprimé en quantité de litres.

Cette grandeur d'ingénierie est l'expression de la mesure graduée dans un système d'unité qui communique l'information requise par l'opérateur pour prendre les bonnes décisions ou pour l'informer de l'état de la variable mesurée.

### 4.1.8 Grandeur normalisée en pourcentage

À l'intérieur d'une gamme de mesure déterminée, la valeur mesurée est exprimée en pourcentage. Par exemple, pour une gamme de mesure de 0°C à +50°C, une mesure de température de +50°C correspondra à 100%, et une mesure de température de 0°C correspondra à 0%.

La plupart des équipements numériques programmables (régulateurs, enregistreurs, systèmes d'acquisition de données ou afficheurs) se programment à l'aide de la grandeur d'ingénierie ou de la grandeur normalisée en pourcentage. Les calculs et les manipulations mathématiques faites par ces systèmes sont réalisés à partir de la grandeur normalisée en pourcentage.

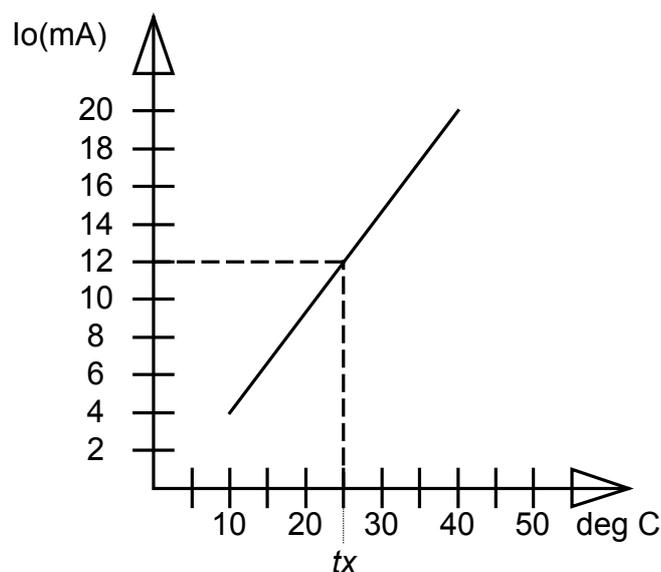
### 4.1.9 Fonction de transfert

La fonction de transfert exprime la relation mathématique existant entre le signal d'entrée et le signal de sortie d'un transducteur, d'un transmetteur ou tout autre système dont l'information de la sortie est dépendante du comportement de l'information que nous retrouvons à l'entrée.

La Figure 0-4 illustre graphiquement la fonction de transfert d'une chaîne de mesure de température ayant une portée minimale de +10°C et une portée maximale de +40°C pour une sortie en courant de 4-20mA. Nous remarquons que ce graphique représente l'équation d'une droite avec:

$y = mx + b$ , où

- y représente la variable dépendante, soit le courant de sortie;
- x représente la variable indépendante, la température mesurée;
- m représente la pente de la droite, soit la sensibilité de la chaîne;
- b représente le décalage à la valeur de la portée minimale.



**Figure 0-4: Fonction de transfert d'une chaîne de mesure de température**

Si le transfert comporte un rapport constant, la fonction de transfert est dite linéaire et est représentée par une droite ( $y = mx + b$ ). Si le transfert comporte une relation quadratique, la fonction de transfert

est logarithmique. Si le transfert est non-linéaire, la fonction de transfert est représentée par une série polynomiale.

Nous pouvons considérer que la fonction de transfert (relation mathématique) d'un transmetteur de température est aussi exprimée par l'

Équation 0-2:

$$I_o \text{ (courant de sortie)} = \text{sensibilité} (t_x - \text{limite inférieure}) + 4mA$$

#### **Équation 0-2 : Fonction de transfert**

$$\text{ou sensibilité} = \frac{20mA - 4mA}{\text{limite supérieure} - \text{limite inférieure}}$$

et  $t_x$  est la température mesurée.

La représentation d'une fonction de transfert linéaire peut être aussi représentée par d'autres types de représentations graphiques. D'ailleurs, les fabricants de matériels utilisent fréquemment une représentation graphique pour illustrer une fonction de transfert. La. fournit des exemples de représentations graphiques usuelles (a, b, c, et d) pour des fonctions de transfert courantes et une fonction de transfert complète.

### **4.1.10 Schématisation**

Sur la même échelle, on représente de chaque côté, les valeurs des grandeurs physiques qui sont liées. L'unité de chaque grandeur est précisée en bord d'échelle. On précisera le type de relation sur la partie de l'échelle correspondante.

### **4.1.11 Types de sorties**

#### **4.1.12 Types des sorties numériques TOR**

Pour la transmission de signal numérique, il n'y a pas de standard qui soit uniformisé. Le signal transmit par le capteur peut être: en courant continu ou en courant alternatif.

Les tensions continues les plus utilisées sont: 5V, 10V, 12V, 24V, et 48V.

Les tensions alternatives les plus utilisées sont: 24V, 48V, 120V et 240V.

Pour quelque cas, un signal de type TTL (0-5V) est utilisé.

La teneur du signal acheminé dépend du type de sortie du capteur utilisé. Nous retrouvons trois types de sorties:

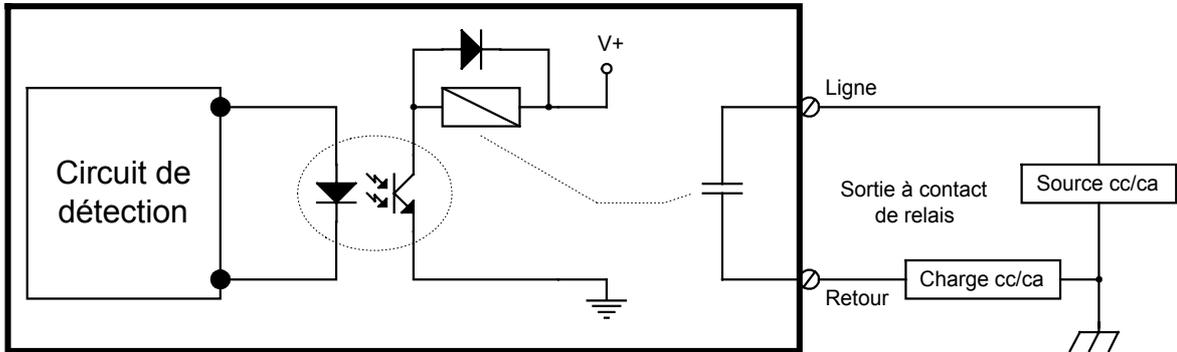
- les sorties à contact secs pour des signaux à courant continu ou alternatif;
- les sorties à transistor (NPN ou PNP) pour des signaux à courant continu seulement;
- les sorties à triac pour des signaux à courant alternatif seulement.

La Figure 0-5 représente un module de sortie à contact sec, la Figure 0-6. représente un module de sortie à transistor NPN pour une charge c.c., la Figure 0-7. représente un module de sortie à transistor PNP pour une charge c.c. et la Figure 0-8. représente un module de sortie à triac pour une charge c.a..

Pour protéger la sortie contre les effets de « self » magnétique d'une charge inductive, nous retrouvons divers types de protection. Pour les circuits dont la sortie alimente une charge c.c., la protection suggérée est une diode à roue libre « free wheeling diode » en parallèle sur l'élément inductif.

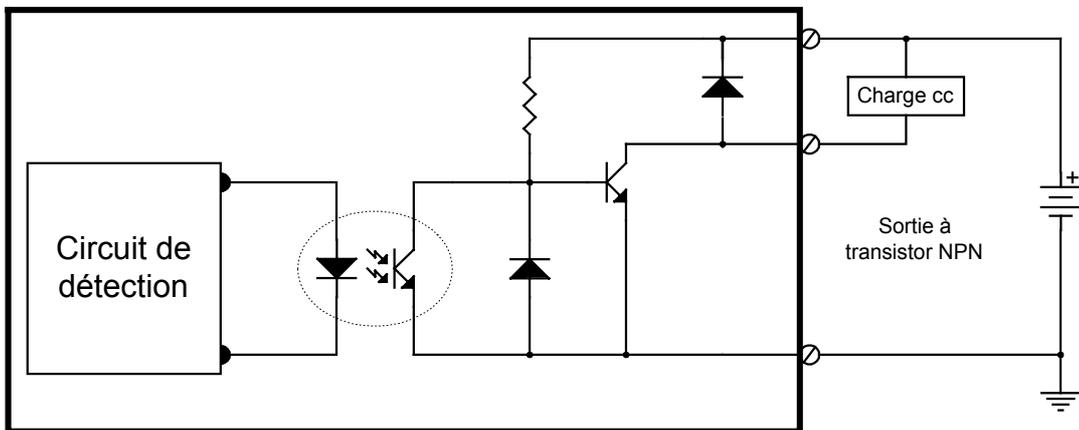
Dans le cas d'une charge c.a., deux protections sont nécessaires. Un filtre ( $R_s$  et  $C_s$ ) empêche l'amorçage intempestif du thyristor ou du triac dû à l'effet de self d'une charge inductive. Les valeurs recommandées par la plupart des fabricants sont:  $R_s$  de  $120\Omega$  et  $C_s$  de  $0.1\mu f$ . En plus, il est

recommandé de placer une varistance de valeur nominale de même valeur que la tension d'alimentation de la charge, par exemple 120v ou 240v. Quelques fabricants nomment le varistance: MOV, pour « Metal Oxyde Varistance ».



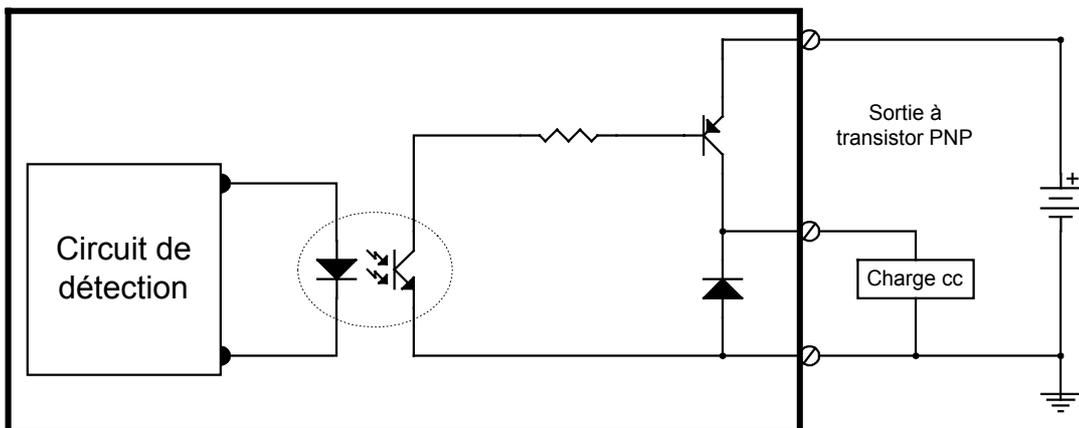
Module de sortie à contact sec pour charge cc ou ca

**Figure 0-5**



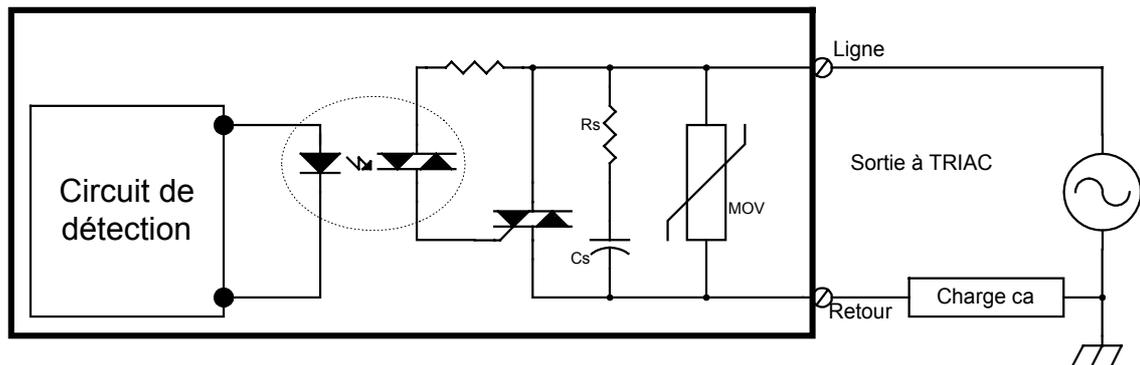
Module de sortie à transistor NPN pour charge cc

**Figure 0-6**



Module de sortie à transistor PNP pour charge cc

**Figure 0-7**



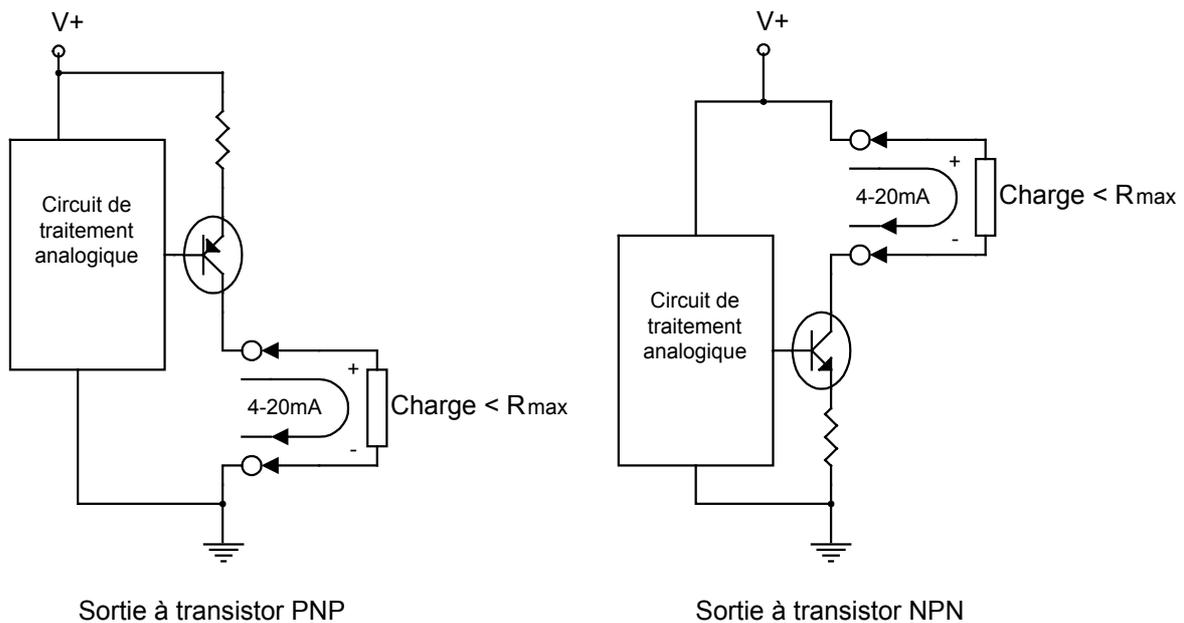
Module de sortie à TRIAC pour charge ca

Figure 0-8

#### 4.1.13 Types de sorties analogiques

Nous retrouvons deux modèles de sortie pour le transmetteur 4-20mA. Quoique la sortie à transistor PNP soit la plus utilisée, nous avons aussi des sorties à transistor NPN.

L'emplacement de la masse des instruments de mesure et du transmetteur doit être connue pour éviter de court-circuiter un élément de la boucle. Une importance supplémentaire doit être apportée pour le raccordement d'un transmetteur 4-20mA.



Sortie à transistor PNP

Sortie à transistor NPN

Figure 0-9

L'utilisation d'un transmetteur 4-20mA à sortie NPN, nécessite une charge flottante.

#### 4.1.14 Raccordement d'un transmetteur 4-20mA

Trois configurations de transmetteurs 4-20mA sont disponibles sur le marché. Nous retrouvons:

1. le transmetteur deux fils ou autoalimenté;
2. le transmetteur trois fils;
3. le transmetteur quatre fils.

Le raccordement d'un transmetteur 4-20mA demande certaines considérations, à savoir:

- l'alimentation minimale et maximale du transmetteur;
- la charge maximale;
- l'emplacement de la masse.

Pour chaque configuration, le fabricant nous informe des caractéristiques du transmetteur.

#### **Raccordement d'un transmetteur 4-20mA deux fils**

Le transmetteur deux fils, aussi appelés transmetteurs autoalimentés, s'alimente en courant à même le signal de la boucle de courant. En effet, celui-ci requiert peu de courant pour s'alimenter, soit moins de 4mA.

Le transmetteur autoalimenté est branché à même la boucle et ajuste le courant de la boucle en fonction de la grandeur mesurée. Il suffit de choisir une source d'alimentation, tel que décrit à la section précédente, en tenant compte de la charge maximale en fonction de la valeur de l'alimentation disponible.

Généralement, le circuit électrique de transmetteur autoalimenté est flottant. L'emplacement de la source et de la charge de la boucle doit être choisi en considérant les masses correspondantes. La Figure 0-10 illustre le branchement d'un transmetteur autoalimenté possédant une source de tension et une charge non flottante.

#### **Raccordement d'un transmetteur 4-20mA trois fils**

Le transmetteur trois fils pose généralement peu de problèmes. Nous devons connaître le type de sortie (NPN ou PNP) pour identifier le raccordement correct.

Si la charge est non-flottante, une sortie PNP est requise, tel qu'illustré à la Figure 0-10.

Toutefois, l'utilisation d'un transmetteur 4-20mA à sortie NPN nécessite une charge flottante.

#### **Raccordement d'un transmetteur 4-20mA quatre fils**

Le transmetteur 4-20mA quatre fils possède généralement une sortie à transistor PNP et peut piloter une charge non flottante.

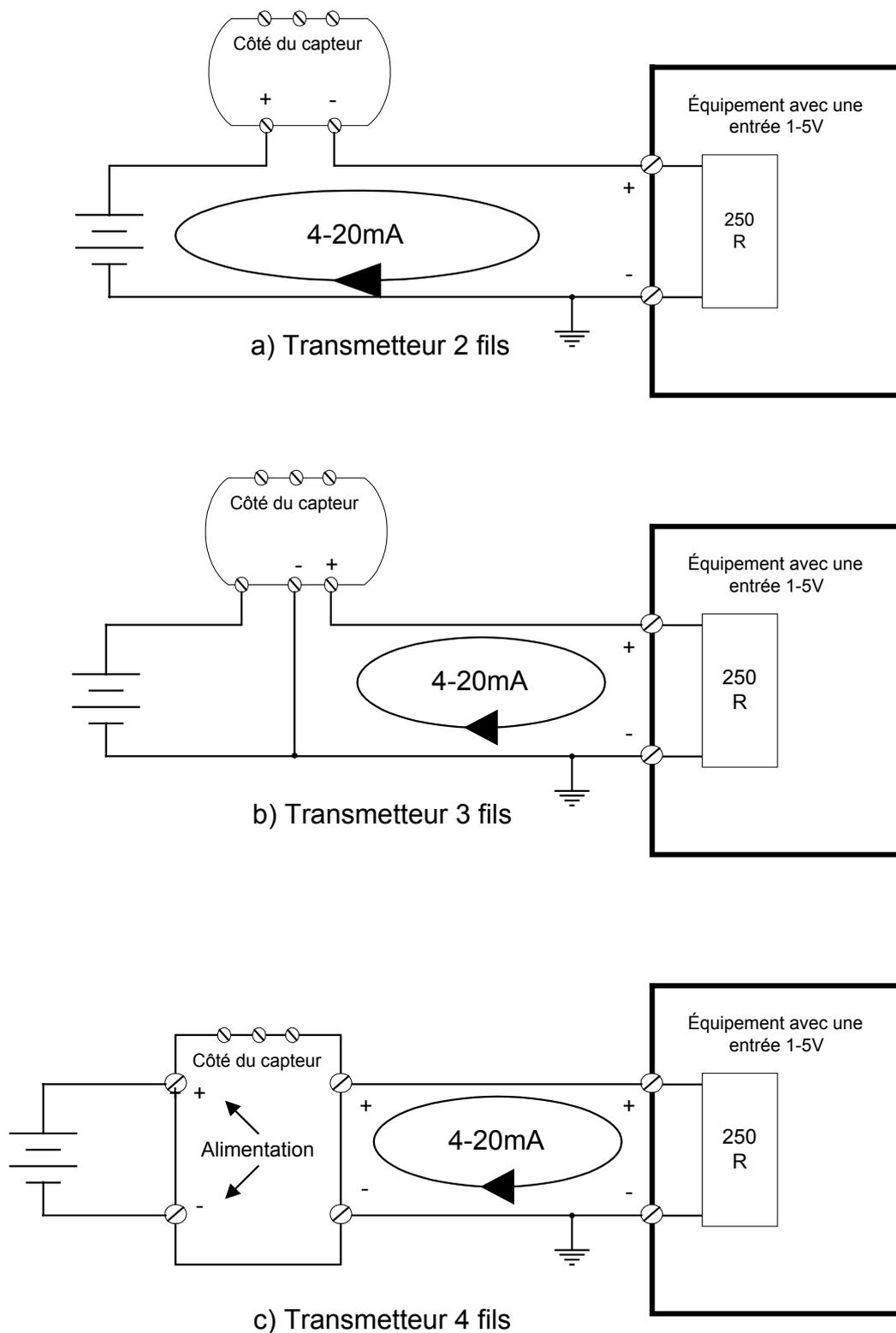
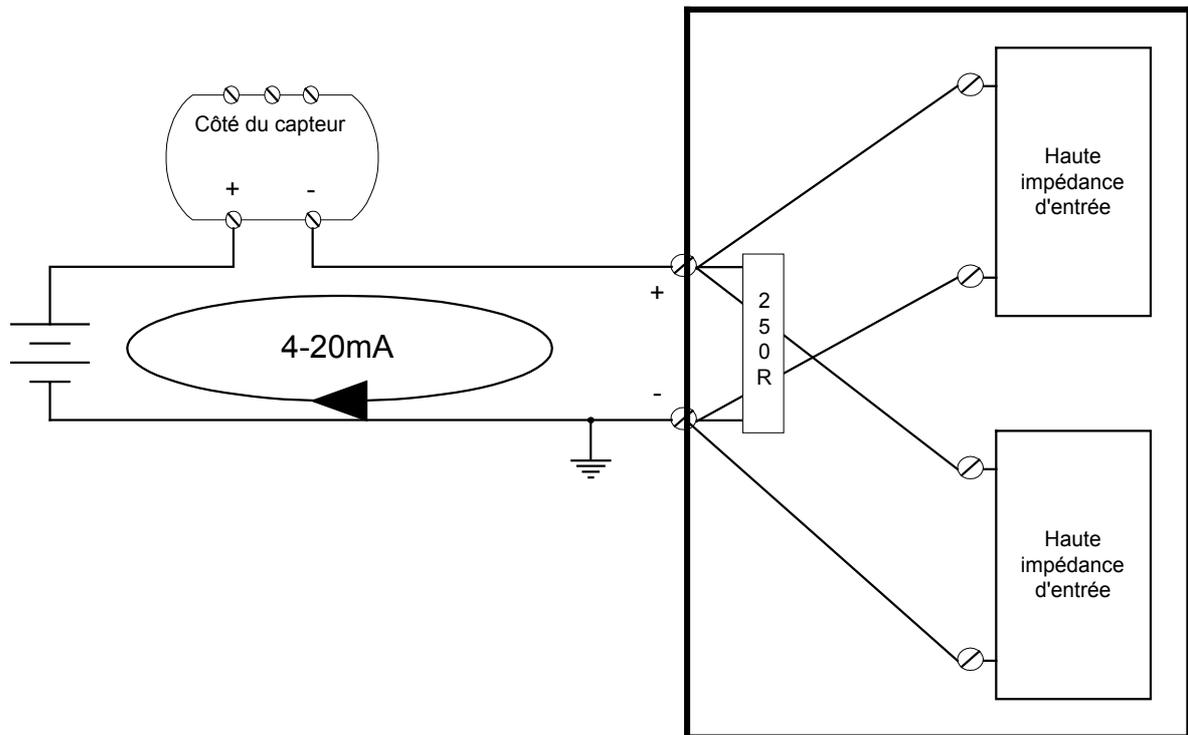


Figure 0-10 : Raccordement d'un transmetteur 4-20mA

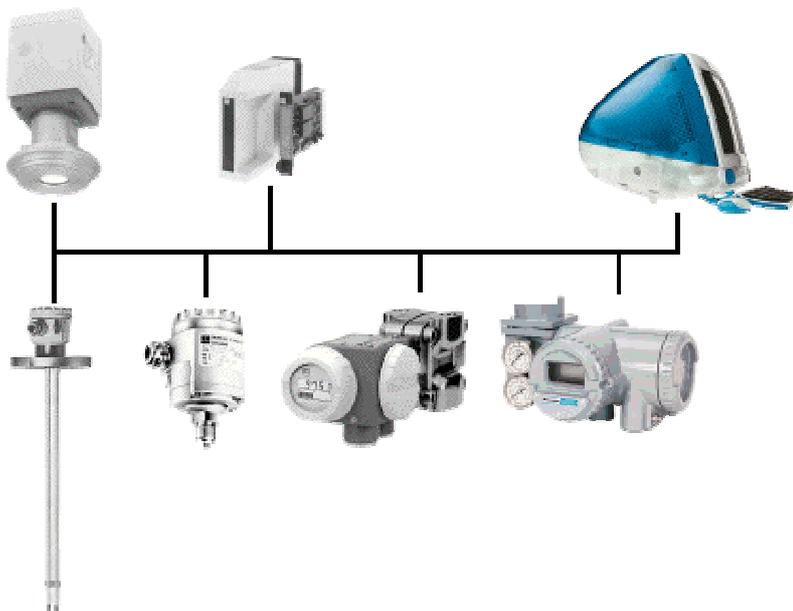
Pour brancher plus d'un instrument à entrée 1-5V sur la même boucle de courant, il faut obligatoirement utiliser des instruments à entrées flottantes. Sinon, une ou plusieurs entrées seraient court-circuitées.

Une autre alternative (Figure 0-11) consiste à relier en parallèle sur une résistance de  $250\Omega$  commune, les entrées des instruments que nous voulons utiliser. Évidemment, cette alternative est valable uniquement lorsque les équipements sont dans la même armoire.



**Figure 0-11 : Raccordement des équipements dans une armoire**

#### 4.1.15 Bus de terrain



**Figure 0-122 : Bus du terrain**

Comme dans le reste de l'industrie, les capteurs analogiques laissent la place de plus en plus aux capteurs numériques. Dans un premier temps ceci c'est matérialisé par l'apparition des transmetteurs intelligents. Aujourd'hui, on se rapproche de plus en plus d'une architecture en réseaux des capteurs ; **le bus de terrain.**

Il existe plusieurs standards industriels de bus de terrain, on citera : **Profibus, Fieldbus, WoldFip.** Leur objectif est le même, simplifier la mise en place des boucles de régulation. Pour cela, ils utilisent une liaison unique entre les différents intervenants de la boucle de régulation (capteurs, régulateurs, actionneurs), liaison qui sert à la fois au dialogue entre ces intervenants et à leur alimentation en énergie. Ainsi, l'ajout d'un intervenant dans une boucle complexe se résume en deux interventions :

- Le montage de l'intervenant sur le bus ;
- L'adaptation, par l'intermédiaire d'un logiciel, du fonctionnement de la régulation.

Malgré l'existence de passerelles, on ne peut qu'espérer une standardisation de ces différents bus, dans le but de simplifier la mise en oeuvre de ces nouvelles technologies et d'en diminuer le coût.

#### **4.1.16 Types de liens de communication**

Pour la transmission de signaux, trois types de lien de communication sont utilisés. Ils sont illustrés à la Figure 0-133.

##### **La paire de fils torsadés « twisted pairs wires »**

Le câble avec une paire de fils torsadés est le plus couramment utilisé. De faible coût, il possède tout de même une immunité au bruit peu respectable. Toutefois, pour transporter un signal analogique provenant d'un transmetteur 4-20mA, ses propriétés sont suffisantes.

Il se compose de deux conducteurs isolés qui sont torsadés pour améliorer ses caractéristiques d'immunité au bruit. De plus, il possède un troisième fil que nous utilisons pour la protection contre certains phénomènes de bruit de fond en le reliant à la terre. Pour améliorer l'immunité au bruit, certains manufacturiers (Texas et autres) recommande de relier (mise à la terre) seulement une extrémité du troisième conducteur, soit l'extrémité du côté de la source de signal.

##### **Le câble coaxial**

Le câble coaxial se compose d'un conducteur central enfermé dans une gaine métallique constituant le deuxième conducteur, laquelle est connectée à la masse. Ce câble, environ dix fois plus coûteux que la paire torsadée, est plus flexible, plus durable et possède une meilleure immunité au bruit.

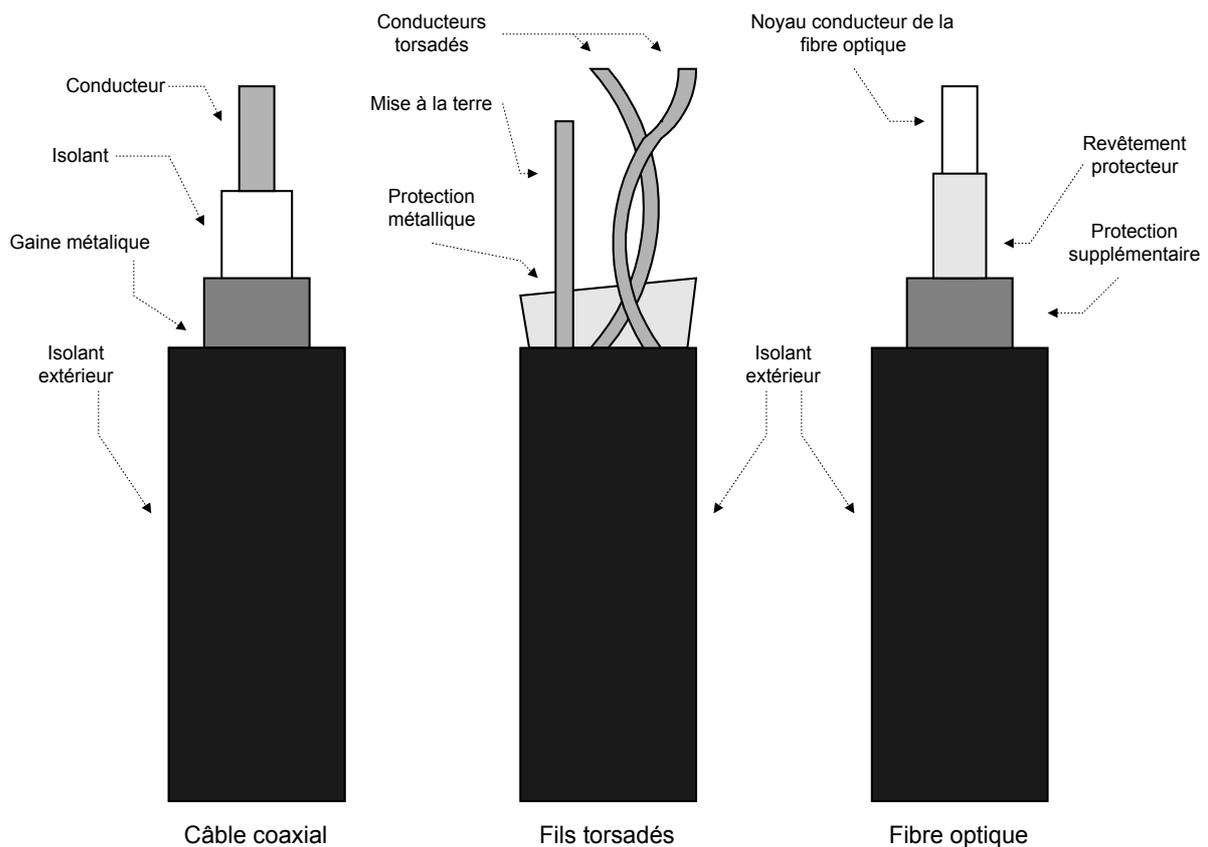
Il peut transmettre des signaux numériques à très haute vitesse.

##### **La fibre optique**

La fibre optique transporte, à l'aide de signaux lumineux, les informations à très grande vitesse avec de très faibles pertes de transmission en comparaison avec la paire torsadée ou le câble coaxial. La fibre optique est maintenant de plus en plus commercialisé et les coûts sont en décroissance. La qualité de l'immunité au bruit et la vitesse de transmission, sous des conditions critiques, sont excellentes.

Un système de fibre optique, sans répéteur, peut facilement transmettre 500 mégabits par seconde sur 200km. Cette caractéristique fait que c'est le lien privilégié pour la transmission de signaux numériques.

La fibre optique est petite, plus légère, et peut être installée dans des conditions industrielles défavorables aux conducteurs électriques (température, interférences industrielles, etc.).



**Figure 0-133 : Les types de lien de communication**

## 4.2 L'ÉTALONNAGE DE L'INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE

Pour s'assurer de la validité et la précision de la mesure, le raccordement capteur - transmetteur sera effectué en conformité avec les caractéristiques fournies par le fabricant des éléments. Des informations sur les conditions d'utilisation, l'alimentation requise et le branchement usuel sont disponibles dans les catalogues du manufacturier. Aussi, l'étalonnage des équipements de l'instrumentation industrielle de la chaîne de mesure doit être fait de façon méthodique.

L'étalonnage des appareils demande une connaissance parfaite des caractéristiques du système à ajuster. Les étapes suivantes doivent être suivies:

1. Procéder à la mise en place d'une procédure de calibration juste, fiable et ordonnée.
2. Établir un échéancier de calibration pour une maintenance préventive.
3. Prévenir les intervenants de l'équipe d'opérations du système des procédures de calibration et les informer de toutes actions à entreprendre.
4. Vérifier la fonction de l'appareil dans le système (régulation, alarme ou autres) et considérer l'étalonnage en ligne ou hors ligne.
5. Vérifier l'état de l'étalonnage avant de débiter les opérations. Si les paramètres mesurés respectent les conditions de fonctionnement, ne pas retirer l'appareil.
6. Pour l'étalonnage hors ligne, prévoir un équipement de remplacement, une séquence de remplacement, et si nécessaire, considérer l'arrêt momentané du système.
7. Procéder à l'étalonnage de l'appareil conformément aux paramètres de fonctionnement préétablis.
8. Produire un rapport de calibration.

Généralement, une trousse d'étalonnage comprend:

1. la documentation appropriée pour procéder à l'étalonnage:
  - la documentation complète du système;
  - les spécifications de l'instrumentation industrielle;
  - la procédure d'étalonnage;
  - la gamme de mesure;
  - les procédures d'installation, de montage et de démontage;
2. les outils spécifiques et nécessaires à l'étalonnage:
  - un générateur d'étalonnage universel incluant des sorties en tension et en courant;
  - des entrées spécifiques pour la mesure de grandeurs électriques;
  - une trousse d'étalonnage pneumatique, une bonbonne d'air comprimé destiné à l'alimentation des dispositifs pneumatiques;
3. des étalons de référence pour vérifier la validité de l'étalonnage.

### **4.3 GÉNÉRATEUR D'ÉTALONNAGE UNIVERSEL**

Le générateur d'étalonnage universel est un outil permettant de vérifier correctement la chaîne de mesure à l'aide de lecture en entrée, ou de génération de signaux en sortie. En effet, la plupart des entreprises utilisent un instrument universel pour l'étalonnage des capteurs, des transducteurs, des transmetteurs, ou tout autre instrument nécessitant un étalonnage de précision.

Les caractéristiques générales d'un générateur d'étalonnage universel sont:

- une précision selon des normes reconnues, par exemple ISO9000;
- une linéarité de l'ordre de 0,01%;
- un afficheur numérique de précision d'au moins 5 digits;
- possibilité de mesure de signaux d'entrées:
  - plusieurs plages de mesure de tension d'entrée c.c. à détection automatique « auto-range », par exemple,  $\pm 25,000\text{mV}$ ,  $\pm 250,00\text{mV}$ ,  $\pm 2,5000\text{V}$ ,  $\pm 25,000\text{V}$ ,  $\pm 250,00\text{V}$ ;
  - plusieurs plages de mesure de tension d'entrée c.a. à détection automatique « auto-range », par exemple, 0-250,0mv eff., 0-2,500v eff., 0-25,00v eff, 0-110v eff.;
  - plusieurs plages de mesure de courant d'entrée c.c. à détection automatique « auto-range », par exemple,  $\pm 25,000\text{mA}$ ,  $\pm 250,00\text{mA}$ ;
  - mesure de signaux d'entrées à thermocouple;
  - mesure de signaux d'entrées à RTD;
  - avec un adaptateur spécifique, mesure de signaux d'entrées de transducteur de pression dont une échelle permettant la mesure de 0-15psi (100kPa) et 0-25psi (166,67kPa);
  - mesure avec une entrée ohmmètre jusqu'à 1000,0 $\Omega$  au minimum;
  - mesure avec une entrée fréquencemètre jusqu'à 10,000kHz au minimum;
  - mesure avec une entrée périodemètre jusqu'à 10.000sec minimum;
- possibilité de générer des signaux de sorties:
  - plusieurs plages de tension de sorties c.c., par exemple,  $\pm 25,000\text{mV}$ ,  $\pm 250,00\text{mV}$ ,  $\pm 2,5000\text{V}$ ,  $\pm 25,000\text{V}$ ;
  - plusieurs plages de courant de sorties c.c., par exemple, 0-25.000mA, 0-60.000mA avec alimentation de boucle disponible;
  - de thermocouple;
  - de RTD;
  - avec un adaptateur spécifique, de transducteur de pression;
  - de fréquence;
  - de génération d'impulsion;

- fonctionnant à batterie rechargeable pour un temps d'opération minimale de 3 heures;
- répétabilité de l'ordre de 0.01% de la plage de mesure « range »;
- isolation d'entrée/sortie de l'ordre de 500v;
- température de fonctionnement: -20°C à +45°C

### **4.3.1 Procédure d'ajustement de la gamme de mesure**

Les erreurs les plus souvent rencontrées en instrumentation industrielle sont:

- l'erreur de décalage, à cause d'une erreur engendrée par la limite inférieure (le zéro) du transducteur ou du transmetteur;
- l'erreur de sensibilité, à cause d'une erreur occasionnée par un mauvais ajustement du gain du système d'amplification du transducteur ou du transmetteur.

L'étalonnage doit être fait, de façon minimale, en deux points de la fonction de transfert:

1. l'ajustement du zéro avec un étalon spécifique de référence;
2. l'ajustement de la sensibilité « span » à l'aide d'un autre étalon près de la valeur de la limite supérieure de la gamme de mesure.

Généralement, une vis permet l'ajustement du zéro « offset » et une autre vis permet l'ajustement du gain « span » du transmetteur.

Pour plusieurs appareils, les réglages s'influencent entre eux. Donc, il faut recommencer la procédure d'étalonnage à plusieurs reprises pour obtenir des valeurs qui convergent vers les valeurs recherchées.

Par la suite, procédez à des lectures répétées de grandeurs physiques pour des valeurs de référence.

Établissez graphiquement la fonction de transfert pour des valeurs à intervalles de 10% de la gamme de mesure. Constatez l'erreur de décalage et l'erreur de sensibilité. S'il y a lieu, recommencer l'étalonnage de l'appareil. Avec ce graphique, vous pourrez examiner les caractéristiques de linéarité du système.

Cas d'un transmetteur de pression différentiel :

### **4.3.2 Validation à l'aide du multimètre**

À l'aide d'un multimètre, mesurez la valeur de la tension présente à la sortie du transducteur de tension par rapport à la fonction de transfert fournie.

Pour le transmetteur 4-20mA, effectuez la mesure de la tension présente aux bornes de la résistance de 250Ω pour la limite inférieure de la gamme de mesure. La tension mesurée devrait être de +1v.

Effectuez la mesure de la tension aux bornes de la résistance de 250Ω pour la limite supérieure. La tension devrait être de +5v.

Effectuez la mesure de la tension aux bornes de la résistance de 250Ω pour une valeur correspondant à 50% de la gamme de mesure. La tension devrait être de +3v. 3.2.

## **5 CAPTEURS**

### **5.1 CAPTEURS DE POSITION**

#### **5.1.1 PRESENTATION**

Les capteurs de positions sont souvent utilisés avec un corps d'épreuve pour former d'autre type de capteur. Les capteurs de niveau à flotteur utilisent un capteur de position pour déterminer la position du flotteur.

Pour mesurer une position linéaire, on utilise soit un capteur linéaire, soit un capteur rotatif associé à une liaison poulie.

#### **5.1.2 CAPTEURS ANALOGIQUES**

##### **5.1.2.1 Présentation**

Ce sont des capteurs généralement basés sur la variation d'impédance d'un dipôle passifs. La variation de la grandeur physique à mesurer peut-être liée a :

- la variation de résistance (R en Ohm) d'un résistor ;
- la variation de capacité (C en F) d'un condensateur ;
- la variation d'inductance (L en H) d'une self.

Ils existe aussi des capteurs basés sur la variation d'une mutuel inductance (M en H) de deux selfs.

##### **5.1.2.2 Potentiomètre résistif**

###### **5. 1.2.2.1 Rappel de physique**

On rappel que la résistance (en  $\Omega$ ) d'un conducteur s'écrit :  $R = \frac{\rho \times L}{S}$

avec :

- $\rho$  : La résistivité du conducteur en  $\Omega/m$  ;
- L : La longueur du conducteur en m ;
- S : La section du conducteur en  $m^2$ .

###### **5.1.2.2.2 Principe de fonctionnement**

La piste résistive est placée sur la partie fixe du capteur et le mouvement mécanique à mesurer est accouplé à un curseur qui se déplace sur celle-ci. Ainsi, la résistance entre un point fixe et la partie mobile du potentiomètre est fonction de la position à mesurer.

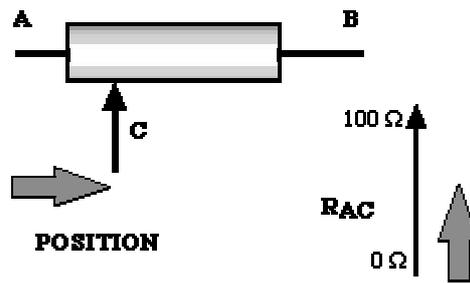


Figure 5-1 Potentiomètre

L'élément sensible est constitué d'un support sur lequel est déposée une pâte résistive qui incorpore un liant plastique et du carbone (cas des capteurs à piste résistive) ou un bobinage résistif (cas des capteurs à fil résistif).

L'élément sensible ainsi obtenu peut être rapporté :

- soit à l'intérieur d'une jupe cylindrique pour constituer un potentiomètre rotatif ;

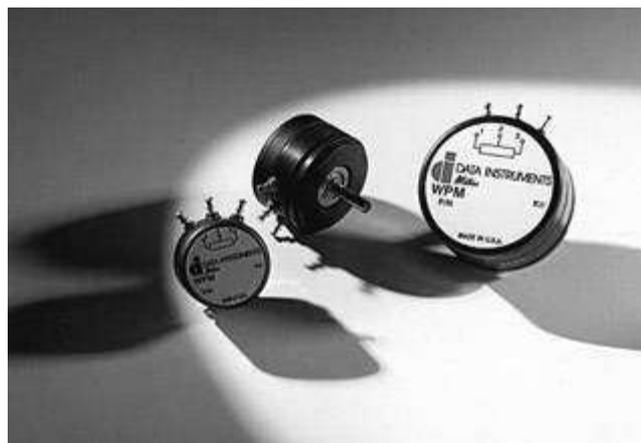


Figure 5-2

- soit fixé sur un support plat pour réaliser un capteur de déplacement rectiligne.



Figure 5-3

Remarque : Il existe des potentiomètres rotatifs à plusieurs tours.

### 5.1.2.2.3 Applications

Ce sont des capteurs très économiques, et d'une mise en oeuvre aisée.

Ce sont des capteurs très utilisés dans les applications courantes comme la détermination de la position d'un bras de robot.



Figure 5-4 Capteur rotatif sur bras de robot

### 5.1.2.3 Capteurs capacitifs

#### 5.1.2.3.1 Rappel de physique

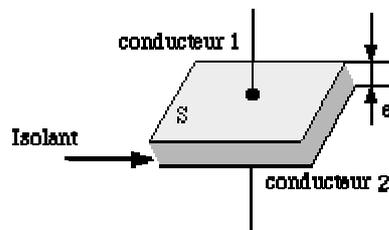


Figure 5-5

Un condensateur est composé de deux conducteurs séparés par un isolant.

Capacité (en Farad) du condensateur plan :  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{e}$

avec :

- $\epsilon_0$  : Permittivité du vide =  $8,85 \cdot 10^{-12}$  ;
- $\epsilon_r$  : Permittivité relative de l'isolant ;
- $S$  : Surface en regard en  $m^2$  ;
- $e$  : Epaisseur de l'isolant en m.

### 5.1.2.3.2 Principe de fonctionnement

Pour faire varier la capacité du condensateur en fonction du déplacement, on fait varier soit la surface en regard, soit l'épaisseur  $e$ .

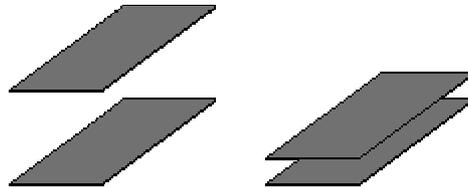


Figure 5-6

### 5.1.2.3.3 Domaine d'utilisation

L'étendue de mesure est faible. De l'ordre du millimètre pour la variation de l'épaisseur et de l'ordre du cm pour la variation de la surface en regard.

Dans les capteurs de pression, ils sont utilisés pour mesurer le déplacement d'une membrane soumise aux forces de pression.

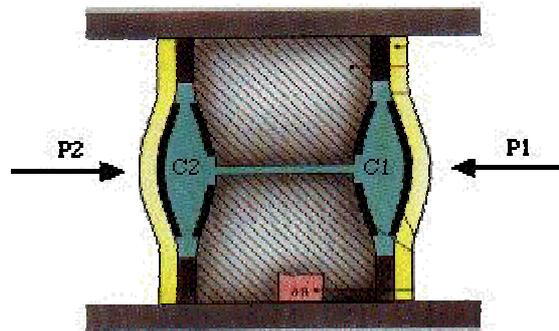


Figure 5-7 Capteur différentiel de pression

### 5.1.2.4 Capteurs inductifs



Figure 5-8

#### 5.1.2.4.1 Rappel de physique

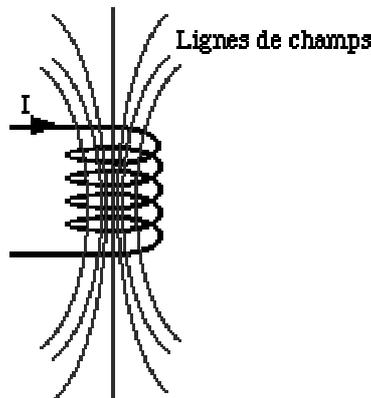


Figure 5-9

Un bobinage de fils conducteurs, parcouru par un courant électrique, crée un champ magnétique  $B$ .

On peut canaliser les lignes de champs en ajoutant un circuit magnétique :

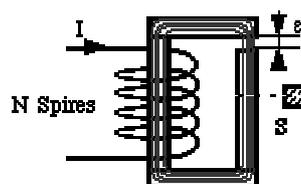


Figure 5-10

Dans le cas ci-dessus on peut écrire :  $N \times I = \mathcal{R} \times \Phi$

avec :

- $N$  : Nombre de spires ;
- $I$  : Courant dans les spires en A ;
- $\mathcal{R}$  : Reluctance du circuit magnétique en H-1 ;
- $\Phi$  : Le flux du champ magnétique traversant les spires en Wb.

#### 5.1.2.4.2 Principes de fonctionnement

- **Inductance variable :**

Un noyau magnétique se déplace à l'intérieur d'une bobine. Ce déplacement entraîne une variation de l'inductance de la bobine.

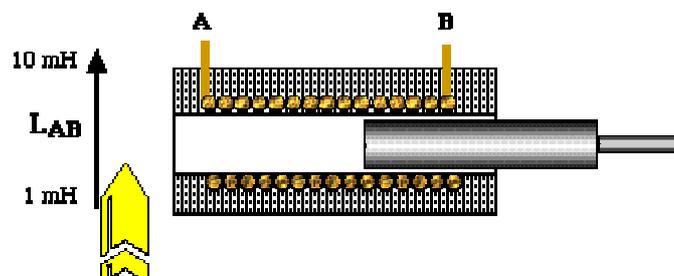


Figure 5-11

- Transformateur différentiel (L.V.D.T.) :



Figure 5-12

Le noyau magnétique cylindrique constituant l'élément sensible se déplace librement dans les bobines suivant leur axe commun. Il est prolongé par une tige reliée à l'objet mobile dont on veut mesurer le déplacement. Le déplacement du noyau autour de la position d'équilibre du pont génère deux tensions représentatives de l'amplitude ce déplacement et de son sens.

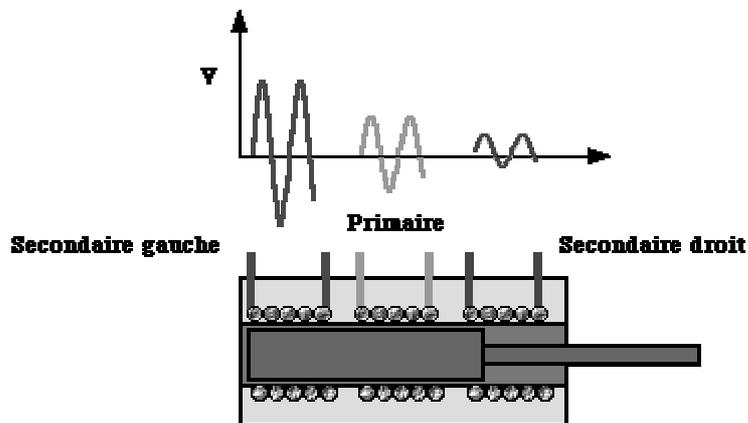


Figure 5-13 Enroulements d'un LVDT

La valeur de ce déplacement est obtenue par comparaison des valeurs crêtes de chaque signal.

- **Le résolveur :**

C'est un capteur rotatif, dont le fonctionnement se rapproche de celui du LVDT. Un rotor, alimenté en alternatif, induit des tensions alternatives sur des roulements du stator.

La valeur de la position du rotor est obtenue par comparaison des valeurs crêtes et des phases de chaque signal.

Extrait vidéo Nathan, "Les capteurs de position analogique"

#### 5.1.2.4.3 Applications

Ces capteurs de part leur légèreté et leurs frottements réduits, permettent de bonnes mesures dynamiques. Ils supportent de fortes températures et pressions. Leur durée de vie est importante. Ils sont utilisés en milieu fortement radioactif du fait d'une bonne fiabilité.

### 5.1.3. LES CODEURS ROTATIFS

#### 5.1.3.1. Fonction d'un codeur de position rotatif

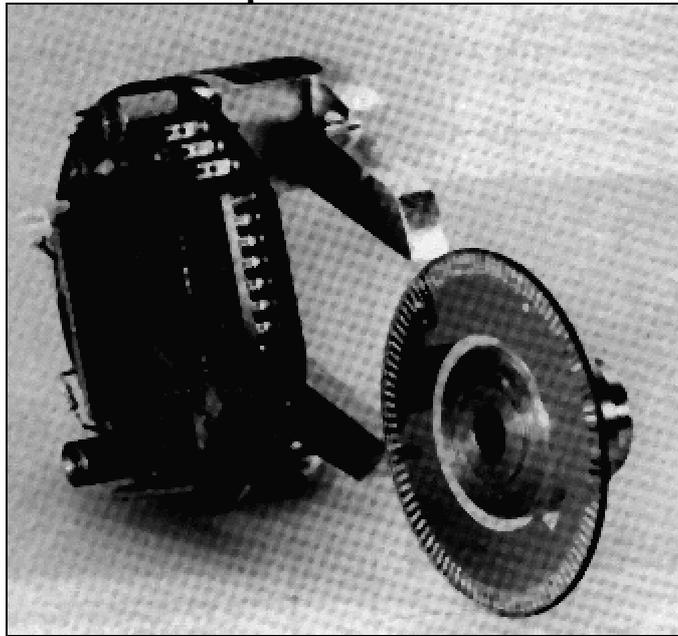


Figure 5-14

Le contrôle du déplacement et de la position d'un mobile est un problème couramment rencontré sur un grand nombre de systèmes automatisés. Le codeur rotatif est un capteur de position angulaire. Lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne, son axe fait tourner un disque qui lui est solidaire. Ce disque comporte une succession de parties opaques et transparentes.

Une lumière émise par des diodes électroluminescentes, (DEL) traverse les fentes de ce disque et crée sur les photodiodes réceptrices un signal analogique. Une interface électronique (qui est incluse dans le codeur) amplifie ce signal puis le convertit en signal carré qui est alors transmis à un système de traitement (généralement un A. P. I.).

Il existe deux types de codeur de position rotatifs :

- Le codeur incrémental
- Le codeur absolu

### 5.1.3.2. Le codeur incrémental

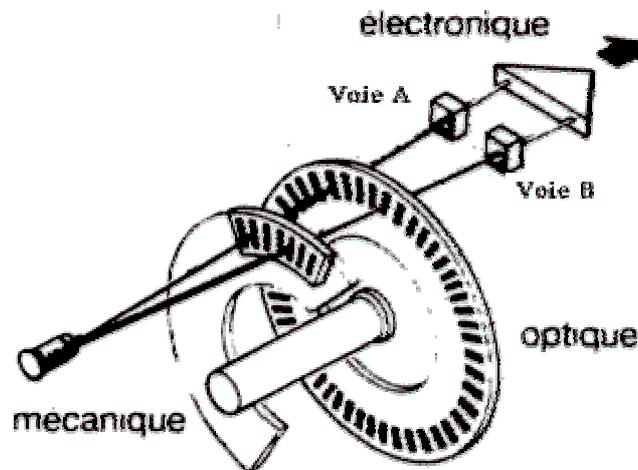


Figure 5-15 Principe de codeur incrémental

#### 5.1.3.2.1 Principe de fonctionnement

Les codeurs incrémentaux sont destinés à des applications de positionnement et de contrôle de déplacement d'un mobile par comptage et décomptage des impulsions qu'ils délivrent. Le disque d'un codeur incrémental comporte deux types de pistes :

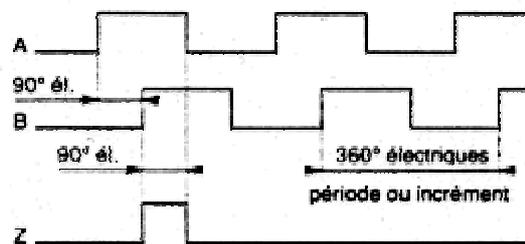
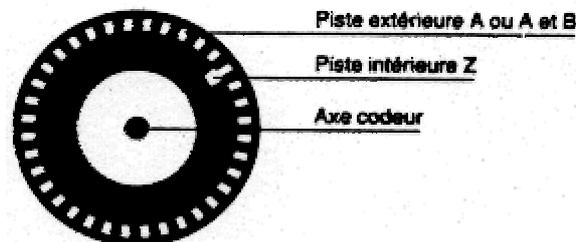


Figure 5-16 Disque du codeur incrémental

La piste extérieure : (voie A ou voie A et B) est divisée en « n » intervalles d'angles égaux alternativement opaques et transparents, « n » s'appelant **la résolution** ou nombre de périodes ; c'est en effet le nombre d'impulsions qui seront délivrées par le codeur pour un tour complet de son disque.

Derrière la piste extérieure sont installées deux photodiodes décalées qui délivrent des signaux carrés A et B en quadrature.

### 5.1.3.2.2 Détermination du sens de rotation

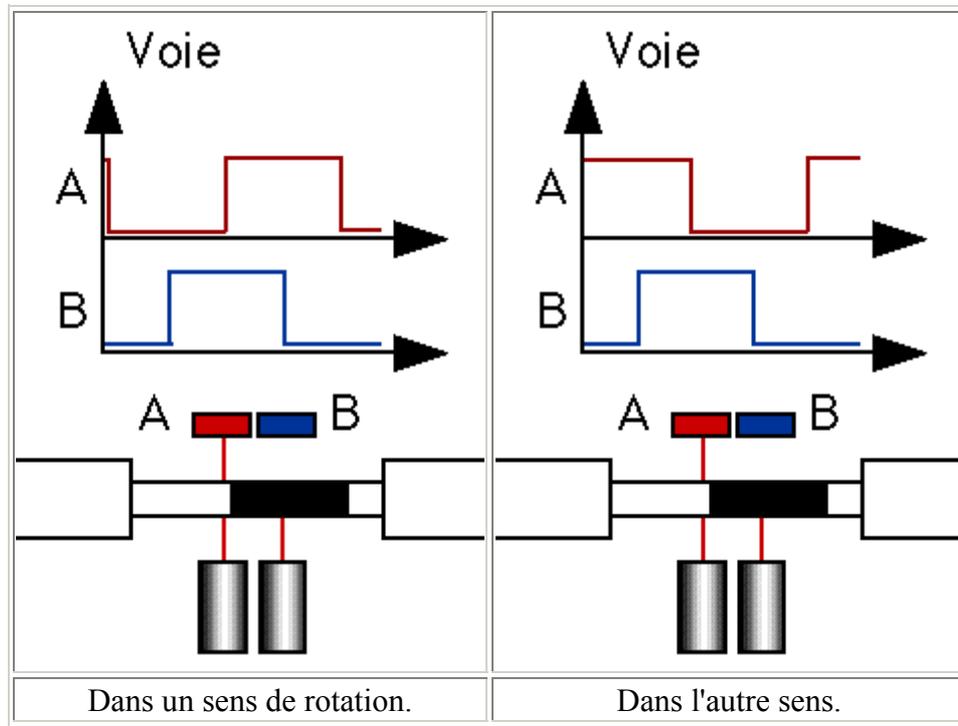


Figure 5-17

Le déphasage de  $90^\circ$  électriques des signaux A et B permet de déterminer le sens de rotation :

- dans un sens pendant le front montant du signal A, le signal B est à 0.
- dans l'autre sens pendant le front montant du signal A, le signal B est à 1.

La piste intérieure : (voie 2) comporte une seule fenêtre transparente. Celle-ci ne délivre donc qu'un seul signal par tour. Ce signal Z appelé «top zéro» dure  $90^\circ$  électriques et est synchrone des signaux A et B. Ce «top zéro» détermine une position de référence et permet la réinitialisation à chaque tour.

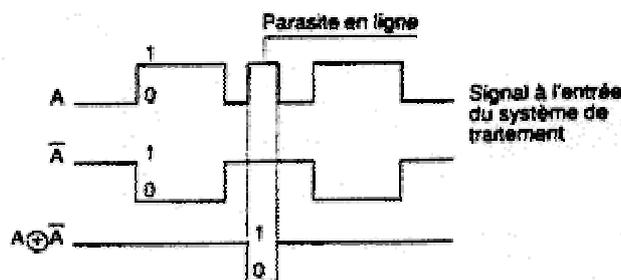
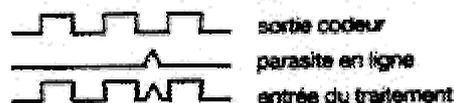
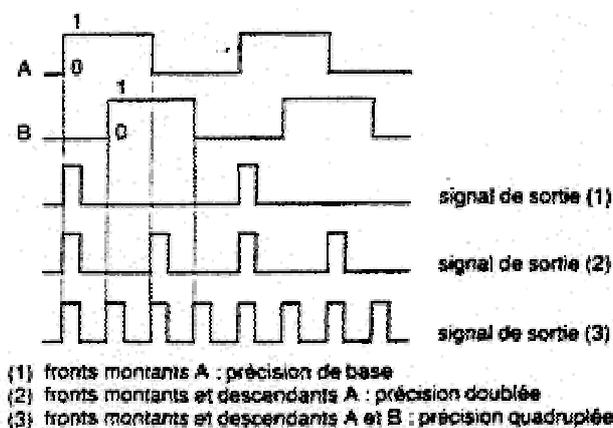
L'utilisation d'un codeur incrémental nécessite une mise à zéro du codeur à sa mise sous tension.

### 5.1.3.2.3 Exploitation des voies A et B :

Fréquemment un traitement électronique (intégré au codeur) permet de délivrer les signaux complémentaires  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ , et  $\underline{Z}$ . Nous disposons donc à la sortie du codeur incrémental de six signaux A,  $\underline{A}$ , B,  $\underline{B}$ , Z,  $\underline{Z}$  qui autorisent trois niveaux de précision d'exploitation :

- Utilisation des fronts montants de la voie A seule : Exploitation simple correspondant à la résolution du codeur.

- Utilisation des fronts montants et descendants de la voie A seule : La précision d'exploitation est doublée.
- Utilisation des fronts montants et descendants des voies A et B: La précision d'exploitation est quadruplée.



La somme logique  $A \oplus \bar{A}$  doit toujours être égale à 1.  
En présence d'un parasite sur la voie A en sortie codeur,  $A \oplus \bar{A} = 0$ .  
Le même contrôle peut être réalisé sur les voies B et Z.

Figure 5-18

#### 5.1.3.2.4 Élimination des parasites :

L'apparition des parasites en ligne peut perturber le comptage des impulsions délivrées par le codeur incrémental. En effet ces parasites seront parfois comptabilisés de la même façon que les impulsions délivrées par le codeur.

Si le système de traitement est conçu pour pouvoir exploiter les différents signaux  $A$ ,  $\bar{A}$ ,  $B$ ,  $\bar{B}$ ,  $Z$ ,  $\bar{Z}$  délivrés par le codeur incrémental il sera possible de différencier les impulsions codeur des impulsions parasites évitant ainsi la prise en compte de ces dernières.

### 5.1.3.3. Le codeur absolu



Figure 5-19

Le disque de ce type de codeur comporte un nombre « N » de pistes ; chaque type a son propre système de lecture (diode D.E.L. et photodiode).

#### 5.1.3.3.1 Principe de fonctionnement :

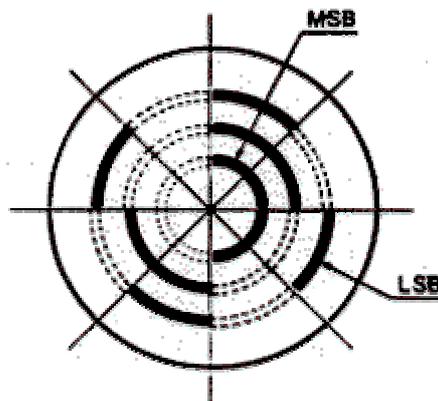


Figure 5-20

La première piste en partant du centre du disque est composée d'une moitié opaque et d'une moitié transparente, la lecture de celle piste permet de déterminer dans quel demi-tour du disque on se situe.

C'est la piste **MSB** « Most Significant Bit » = bit de poids le plus fort.

La piste suivante, en allant vers l'extérieur, est divisée en quatre quarts alternativement opaques et transparents. La lecture de cette piste, combinée avec la lecture de la piste précédente, permet de déterminer dans quel quart de tour du disque on se situe.

La piste suivante permet de déterminer dans quel huitième de tour on se situe, la suivante dans lequel seizième de tour on se situe. etc ...

La dernière piste, la plus extérieure, est la piste **LSB** « Least Significant Bit » = bit de poids le plus faible.

C'est elle qui donne la précision finale du codeur appelée résolution.

- Si on appelle N le nombre de pistes, cette dernière piste comportera  $2^N$  points. Le nombre de positions codées sur un tour du disque sera  $2^N$ , on dira alors que le codeur a une résolution de  $2^N$  points par tour.
- La lecture simultanée de toutes les pistes (informations binaires) nous donne un code binaire représentatif de la position du disque du codeur dans le tour.
- Le code binaire délivré par le codeur comporte autant de bits qu'il y a de pistes sur le disque soit N bits.
- Le câblage du codeur mobilisera donc N entrées du système de traitement (voies parallèles).

Si plusieurs codeurs sont utilisés, le nombre d'entrées du système de traitement pourrait devenir prohibitif. Pour remédier à cela, chaque codeur possède une entrée MX permettant de bloquer ses sorties quand l'unité de traitement émet un signal d'inhibition. Il devient alors possible de raccorder plusieurs codeurs sur les mêmes entrées de l'unité de traitement. Le seul codeur actif est celui qui ne reçoit pas le signal d'inhibition MX.

### 5.3.3.2 Codes délivrés par un codeur absolu :

Le code binaire délivré par un codeur rotatif absolu peut être soit du binaire naturel (binaire pur), soit du binaire réfléchi (**code Gray**).

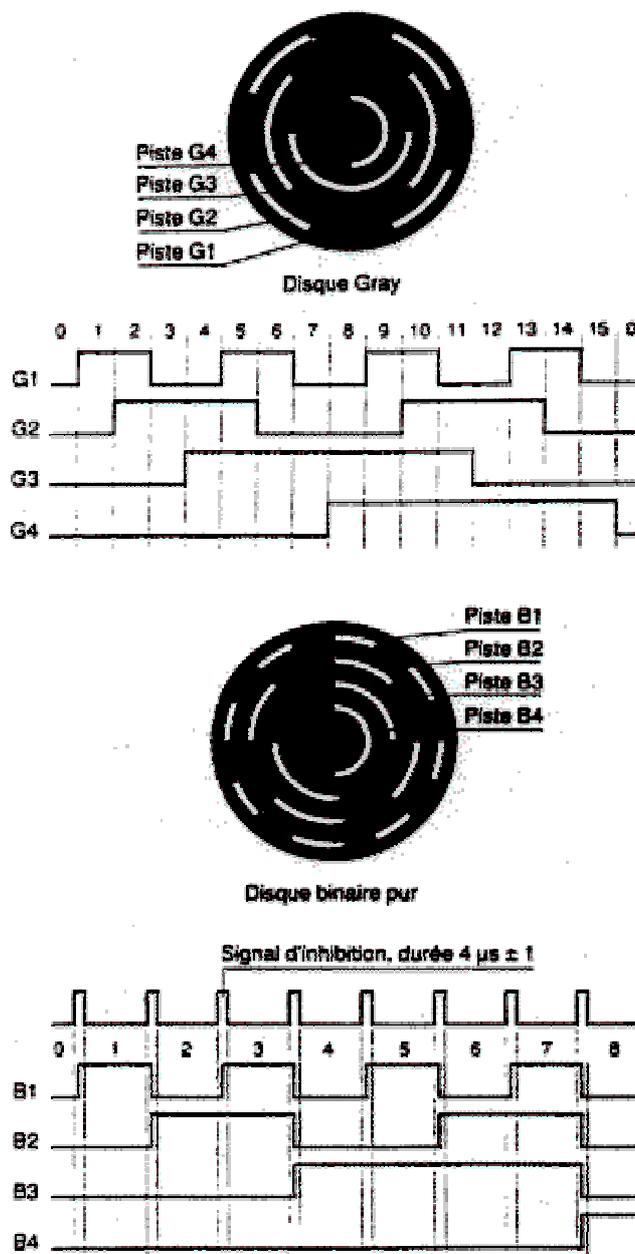


Figure 5-21

Le code binaire naturel a l'avantage de pouvoir être directement utilisé par l'unité de traitement ; en effet c'est un code pondéré, c'est-à-dire qu'il permet d'effectuer les quatre opérations arithmétiques sur des nombres exprimés dans ce code. Il présente cependant l'inconvénient d'avoir plusieurs bas qui changent d'état entre deux positions. Ces changements d'états ne pouvant rigoureusement pas être simultanés ils peuvent générer des erreurs si une lecture est effectuée à ce moment là par l'unité de traitement.

Pour pallier à cet inconvénient, certains codeurs délivrent un signal d'inhibition qui bloque les sorties à chaque changement d'état.

Le code binaire réfléchi ne présente pas cet inconvénient car un seul bit à la fois change d'état. Mais ce code n'est pas pondéré et ne peut donc être directement exploité par l'unité de traitement, celle-ci devra opérer un transcodage binaire réfléchi / binaire naturel avant toute utilisation.

#### 5.1.3.3.3 Codeur absolue simple tour /Codeur absolue multi-tour :

Le codeur absolu simple tour, décrit précédemment, donne la position absolue dans chaque tour.

Le codeur absolu multi tours permet, grâce à rajout d'un système de démultiplication et d'un disque supplémentaire, d'indiquer le nombre de tours. Par analogie avec ce qui a été vu précédemment, si le disque supplémentaire comporte N pistes le codeur sera capable de coder  $2^N$  tours.

#### 5.1.3.3.4 Choix des étages de sorties :

Afin de pouvoir s'adapter aux différentes entrées des unités de traitement, les codeurs sont équipés de sorties à collecteur ouvert qui sont soit :

- Du type PNP pour les unités de traitement à entrées à « injection de courant »
- Du type NPN pour les unités de traitement à entrées à « extraction de courant »

#### 5.1.3.4. Comparaison des deux concepts codeur incrémental et codeur absolu :

Codeur incrémental	Codeur absolu
<b>Avantages</b>	
Le codeur incrémental est de conception simple (son disque ne comporte que deux pistes) donc plus fiable et moins onéreux qu'un codeur absolu.	<p>Il est insensible aux coupures du réseau : la position du mobile est détenue dans un onde qui est envoyé en parallèle au système de traitement.</p> <p>L'information de position est donc disponible dès la mise sous tension.</p> <p>Si le système de traitement «saute» une information de position délivrée par le codeur, la position réelle du mobile ne sera pas perdue car elle restera valide à la lecture suivante.</p>
<b>Inconvénients</b>	
Il est sensible aux coupures du réseau : chaque coupure du courant peut faire perdre la position réelle du mobile à l'unité de traitement. Il faudra alors procéder à la réinitialisation du système automatisé.	<p>Il est de conception électrique et mécanique plus complexe aussi son coût sera plus élevé qu'un codeur incrémental.</p> <p>Les informations de position sont délivrées « en parallèle » ; son utilisation mobilisera donc un nombre important d'entrées du système de traitement (A.P.I. par exemple).</p>

Il est sensible aux parasites en ligne, un parasite peut être comptabilisé par le système de traitement comme une impulsion délivrée par le codeur.

Les fréquences des signaux A et B étant généralement élevées, il faudra vérifier que le système de traitement est assez rapide pour prendre en compte tous les incréments (impulsions) délivrés par le codeur. Le non comptage d'une impulsion induit une erreur de position qui ne peut être corrigée que par la lecture du « top zéro ».

## 5.2. Capteurs de pression



Figure 5-22 Capteurs et transmetteurs de pression

### 5.2.1 Constitution des capteurs de pression.

#### 5.2.1.1 Principes.

Dans tous les cas, les capteurs de pression peuvent se ramener au schéma synoptique ci-dessous.

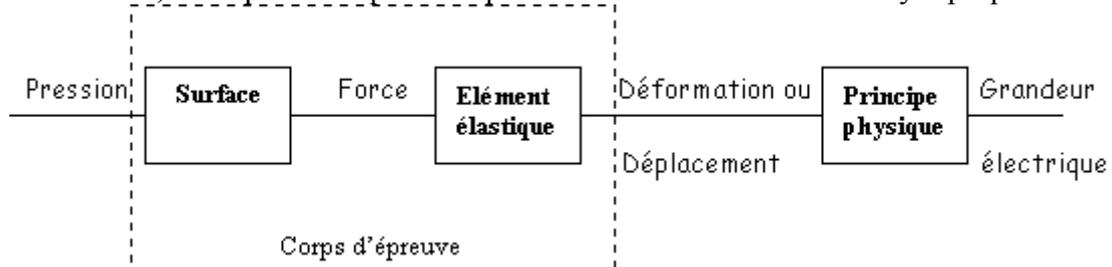


Figure 5-23

Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer a pour rôle de transformer celle-ci en grandeur physique mesurable.

On distingue deux grandes familles :

- les capteurs utilisant un liquide.
- Les capteurs à déformation de solide.

Il est bon de distinguer les indicateurs de pression, qui permettent simplement de visualiser, des capteurs - transmetteurs qui délivrent un signal analogique (4-20 mA, 0-10 V etc...) correspondant à la grandeur mesurée.

### 5.2.1.2. Capteurs utilisant un liquide

On trouve, parmi ces instruments le plus simple de tous les indicateurs de pression de l'industrie, le manomètre à liquide. Lorsque les pressions statiques sont faibles et que seule une indication visuelle est requise, on se sert de manomètres visuels. La figure ci-dessous montre respectivement les très simples manomètres à tube en U, à puits (ou réservoir) et incliné.

Dans le cas de pressions élevées, on se sert de mercure comme liquide. Dans ce cas, c'est la position d'un flotteur à la surface du mercure qui définit le niveau de mercure, lequel à son tour définit la pression requise pour lui faire atteindre ce niveau.

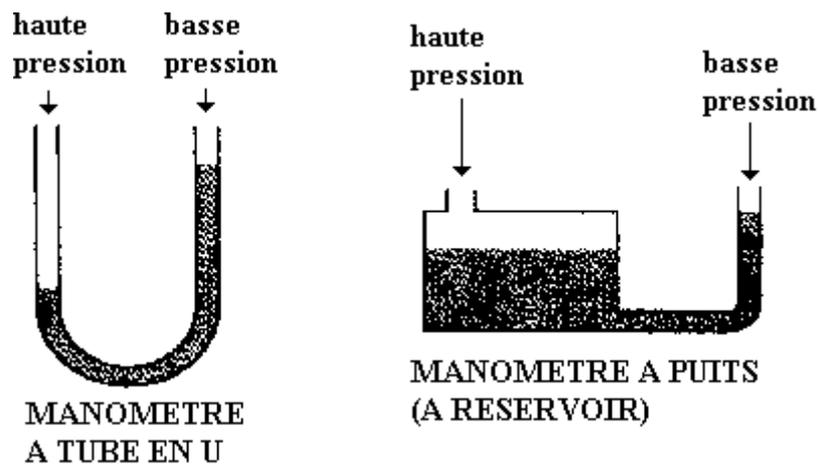


Figure 5-24

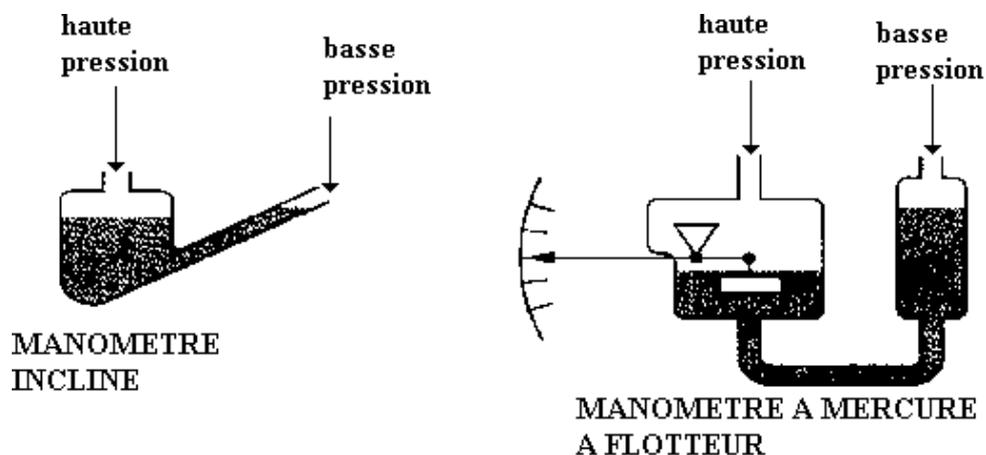


Figure 5-25

### 5.2.1.3 Capteurs à déformation de solide.

On utilise ces capteurs en cas de besoin d'une indication ou d'un enregistrement direct de la pression différentielle et là où un fluide de remplissage sera nocif pour le procédé.

Sous l'action de la pression, un solide se déforme de manière élastique. Différents matériaux sont utilisés, caoutchouc, matières plastiques, alliages métalliques, acier inoxydable.

La membrane peut être soumise à une pression sur l'une de ses faces ou à deux pressions (une par face). La pression peut agir directement sur la membrane ou indirectement par l'intermédiaire d'une tige ou d'une liaison hydraulique.

On trouve notamment :

- des manomètres à tube de Bourdon, à soufflet, à membrane dont jauge de contrainte, transformateur différentiel et effet capacitif.
- Des manomètres à effet piézo – électrique.

Le tableau ci-dessous rappelle quelques critères de choix de ce type de capteurs.

Principe	Type	Sous type	Critères	
Colonne de liquide	Manomètre à tube en U		-indicateur -faibles pressions	
	Manomètre à tube incliné		-mesures des très faibles pressions -plus grande précision que le tube en U	
Déformation de solide	Manomètre à tube de Bourdon		-indicateur à aiguille -peut fonctionner en déprimomètre -peut être équipé de contacts mini et maxi pour une utilisation en pressostat	
	Manomètre à soufflet		-mesure de la pression atmosphérique jusqu'à des pressions de 25 bar avec une bonne précision -peut être associé à un tambour enregistreur	
	Manomètre à membrane	Capteur à jauge de contrainte		-délivre un signal analogique fonction de la déformation de la jauge sous la pression -traitement d'un signal faible et influence de la température augmente la complexité et le coût du capteur
		Capteur à transfo. différentiel		-mesure d'une pression différentielle (courant induit par le déplacement de la membrane) -robuste et précision (-1%) -non conseillé pour les variations rapides de pression (quelques Hz)
Capteur à effet capacitif			-la capacité électrique varie en fonction de la déformation de la membrane -mesure des très faibles pressions -excellent temps de réponse	
Piézo – électrique	Capteur piézo-électrique		-la pression appliquée au quartz fait varier sa fréquence de résonance -temps de réponse très rapide -peu sensible (quelques millibars) -coût avantageux pour des pressions > 100 mbar	

- **transformateur différentiel** : Il se compose d'un enroulement primaire, de deux enroulements secondaire et d'un noyau magnétique mobile. Suivant la position du noyau, le primaire induit une f.e.m dans chacun des deux secondaires. Le déplacement du noyau entraîne des variations inverses de ces deux f.e.m. La différence des ces deux f.e.m constitue le signal de sortie.
- **La piézo-électricité** est la particularité que possèdent certains cristaux (quartz, céramique, titanate de baryum...) de se polariser électriquement lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. La quantité de charges électriques produites est proportionnelle sur une large plage aux **efforts** appliqués.

### 5.2.2. Les transmetteurs de pression.

Comme décrit précédemment, on utilise souvent le transmetteur de pression lorsqu'on doit réaliser l'indication et / ou l'enregistrement d'une pression en un lieu non adjacent à l'élément primaire en contact avec le milieu soumis à la pression.

La figure suivante donne un exemple de transmetteur électronique.

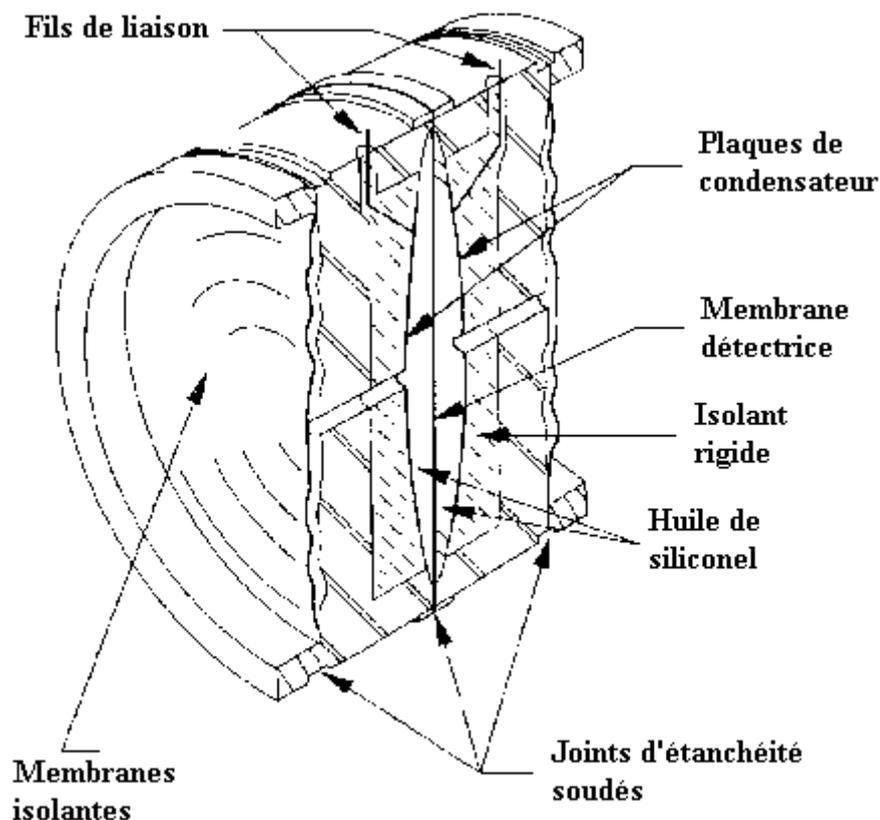


Figure 5-26

Le principe utilisé est celui de la technique capacitive à deux fils. La pression du procédé est transmise à travers les membranes isolantes et un fluide de remplissage constitué d'huile de

silicone à une membrane détectrice placée au centre de la cellule.

La membrane détectrice agit comme un ressort étiré qui fléchit en réponse à une pression différentielle qui la traverse.

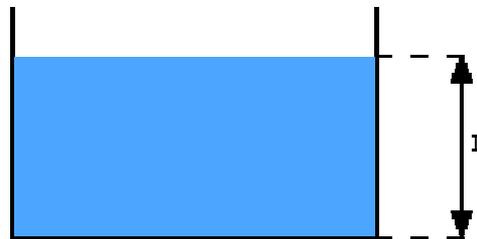
Le déplacement de la membrane détectrice est proportionnel à la pression différentielle.

Sa position est détectée par les plaques de condensateur qui sont situées de part et d'autre de la dite membrane. La différence de capacité entre la membrane détectrice et les plaques de condensateur est convertie électroniquement en un signal 4-20 mA.

## 5.3.MESURE ET DETECTION DE NIVEAU

### 5.3.3.1. METHODES HYDROSTATIQUES

#### 5.3.1.1. Rappel de physique



$$P = \rho g L$$

Figure 5-27

Pour un liquide homogène donné, la pression relative en fond de réservoir est proportionnelle au niveau de celui-ci. La mesure de cette pression nous informe directement sur le niveau de liquide, mais dépend, de la masse volumique  $\rho$  du liquide.

#### 5.3.1.2. Flotteur

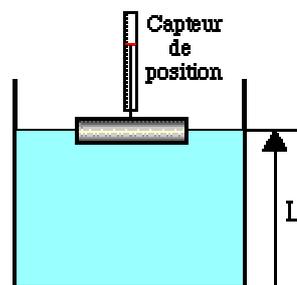


Figure 5-28

Le flotteur se maintient à la surface du liquide. Il est solidaire d'un capteur de position qui délivre un signal électrique correspondant au niveau. Sa position est peu dépendante de la masse volumique de liquide.

### 5.3.1.3. Plongeur

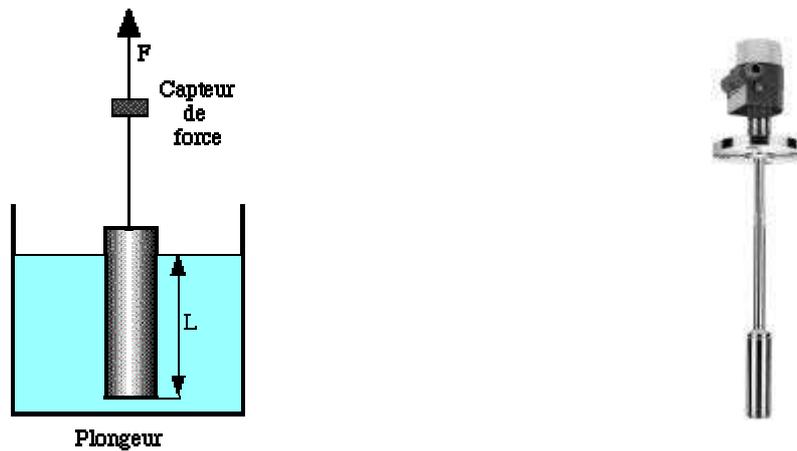


Figure 5-29

Le plongeur est un cylindre immergé dont la hauteur est au moins égale à la hauteur maximale du liquide dans le réservoir. Il est suspendu à un capteur dynamométrique qui se trouve soumis à une force  $F$  (le poids apparent), fonction de la hauteur  $L$  du liquide :

$$F = P - \rho g s L$$

où  $P$  est le poids du plongeur,  $s$  est l'aire de sa section, et  $\rho g s L$  est la poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur ( $\rho$  : masse volumique du liquide,  $g$  : accélération de la pesanteur).

### 5.3.1.4. Mesure de pression



Figure 5-30

#### 5.3.1.4.1 Principe de fonctionnement

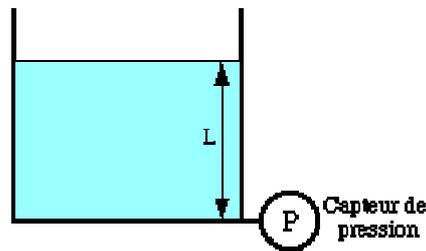


Figure 5-31

Le capteur de pression mesure la pression relative au fond du réservoir. Cette pression est l'image du niveau L du liquide :

$$L = P/\rho g$$

#### 5.3.1.4.2 Mesure de niveau à bulles

Pour mesurer la pression, on peut utiliser un système à bulle.

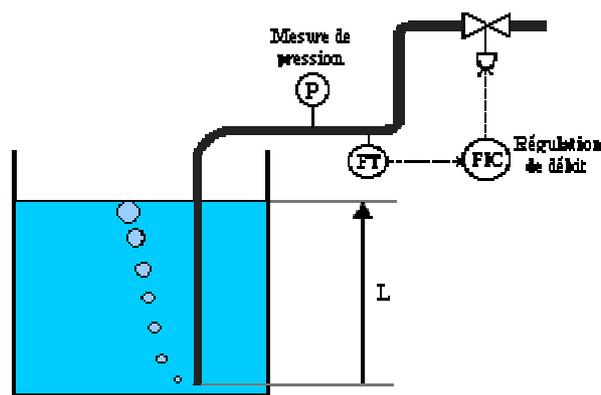


Figure 5-32

Le système comporte :

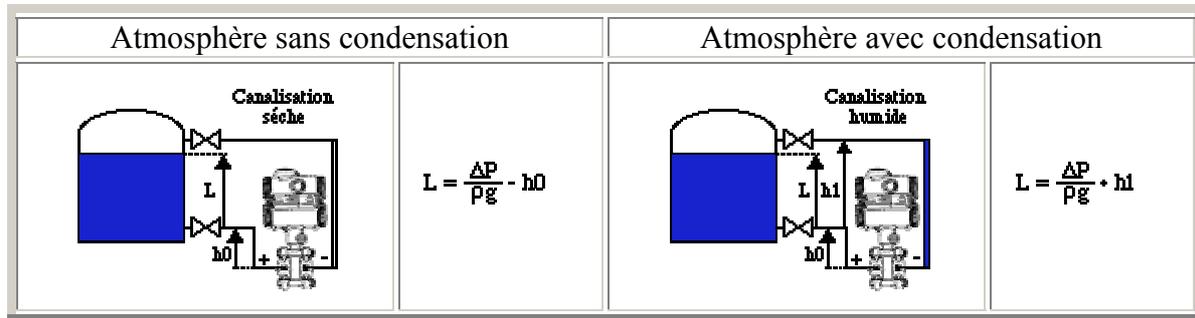
- Une canne d'injection ;
- Un manomètre mesurant la pression d'air de bullage ;
- Un contrôleur de débit visuel (dit bulleur) ;
- Un régulateur de débit ;

Le régulateur de débit contrôle celui-ci de manière à avoir un débit très faible. Ainsi, en négligeant les pertes de charges, la pression P est la mesure de la pression en bout de canne. P fournit une mesure de L.

#### 5.3.1.4.3 Mesure en réservoir fermée

Si le réservoir est fermé, on utilise un capteur de pression différentiel. Il existe alors deux montages différents. Si l'atmosphère est sans condensation, on utilisera un montage avec une

canalisation sèche, si l'atmosphère est avec condensation, le montage sera avec une canalisation humide.



### 5.3.1.5. Mesure de masse volumique

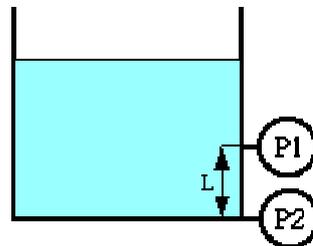


Figure 5-30

La mesure de la différence de pression  $P_2 - P_1$  permet de connaître la masse volumique du liquide à l'intérieur du réservoir :

$$\rho = (P_2 - P_1) / gL$$

### 5.3.2. METHODES ELECTRIQUES

Ce sont des méthodes employant des capteurs spécifiques, c'est à dire traduisant directement le niveau en signal électrique. Leur intérêt réside dans la simplicité des dispositifs et la facilité de leur mise en œuvre.

#### 5.3.2.1. Capteurs conductimétriques



Figure 5-31

### 5.3.2.1.1 Présentation

La sonde est formée de deux électrodes cylindriques, le rôle de l'une d'elles pouvant être assuré par le réservoir lorsqu'il est métallique. La sonde est alimentée par une faible tension (10 V) alternative afin d'éviter la polarisation des électrodes.

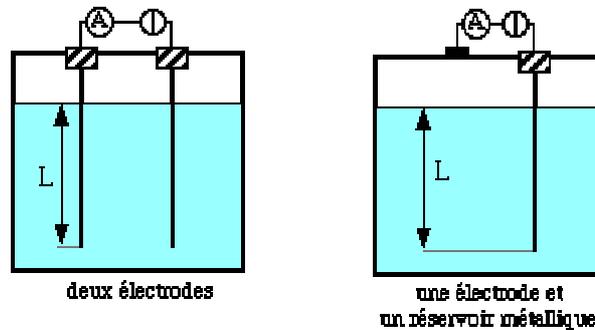


Figure 5-32

En mesure continue, la sonde est placée verticalement et sa longueur s'étend sur toute la plage de variation de niveau. Le courant électrique qui circule est d'amplitude proportionnelle à la longueur d'électrode immergée, mais sa valeur dépend de la conductivité du liquide.

### 5.3.2.1.2 Détection

En détection, on peut, par exemple, placer une sonde courte horizontalement au niveau seuil. Un courant électrique d'amplitude constante apparaît dès que le liquide atteint la sonde.

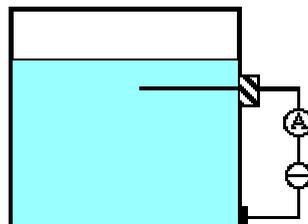


Figure 5-33

### 5.3.2.1.3 Domaine d'utilisation

Il est utilisable uniquement avec des liquides conducteurs (conductance minimale de l'ordre de 50 S), non corrosifs et n'ayant pas en suspension une phase isolante (huile par exemple). La pression est comprise entre le vide et 160 bar et une température comprise entre -200 °C et +250 °C.

### 5.3.2.2. Capteurs capacitifs



Figure 5-34

Lorsque le liquide est isolant, un condensateur est réalisé soit par deux électrodes cylindriques, soit par une électrode et la paroi du réservoir si celui-ci est métallique. Le diélectrique est le liquide dans la partie immergée, l'air en dehors. L'implantation des électrodes pour mesure en continu ou en détection s'effectue comme pour le capteur conductimétrique.

La mesure ou la détection de niveau se ramène à la mise en variation de capacité qui est d'autant plus importante que la constante diélectrique  $\epsilon_r$  du liquide est supérieure à celle de l'air ; on prend généralement comme condition d'emploi de la méthode  $\epsilon_r > 2$ . Dans le cas d'un liquide conducteur, on utilise une seule électrode recouverte d'un isolant qui constitue le diélectrique du condensateur dont l'autre est formée par le contact du liquide conducteur.

### 5.3.3.3. ONDES ACOUSTIQUES

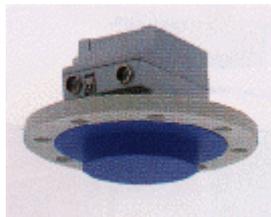


Figure 5-35

#### 5.3.3.3.1. Principe

En mesure continue, on utilise un transducteur fonctionnant successivement en émetteur et en récepteur. Ce transducteur placé au sommet du réservoir émet, dans un cône de faible ouverture, des trains d'onde acoustiques qui après réflexion sur la surface du liquide retournent vers le transducteur qui les convertit en signal électrique.

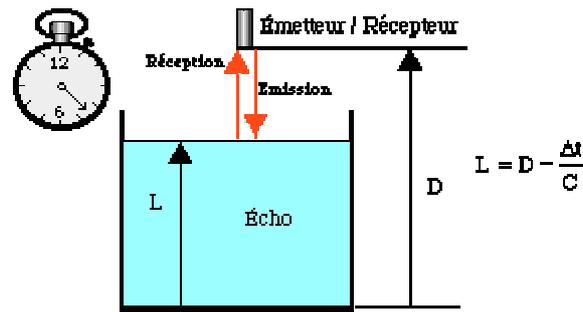


Figure 5-36

L'intervalle de temps  $\Delta t$  séparant l'émission de la réception du train d'ondes réfléchi est proportionnel à la distance du transducteur à la surface du liquide : il est donc fonction du niveau ;  $\Delta t$  est inversement proportionnel à la célérité du son qui dépend de la température : celle-ci doit donc être mesurée afin que puisse être effectuée la correction nécessaire. Le transducteur est une céramique piézo-électrique pour les ondes ultrasonores (40 kHz par exemple), il est de type électrodynamique pour les infrasonores (10 kHz par exemple). Les ondes sonores qui sont moins atténuées par la propagation trouvent application pour la mesure de distances importantes (de 10 à 30 m) alors que les ondes ultrasonores procurent aux distances plus courtes une meilleure précision.

### 5.3.3.3.2. Radar



Figure 5-37

Le principe de fonctionnement est le même que celui des ondes acoustiques, celle-ci sont alors remplacée par des ondes électromagnétiques.

La vitesse des ondes électromagnétique est indépendante de :

- La composition du gaz
- La température
- La pression
- Densité
- Turbulations

#### 5.3.3.4. ABSORPTION DE RAYONNEMENT GAMMA

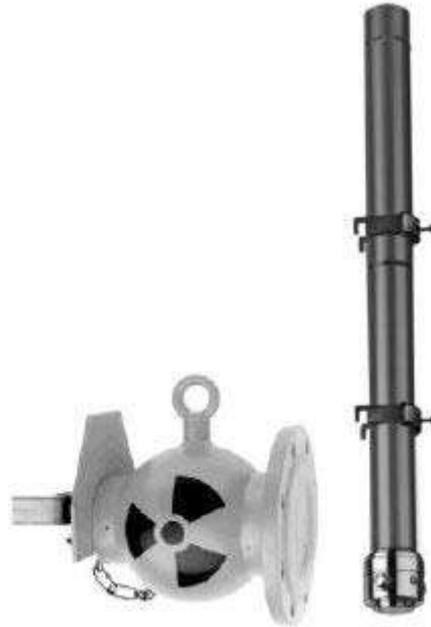


Figure 5-38

##### 5.3.3.4.1. Principe

La source et le détecteur sont placés à l'extérieur, de part et d'autre du réservoir ; cette disposition est particulièrement adaptée au cas de liquides très corrosifs ou sous haute pression ou à haute température. La source est un émetteur gamma. Le détecteur est soit une chambre d'ionisation soit un ou plusieurs tubes Geiger-Muller. La mesure est fiable et sans contact, indépendante des conditions de process variables comme la pression, la température, la viscosité, la corrosivité, ou des éléments internes (par ex. pales d'agitateur).

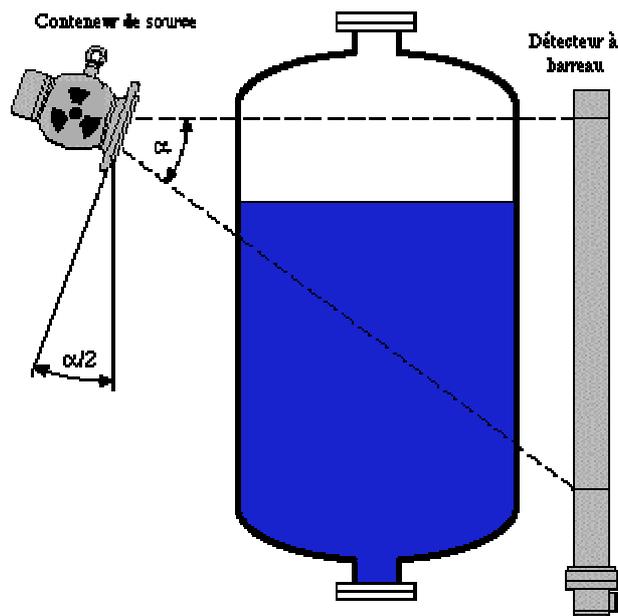


Figure 5-39

Le blindage de la source est réalisé de façon qu'il y ait émission d'un faisceau avec un angle d'ouverture tel qu'il balaie la hauteur totale du réservoir d'une part et du détecteur d'autre part. La montée du liquide dans le réservoir réduit progressivement l'intensité de dose reçue par le détecteur dont le courant de sortie décroît donc de façon continue, à mesure qu'augmente le niveau.

Pour les grands réservoirs ou relativement étroits, la source d'émission peut être montée à une plus grande distance du réservoir. Dans ce cas, des mesures de sécurité supplémentaire sont nécessaires.

Pour des étendue de mesure importante, plusieurs récepteurs peuvent être utilisés. L'emploi de deux sources peut être dicté non seulement pour des grande étendue de mesure, mais encore par l'exactitude de le métrage.

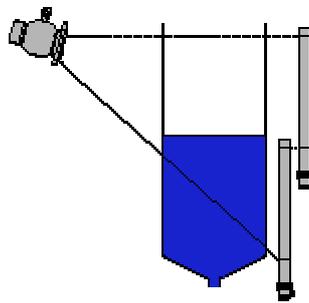


Figure 5-40

#### 5.3.3.4.2. Détection

En détection de niveau, la source et le détecteur sont placés en regard, au niveau du seuil à signaler. La source convenablement colmatée émet vers le détecteur un faisceau étroit et de faible divergence, le détecteur est monté horizontalement.

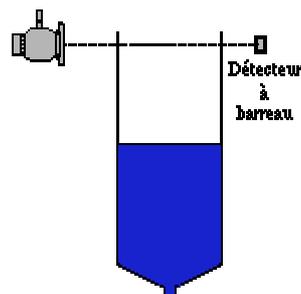


Figure 5-41

Selon que le niveau du liquide est supérieur ou inférieur au seuil, le faisceau est ou non atténué par le liquide, ce qui se traduit en un signal électrique binaire par le détecteur.

#### 5.3.3.4.3. Mesure de densité

On pourra utilisé cette technique pour mesurer la densité du fluide. Le récepteur sera monté en parallèle avec la canalisation transportant le fluide.

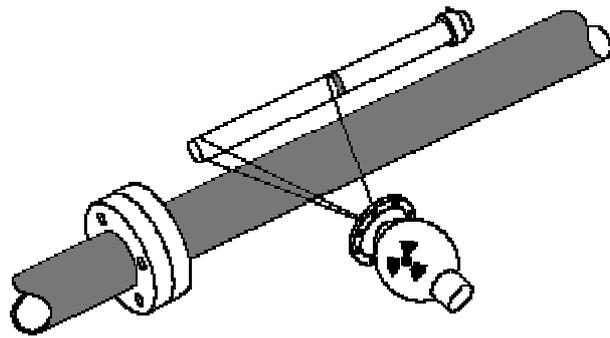


Figure 5-42

**5.3.3.5. COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES**

	Flotteur	Plongeur	Mesure de pression	Capteurs conductimétriques	Capteurs capacitifs	Ondes acoustiques	Radar	Absorption de rayonnement gamma
Standard très bien connu	++	+	+	+	+	-	-	-
Utilisable sur cuve synthétique	++	++	++	+	+	+	-	+
Insensible à la mousse	+	+	++	-	-	-	-	-
Indépendant du diélectrique	++	++	++	+	--	+	+	+
Indépendant de la densité	-	--	-	+	+	+	+	--
Économique	+	+	+	+	+	-	-	-
Facilité d'étalonnage	+	+	+	-	-	+	+	-
Pas de risque de bouchage ou d'encrassement	-	-	-	-	-	+	+	+
Sans maintenance	-	-	-	-	-	+	+	+
Montage économique	-	+	-	+	+	++	++	++
Pression maxi (bar)	4	4	350	500	500	3	64	1000
Température maxi (°C)	100	100	250	500	500	95	250	600

## 5.4. Capteurs de débit



Figure 5-43

### 5.4.1. Généralités.

#### 5.4.1.1 Débits.

Le débit est habituellement mesuré par déduction, en mesurant la vitesse moyenne à travers une section connue. Le débit mesuré par cette méthode indirecte est le débit volumique  $Q_v$  :  $Q_v = S \cdot V$

$S$  est la surface de section de la conduite en  $m^2$ .

$V$  est la vitesse moyenne du fluide en  $m/s$ .

Le débit volumique  $Q_v$  est le volume de fluide écoulé pendant l'unité de temps (en  $m^3/s$ )

Le débit massique  $Q_m$  est la masse de fluide écoulée pendant l'unité de temps (en  $kg/s$ )

En appelant  $\rho$ , la masse volumique du fluide (en  $\text{kg/m}^3$ ) :  $Q_m = \rho \cdot Q_v$

Pour l'eau douce, la masse volumique  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

Les liquides peuvent être considérés (à température constante) comme incompressibles, c'est à dire que leur volume ne dépend pas de la pression. Ce n'est pas le cas des gaz et des vapeurs pour lesquels la masse volumique est proportionnelle à la pression (gaz assimilé à un gaz parfait). On peut donc considérer que, à température constante, le débit massique d'un fluide est proportionnel à son débit volumique. Pour un gaz, il n'y a proportionnalité qu'à pression et température constante. La plupart des débitmètres indiquent le volume écoulé par unité de temps, ce sont des débitmètres volumiques. Toutefois, dans certaines applications nécessitant la connaissance de l'énergie thermique d'un combustible, il est nécessaire de connaître le débit massique. On a recours alors à des débitmètres massiques, dont la valeur mesurée est directement le débit massique. Cependant, bon nombre de débitmètres prétendent " massiques ", déduisent le débit massique à l'aide de l'équation:

$$Q_m = \rho \cdot Q_v$$

#### 5.4.1.2. Pertes de charge.

Les pertes de charge sont la diminution de la pression totale entre deux sections d'un écoulement. Elles s'expriment en mètres de colonne d'eau (MCE) et sont fonction de la section du tuyau, du débit véhiculé et de la nature du liquide.

Voir le cours d'hydraulique ...

#### 5.4.1.3 Régimes d'écoulement dans une canalisation.

Écoulement laminaire : les lignes de courant demeurent parallèles entre elles, les couches de fluide glissent les unes sur les autres sans se mélanger. Les pertes de charge sont alors proportionnelles à la vitesse.

Écoulement turbulent : les lignes de courant ne gardent plus leur individualité, mais s'enchevêtrent. Les pertes de charge sont proportionnelles au carré de la vitesse.

#### 5.4.1.4 Nombre de REYNOLDS $\Re$ .

Pour faciliter la comparaison entre deux écoulements, on utilise des nombres sans dimension. Ainsi, dans un écoulement incompressible (pression = constante) et isotherme (température = constante), un seul paramètre sans dimension est suffisant pour caractériser l'écoulement, c'est le nombre de REYNOLDS.

$$\Re = \frac{V \times D}{\nu} = \rho \frac{V \times D}{\mu}$$

$V$  : vitesse moyenne de débit en m/s.

$D$  : diamètre de la canalisation en mètre.

- $\nu$ : viscosité cinématique du fluide en  $\text{m}^2/\text{s}$ , (eau douce  $\nu = 1,1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )

$\mu$ : viscosité dynamique du fluide en poise (1 centipoise = 1 millipascal.seconde)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

La viscosité cinématique du fluide est:

Dans une conduite de section circulaire :

si  $\Re < 2000$ , l'écoulement est laminaire.

si  $\mathcal{R} > 2000$ , l'écoulement est turbulent.

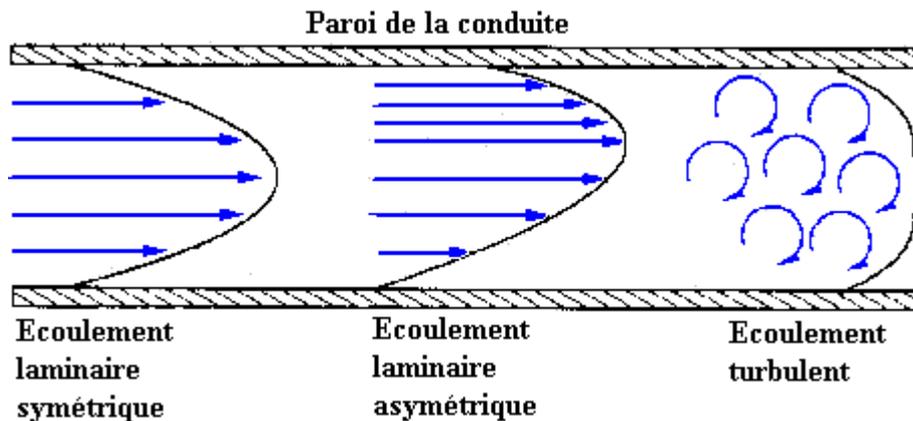


Figure 5-44

#### 5.4.1.5 Coups de bélier.

Ce sont des surpressions et dépressions qui se propagent dans une conduite quand on a modifié le débit  $Q_v$ , dans une section  $S$ . On peut les étudier en Hydraulique, à l'aide des équations d'ALLIEVI, mais il existe une méthode graphique due à SCHNYDER et L.BERGERON qui permet de traiter et de résoudre les problèmes d'une manière beaucoup plus pratique.

#### 5.4.1.6 Facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans les conduites.

Les principaux facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans une conduite sont les suivants :

Vitesse du fluide

Frottement du fluide en contact avec la conduite

Viscosité du fluide

Masse volumique du fluide

Vitesse du fluide : elle dépend de la charge qui force le fluide à traverser la conduite. Plus la charge est élevée, plus le débit de fluide est important (les autres facteurs restants constants) et, par conséquent, plus le volume d'écoulement est important.

Le diamètre de la conduite influe également sur le débit. Si l'on double le diamètre de la conduite, le débit potentiel augmentera selon un coefficient quatre.

Frottement de la conduite : il réduit le débit du fluide dans les tuyaux et la vitesse du fluide est plus lente près des parois de la conduite qu'au centre. Il est donc considéré comme un facteur négatif. Plus la conduite est lisse, propre et de grand diamètre, et moins le frottement de la conduite a d'effet sur le débit général du fluide.

Viscosité dynamique du fluide : elle réduit, tout comme le frottement, le débit du fluide près des parois de la conduite. Elle augmente ou diminue en fonction des variations de température.

Masse volumique du fluide : elle influe également sur le débit, car un fluide plus dense exige une charge supérieure pour maintenir le débit souhaité.

Le fait que les gaz soient compressibles exige souvent l'utilisation de méthodes différentes pour mesurer des débits de liquides, de gaz ou de liquides contenant des gaz.

## 5.4.2. Mesure de débit.

### 5.4.2.1. Mesure des débits volumiques des fluides.

#### 5.4.2.1.1. Débitmètre électromagnétique.

Il utilise la loi de Faraday : Quand un conducteur rectiligne se déplace dans un champ magnétique, une force électromotrice est induite dans ce conducteur.

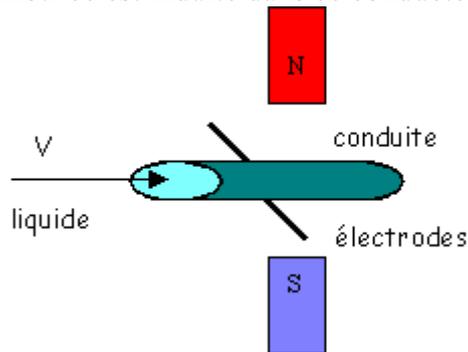


Figure 5-45

Un champ magnétique est créé par deux enroulements inducteurs placés de part et d'autre d'un même diamètre de la canalisation. Le conducteur est le fluide lui-même, il circule dans une canalisation isolée électriquement à l'intérieur. La force électromotrice est mesurée par deux électrodes au contact avec le liquide et placées aux deux extrémités d'un diamètre perpendiculaire aux lignes d'induction. La force électromotrice mesurée est proportionnelle à la vitesse moyenne du liquide, donc au débit volumique du liquide. Le signal de sortie a une amplitude de quelques millivolts et indique également le sens de l'écoulement.

domaine d'utilisation : liquide visqueux, pâteux, chargés d'impuretés, abrasifs ou très corrosifs à condition qu'ils soient conducteurs de l'électricité (ce qui n'est pas le cas des hydrocarbures).

diamètre de canalisations : 3 mm à 3 m.

bonne précision de l'ordre de 1 % (limitée pour les faibles vitesses d'écoulement)

mesure ne dépendant pas des caractéristiques physiques du liquide (viscosité, densité, granulométrie) et possible à haute température (450 °C) et haute pression (1000 bar).

#### 5.4.2.1.2. Débitmètre à ultrasons.

Un émetteur et un récepteur sont montés en opposition de manière à ce que les ondes acoustiques allant de l'un à l'autre soient à 45 ° par rapport au sens d'écoulement dans la conduite. La vitesse du son allant de l'émetteur au récepteur constitue la vitesse intrinsèque du son, plus un apport dû à la vitesse du fluide. La mesure du temps  $t$  mis par le signal pour parcourir la distance  $L$  permet de connaître la vitesse du fluide et d'en déduire le débit.

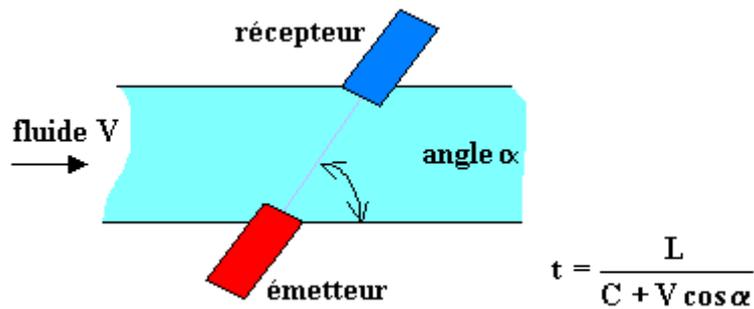


Figure 5-46

C : vitesse de propagation du son dans le fluide.

V : vitesse du fluide.

L : distance entre émetteur et récepteur.

Il est primordial que le fluide ne véhicule pas de gaz ou de solides, pour éviter la dispersion des ondes acoustiques entre les deux transducteurs. L'ensemble du dispositif, à l'extérieur de la conduite, est insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge.

domaine d'utilisation : fréquemment utilisé pour les écoulements turbulents, pour les fluides non conducteurs (notamment hydrocarbures), là où les débitmètres électromagnétiques ne conviennent pas.

diamètre de canalisations : généralement important ( 6000 mm)

précision : peut atteindre 0,5 %

temps de réponse très rapide, jusqu'à 1 ms.

### 5.4.2.1.3 Débitmètre à effet Doppler

Il utilise lui aussi deux éléments transducteurs, mais montés tous deux dans un même boîtier, d'un des deux cotés de la conduite. Une onde ultrasonore de fréquence constante est émise dans le fluide par l'élément émetteur, les solides ou bulles présents dans les fluides réfléchissent le son, le renvoyant à l'élément récepteur avec un glissement de fréquence. La variation de fréquence est proportionnelle à la vitesse moyenne du fluide.

domaine d'utilisation : exige la présence de gaz ou de solides en suspension dans l'écoulement pour fonctionner correctement.

diamètre de canalisations : généralement important

précision modeste : 2 à 5 % de l'étendue de mesure.

### 5.4.2.1.4 Débitmètre à turbine.

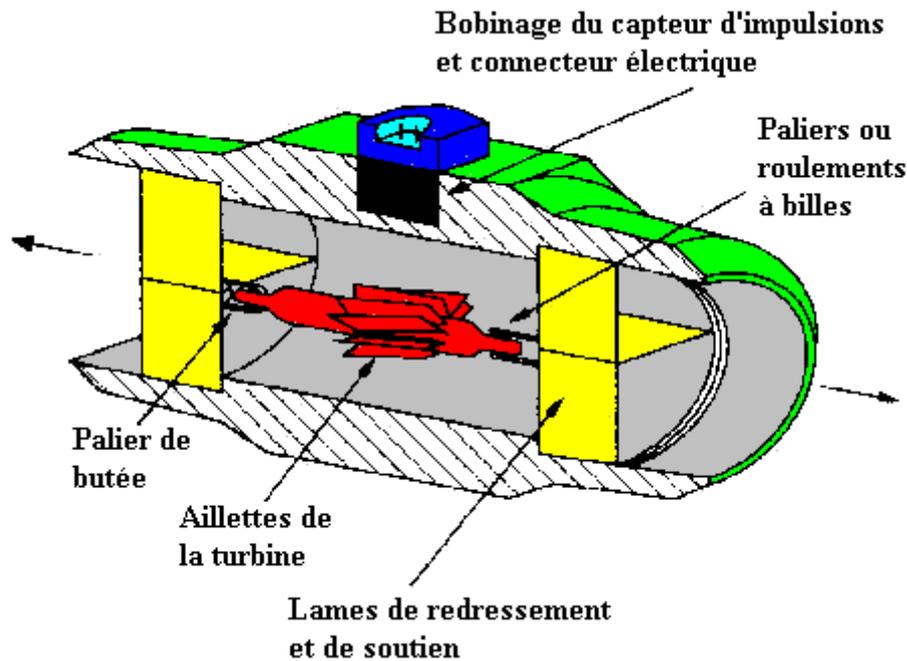


Figure 5-47

L'écoulement du fluide entraîne la rotation d'une turbine (rotor à plusieurs ailettes, reposant sur des paliers) placée dans la chambre de mesure, la vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à celle du fluide, donc au débit volumique total.

La vitesse de rotation est mesurée en comptant la fréquence de passage des ailettes détectée à l'aide d'un bobinage (un aimant permanent est parfois solidaire de l'hélice).

Chaque impulsion représente un volume de liquide distinct.

domaine d'utilisation : compatible avec de nombreux liquides (rotor en acier inoxydable).

Toutefois la propreté du liquide est essentielle, afin de ne pas encombrer les paliers de butée du rotor qui peut tourner à haute vitesse. De par leur principe ils sont réservés aux fluides peu visqueux, exempt de bulles ou de matières granuleuses. Ils sont destinés aux applications industrielles générales (eau, alcools, carburants, acides, gaz liquéfiés, liquides cryogéniques...)

diamètre de canalisations : 10 mm à 30 cm environ

précision : 0,2 à 2 % de l'étendue de mesure, selon les appareils.

temps de réponse : plusieurs millisecondes.

#### **5.4.2.1.5. Par débitmètre à effet Vortex**

Le principe est basé sur le phénomène de génération de tourbillons, appelé effet Karman.

Lorsque le fluide rencontre un corps non profilé, il se divise et engendre des tourbillons, de part et d'autre et en aval du corps non profilé. Le nombre de tourbillons formés en aval par unité de temps est proportionnel au débit moyen. Une vitesse précise d'écoulement du fluide est déterminée par le comptage des tourbillons. Cette vitesse est mesurée à l'aide d'un capteur sensible aux variations oscillatoires de pression.