100% COURS
MCours.com
Cours et mémoires gratuits
mcourscom@gmail.com

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 fermé :
1.5.1 Boucle ouverte :
1.5.2 Boucle fermé :
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. 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
5.3.3.1. 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 conductimètriques
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
5.3.3.3. Ondes acoustiques
5.3.3.3.1. 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 constituants 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, a 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 28 : INSTALLATION, DÉPANNAGE : INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE

Code : **Durée : 90 h**

OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence le stagiaire 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.

(à suivre)

OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT(suite)

PRÉCISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU	CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Prendre connaissance des directives, des plans et des manuels techniques.	- Interprétation exacte des symboles et des conventions du plan. - Repérage de l'information pertinente dans les manuels techniques. - Exactitude de la terminologie.
B. Installer une boucle de régulation.	- Installation conforme à la méthode et au plan.
C. Analyser l'état réel de l'équipement.	- 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.
D. Poser un diagnostic.	- Justesse du diagnostic. - Indication valable du phénomène destructeur. - Choix judicieux des correctifs à apporter.
E. Remplacer les composants défectueux.	- Choix approprié du composant de remplacement. - Démontage et montage précis. - Mise en place correcte et solidité des composants de remplacement.
F. Régler les paramètres de fonctionnement.	- Réglage fonctionnel des paramètres.
G. Vérifier le fonctionnement de l'équipement.	- 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.
H. Consigner les interventions.	- Concision et pertinence de l'information présentée.

OBJECTIFS OPÉRATIONNELS DE SECOND NIVEAU

LE STAGIAIRE 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

LE STAGIAIRE 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 définit comme une série d'opération apportant des modifications physique ou chimique à un produit. La fabrication du papier, du ciment, du verre, le traitement des eaux, sont des exemples des procédés industriels .
La régulation automatique est la technique des méthodes et les 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 determiné. 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 subvenir.

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 :

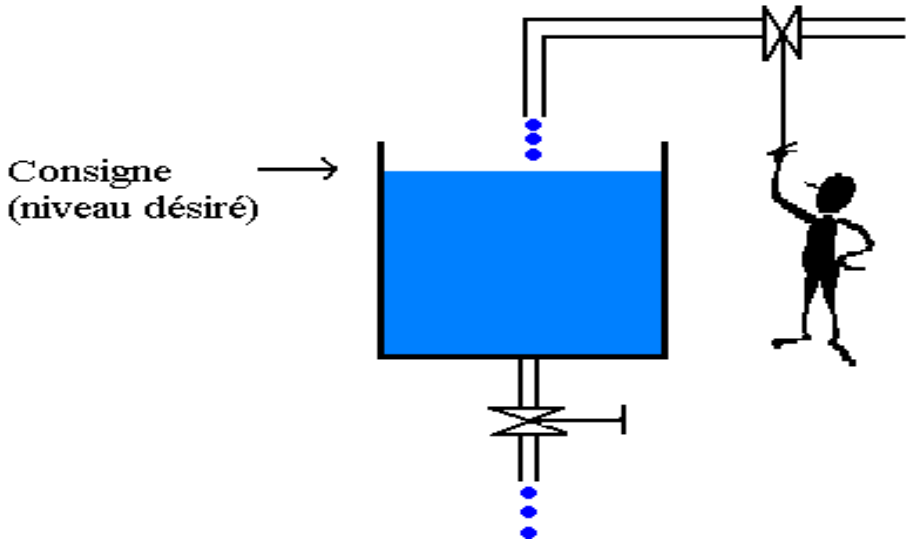


Figure 1-1. Régulation du niveau par un être humain

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.

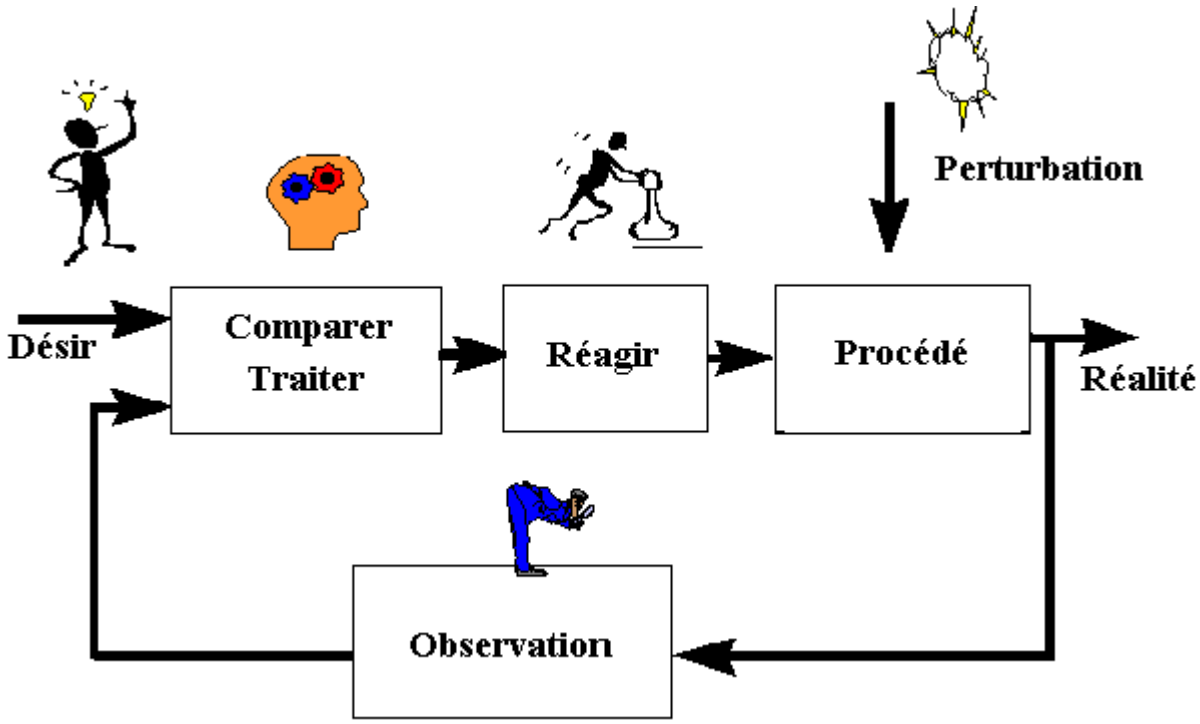
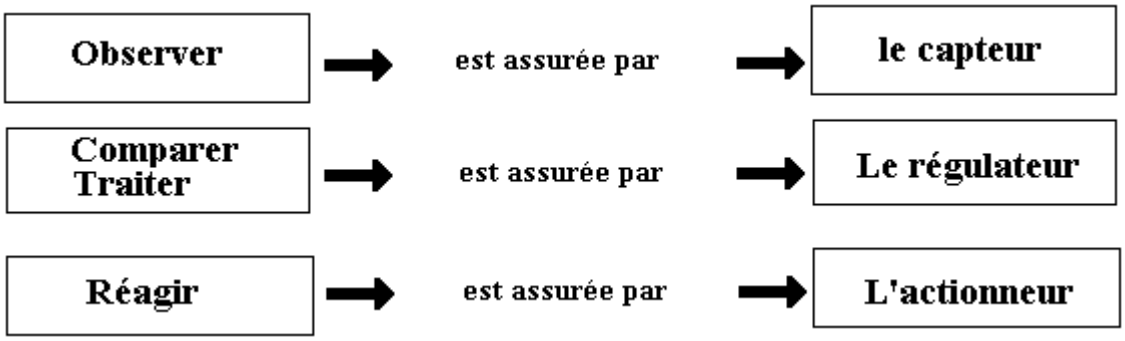


Figure 1-2. Boucle de la régulation

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



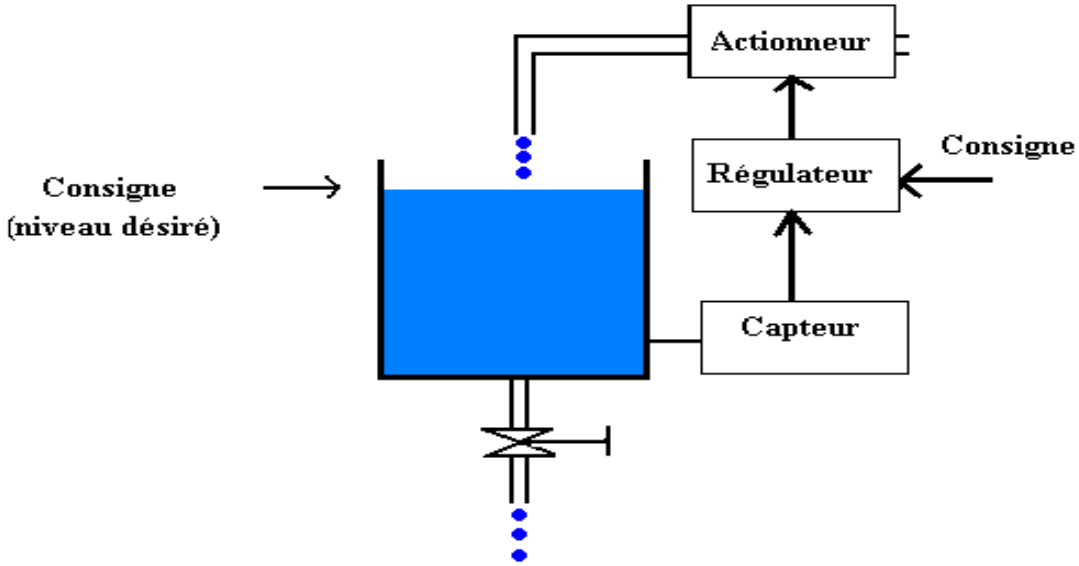


Figure 1-3. Régulation du niveau par des appareils

Le schéma de la régulation devient alors :

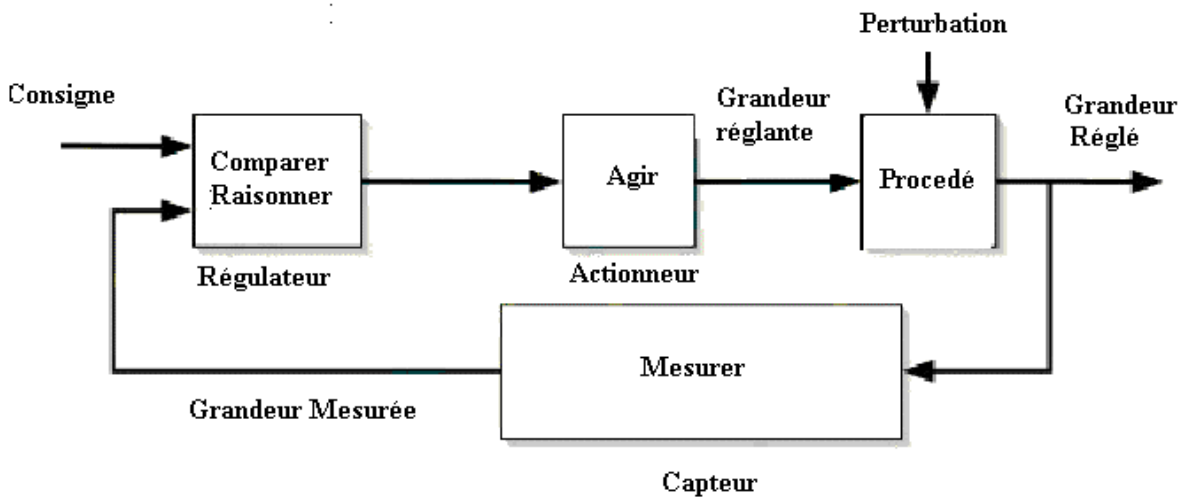


Figure 1-4. Schémas de principe de la régulation

1.4.1 Le procédé

Cette portion du schéma de principe représente l'environnement où l'éqipement 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.

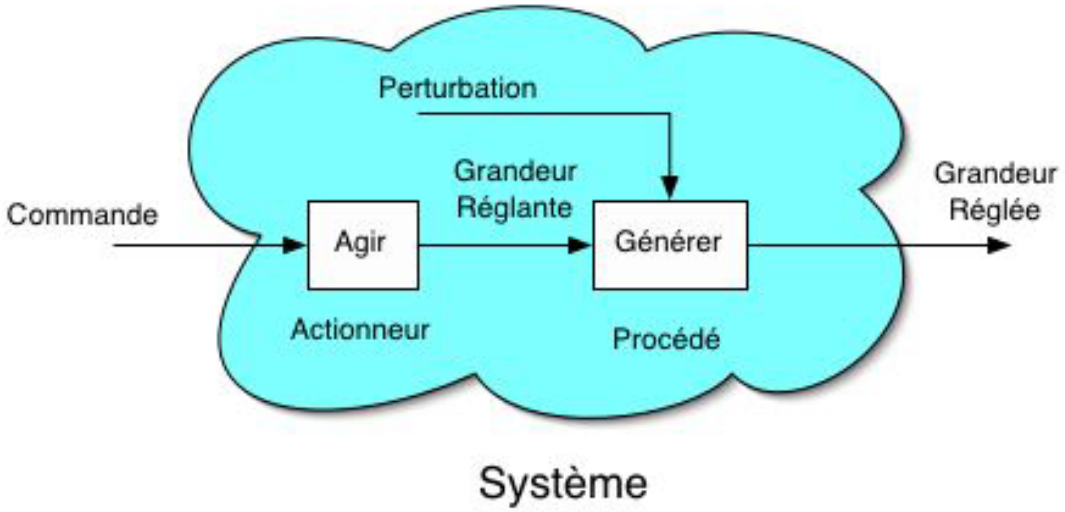


Figure 1-5

1.5.2 Boucle fermé

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

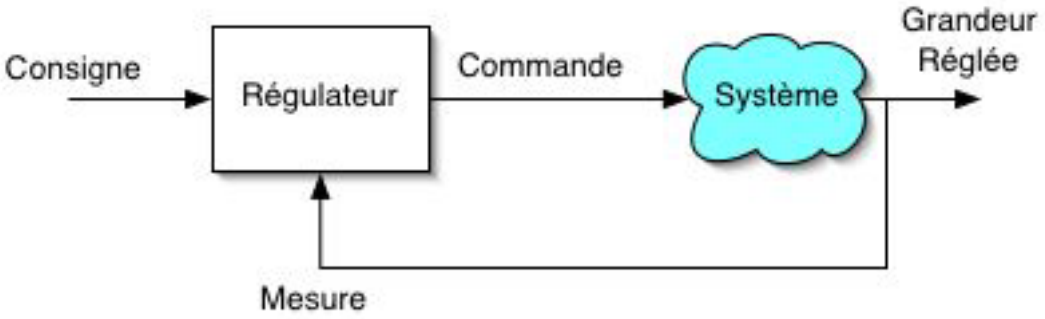


Figure 1-6

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

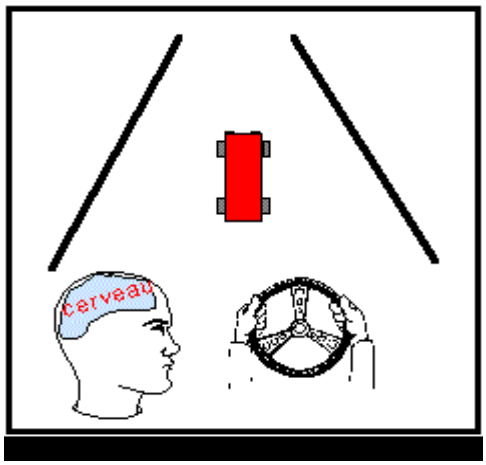


Figure 1-7

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

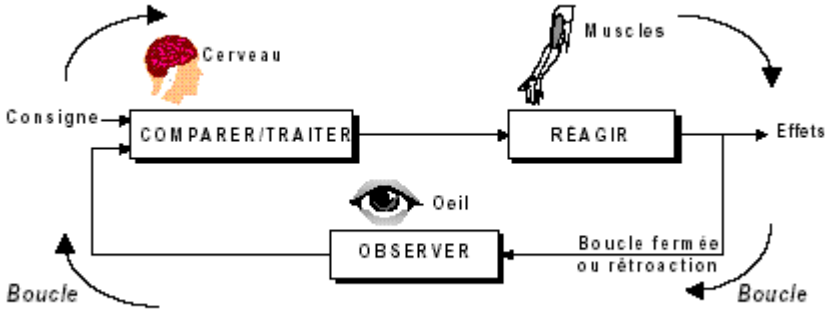


Figure 1-8

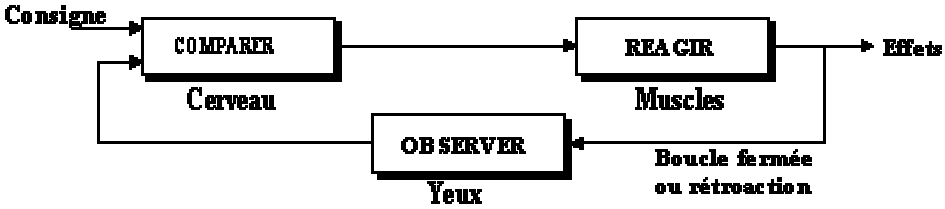


Figure 1-9

1.6.2 Régulation de la température d'un four

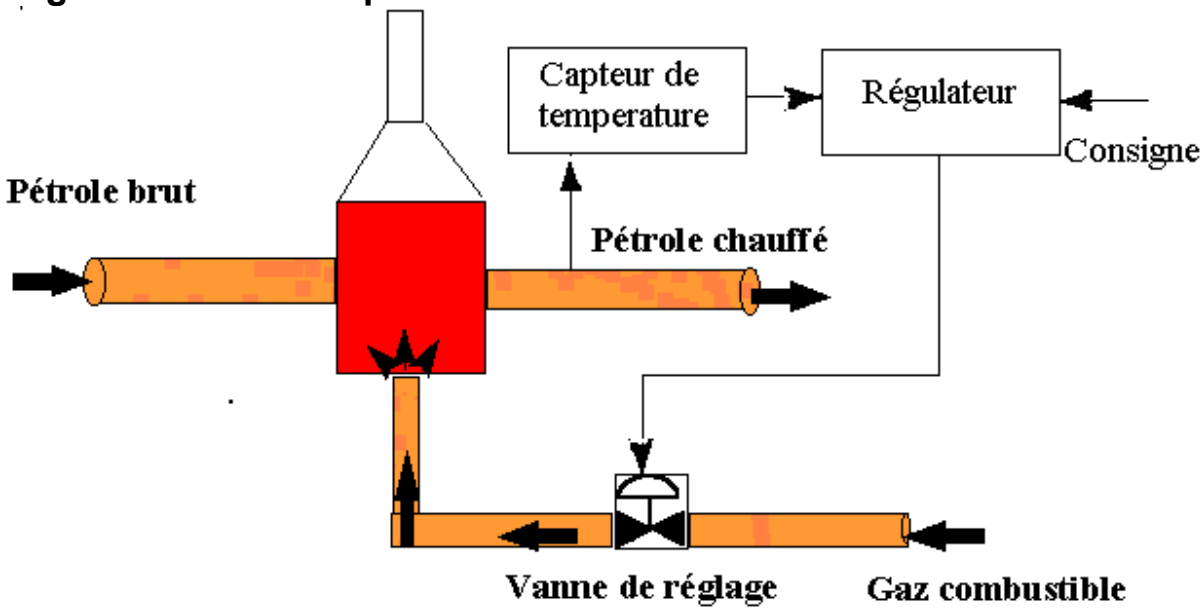


Figure 1-10

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 consigne 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, *Process*)
	Régulateur	Dispositif qui régule automatiquement l'élément final de commande pour maintenir la variable commandée à la valeur du point de consigne. (Contrôleur, *Controller*)
	Élément final de commande	Dispositif qui contrôle la variable manipulée du procédé. (Actuateur, *Final control element*)
	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. (*Measuring means*)
Les signaux	Variable commandée	La variable du procédé qui doit être asservie au point de consigne, indépendemment des perturbations que doit subir ce procédé. (Variable régulée, *Controlled variable*, *Process variable,* PV)
	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, *Manipulated variable*)
	Mesure de la variable commandée	Valeur mesurée de la variable commandée: 4-20mA, 0-100%, ... (Feedback, *Measured value of controlled variable*, *Measured value of process variable*, PVf)
	Point de consigne	Valeur à laquelle la variable commandée est maintenue par le contrôleur. (Valeur de consigne, Référence, *Set point*, SP)
	Signal de commande	Signal de sortie du contrôleur appliqué à l'élément final de commande. (Signal de correction, *Controller output, Process demand*, DM)
	Perturbations	Toutes variables indépendantes, indésirables et souvent imprévisibles qui tendent à modifier la valeur de la variable commandée. (Grandeurs perturbatrices, Disturbances)
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. (*Process load*)

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.

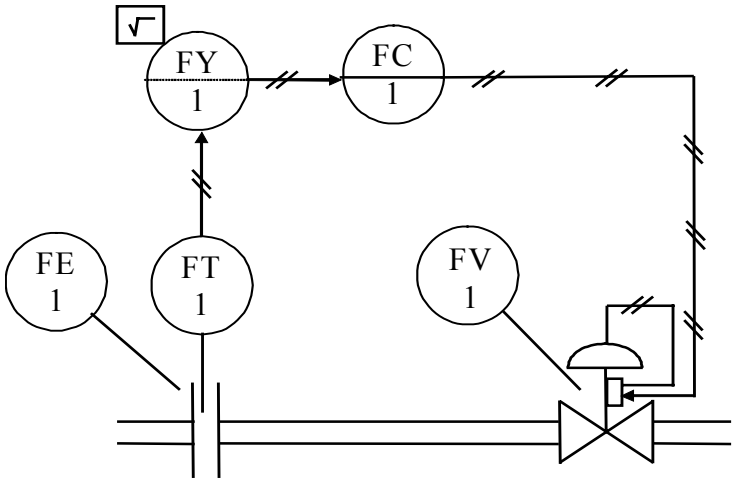


Figure 2-1. Exemple d'utilisation de la norme ISA pour un régulateur de débit

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'ETIQUETTE

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 valve, qui contrôle le débit de vapeur dans un échangeur de chaleur, est codifée comme étant une valve 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).

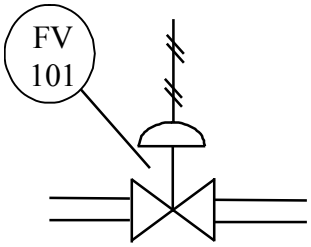


Figure 2-2 Valve de débit à commande pneumatique

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.

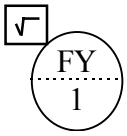


Figure 2-3 Appareil extracteur de racine carrée pour une boucle de débit

Tableau 2-1 Principales abréviations de calcul et de conversion

Abréviation	Fonction
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 identifer 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.

Lettres les plus utilisées dans la norme ISA			
	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

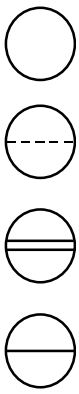


Figure 2-4 Représentation des appareils selon leur emplacement

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.

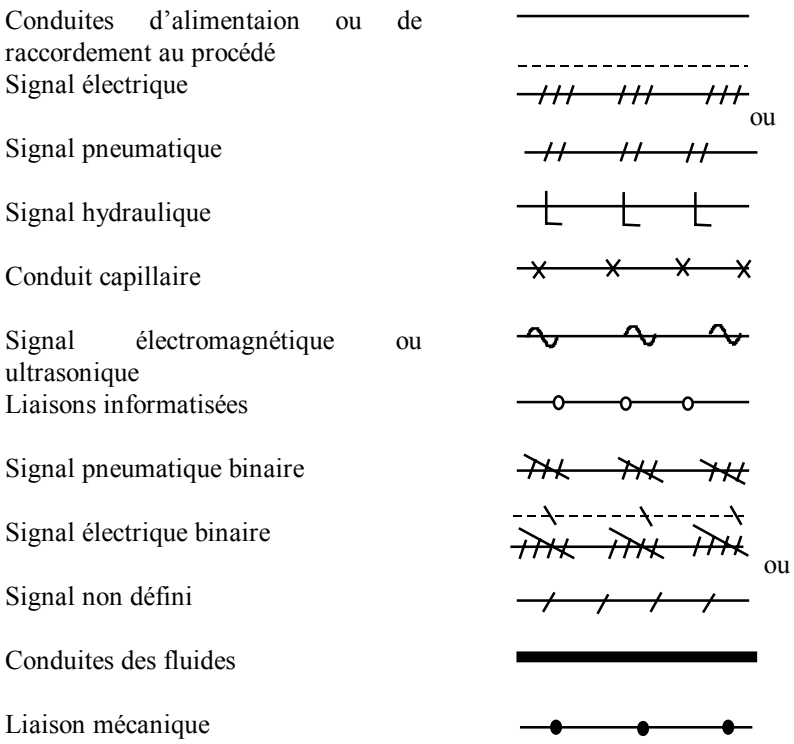


Figure 2-5 Lignes de liaison

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

Tableau 2-2 Les alimentations

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.

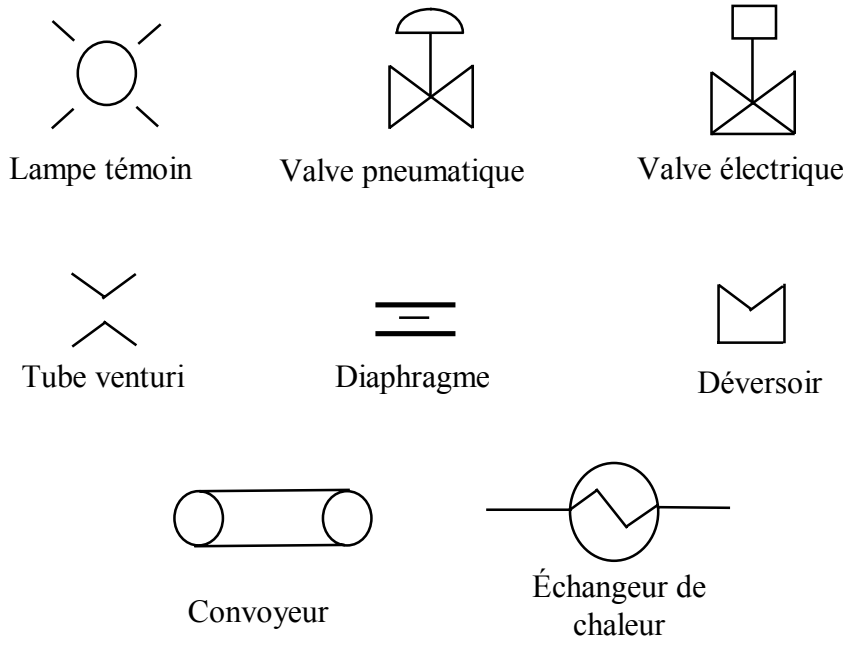


Figure 2-6 Exemples de symboles graphiques

2.6 EXEMPLES DE PROCEDE

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.

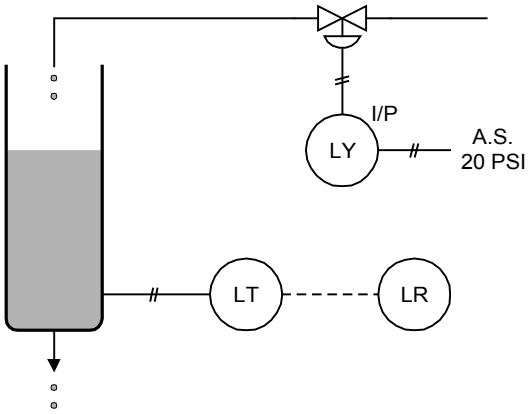


Figure 2-7 Schéma de principe d'un procédé de niveau

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.

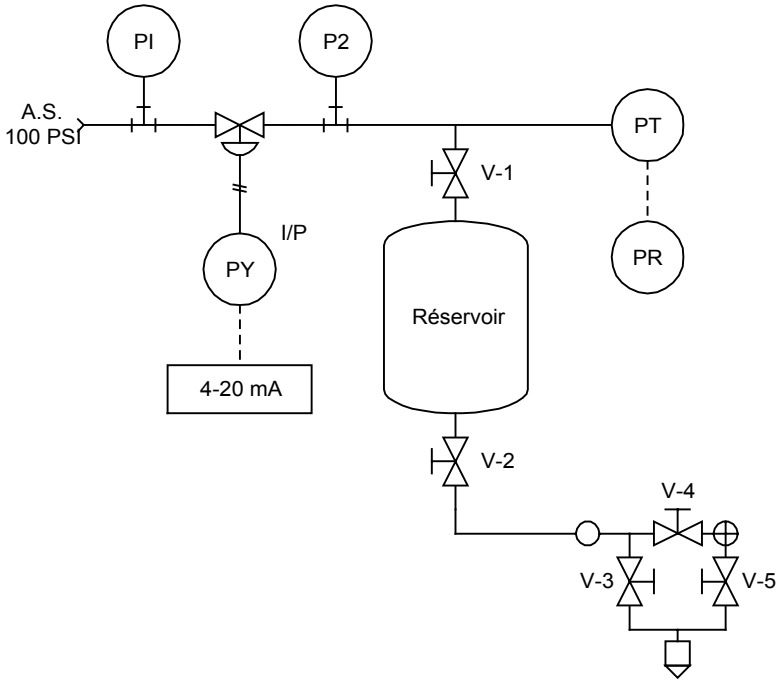


Figure 2-8 Schéma de principe d'un procédé de pression

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.

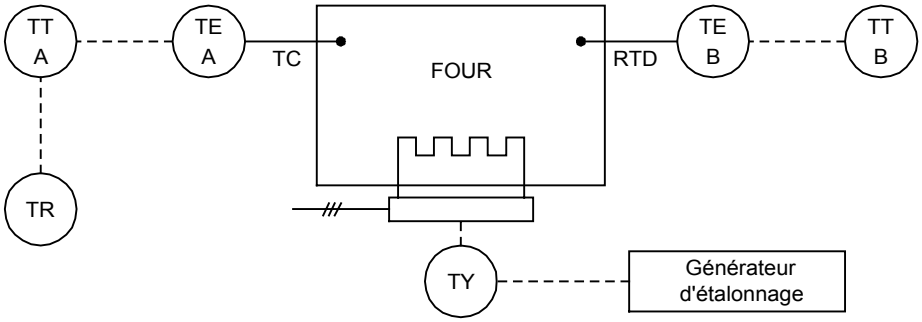


Figure 2-92 Schéma de principe d'un procédé de température

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.

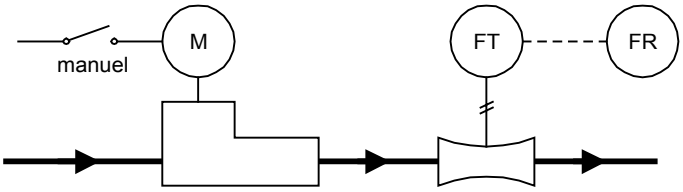


Figure 2-30 Schéma de principe d'un procédé de débit

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.

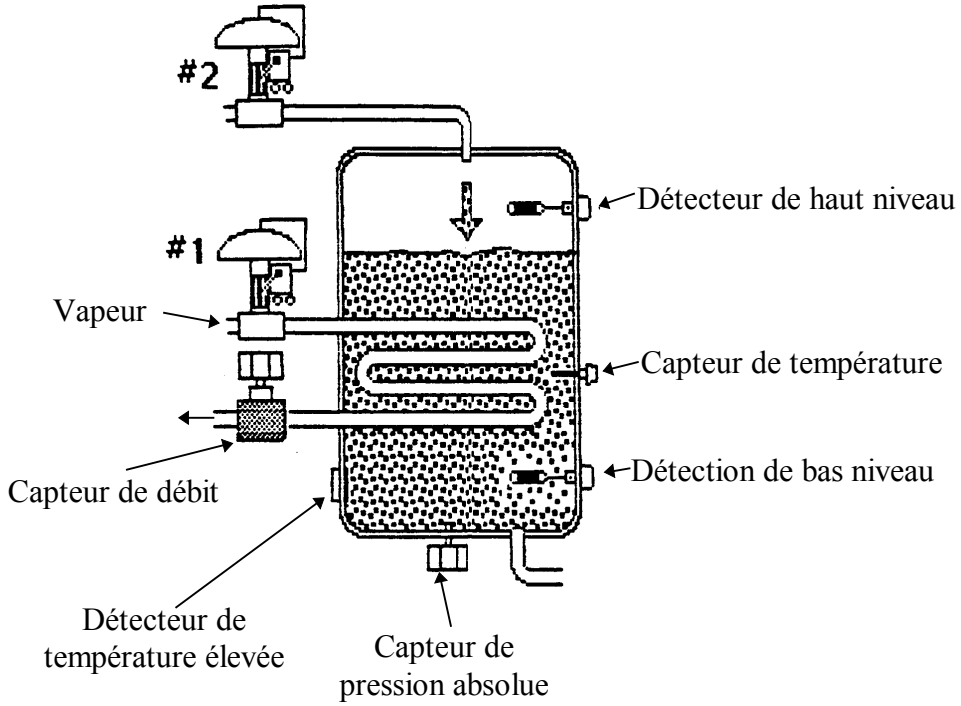


Figure 2-41 Procédé de régulation de température

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 serpentin. 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.

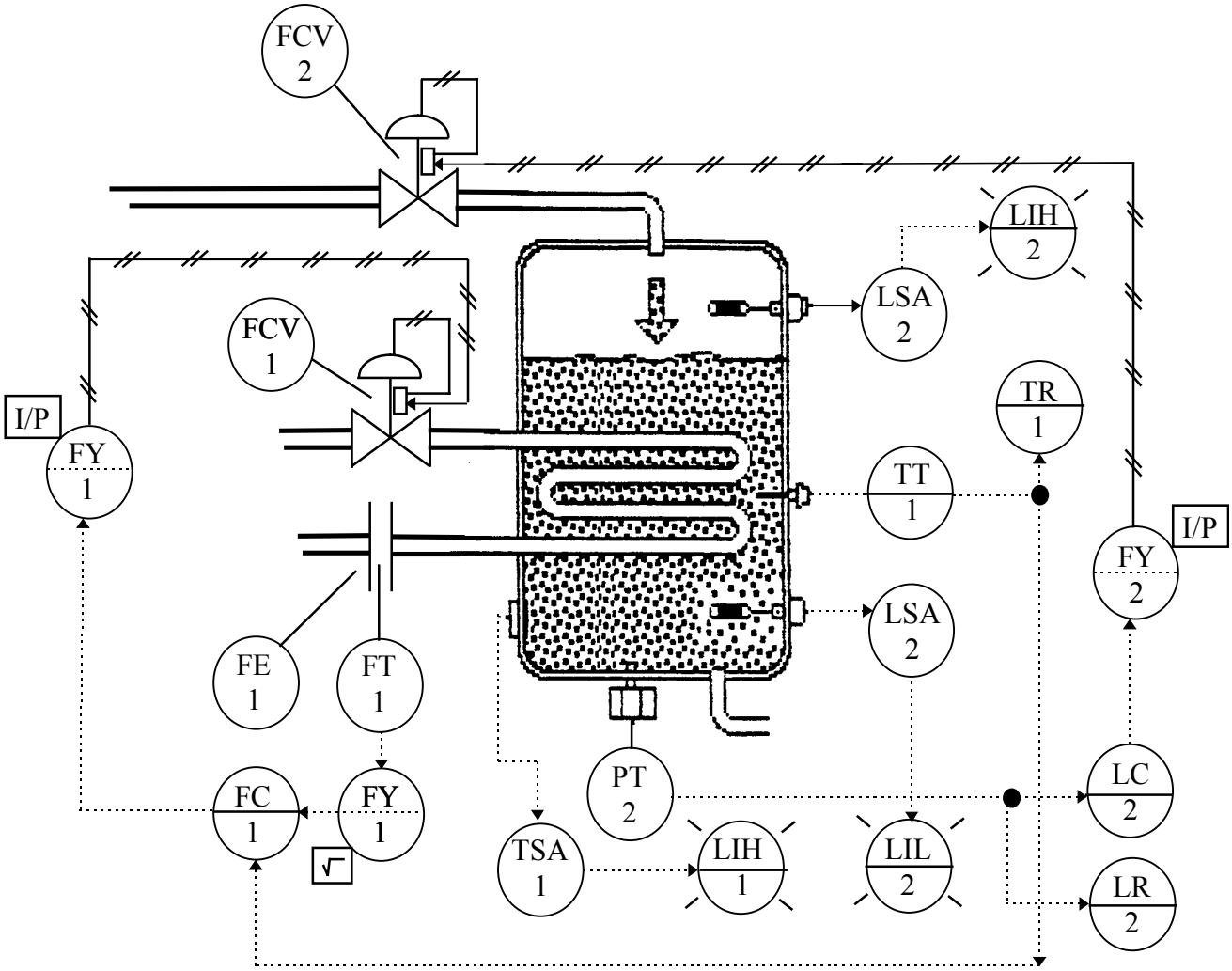


Figure 2-52 Représentation complète du procédé suivant la norme ISA

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

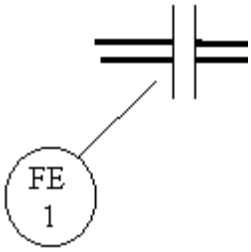


Figure 2-63 Restriction

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
- □P est la différence de pression sur la plaque orifice
- K est la constante de proportionnalité

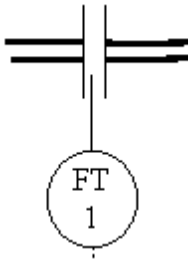


Figure 2-74 Capteur de pression différentielle

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

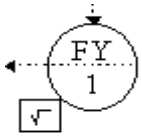


Figure 2-85 Fonction mathématique

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 »

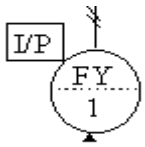


Figure 2-96 Convertisseur courant / pression

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

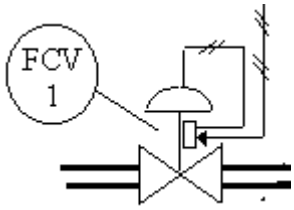


Figure 2-17 Vanne pneumatique

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

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

Figure 2-1810Détecteur de température

Ce symbole représente un détecteur de température excessive.

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

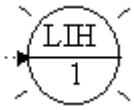


Figure 2-19 Indicateur lumineux

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 »

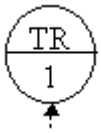


Figure 2-110 Enregistreur

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

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

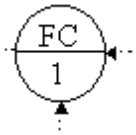


Figure 2-121Régulateur

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

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

3 La mesure et les capteurs industriels

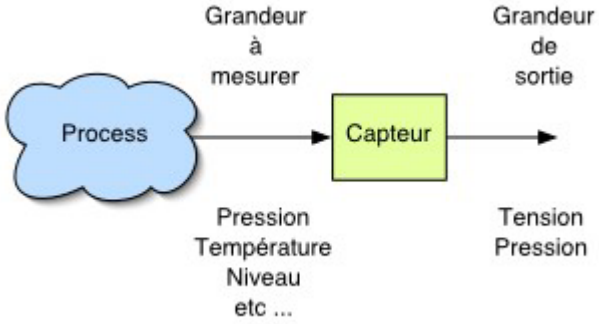
Le progrès des technologies utilisées pour la fabrication des capteurs industriels aura permis d'améliorer l'efficacité de la chaîne de mesure. En effet, la multitude de capteurs disponibles permet d'exploiter le système de mesure adéquatement pour toutes les grandeurs physiques que l'on mesure dans 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 .1.1Définition

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 T1 et T2, est le siège d'une force électromotrice e(T1,T2).
- **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 CHAINE 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.

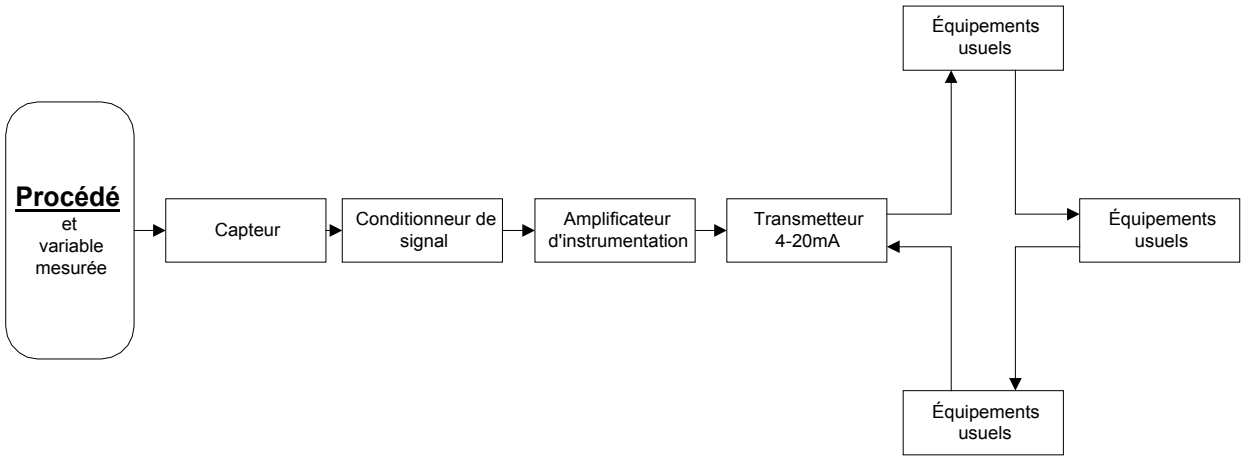


Figure 3-1 Schéma de principe d'une chaîne de mesure analogique

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* :

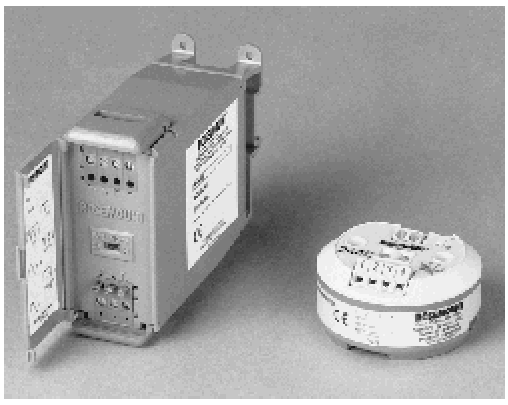


Figure 3-2 Transmetteurs

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.

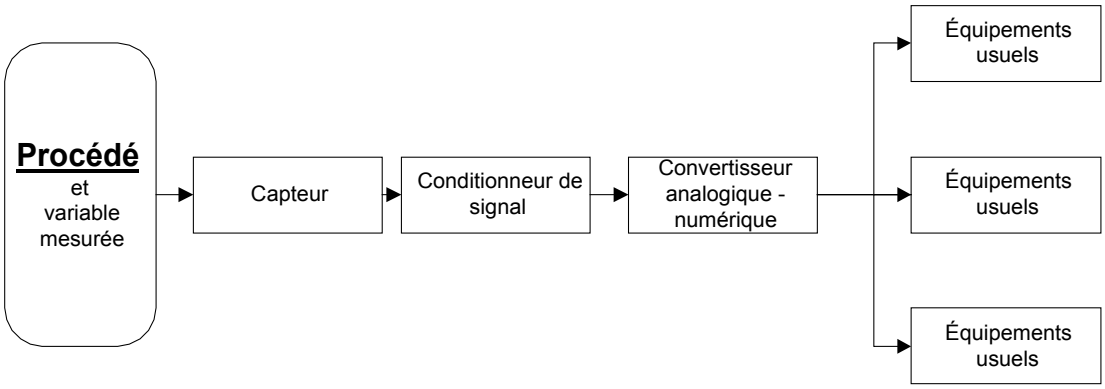


Figure 3-3 Schéma de principe d'une chaîne de mesure numérique

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 micro-contrôleur. 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 :

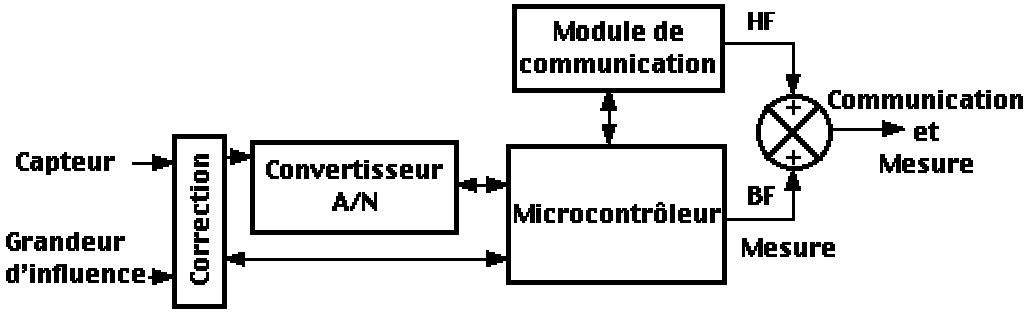


Figure 3-5 Structure d'un transmetteur intelligent

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 ± 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: 350Ω ± 3.5Ω output: 350Ω ± 5Ω
Résistance d'isolation (« Insulation resistance »)	bridge to ground: 2000MΩ shield to ground: 1000MΩ
Alimentation recommandée (« Excitation recommanded »)	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 mesuré 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**.

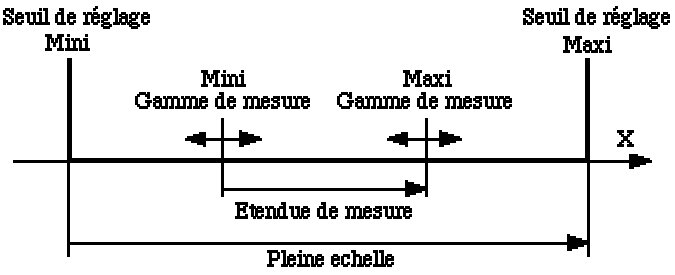


Figure 3-6 Axe de grandeur X

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 100Ω, et que l'on spécifie une incertitude de 0,2Ω, on notera l'erreur absolue à ± 0,2Ω.
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 $\frac{0{,}2\Omega}{100\Omega} x100 = 0{,}2\%$.
L'erreur systématique pour une valeur donnée, exprime l'écart entre la valeur mesurée et la valeur recherchée, soit la valeur nominale, en pourcentatge par rapport à l'étendue de mesure.
Par exemple, pour une chaîne de mesure dont l'étendue de mesure est de 200°C, on mesure, dans des conditions données, une température de +50,2°C comparée à une valeur nominale ou de référence de +50,0°C. L'erreur systématique (souvent appelée l'erreur de précision d'échelle) est donc de $\frac{0{,}2}{200} x100 = 0{,}1\%$.

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 : 10mV/°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 volts / 255 paliers = 39,2mV/palier

5000 tpm / 255 paliers = 19,6 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

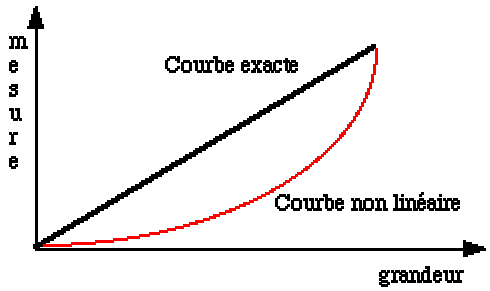
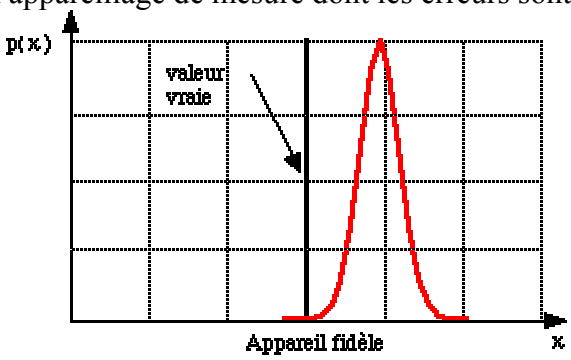


Figure 3-7 Linéarité

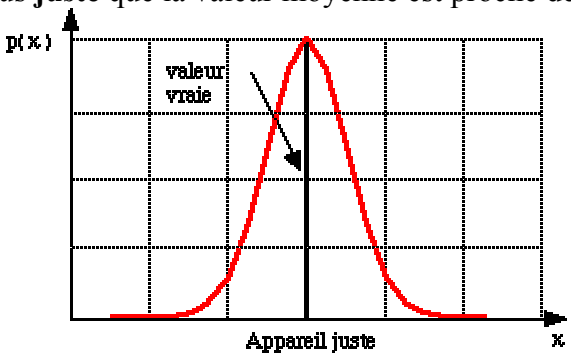
L'erreur de linéarité spécifie le plus grand écart entre la courbe d'étalonnage et une ligne droite appelée « meilleure droite ». L'écart de linéarité s'exprime en % de l'étendue de mesure comme l'erreur systématique.
La fonction de transfert est linéaire dans une plage déterminée si les variations du 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°C à +100°C possède un « span », étendue de mesure de 150°C. Si le fabricant spécifie un écart de 0,05% pour une mesure de 50°C, alors le capteur peut donner une erreur de 0,075°C (0,05% de 150°C) à 50°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.

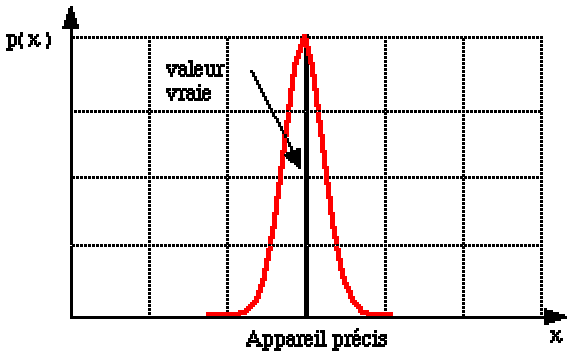


Figure 3-8 Fidèlité

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 ± 0,5% et ± 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 réversabilité due à l'hystérésis du capteur. Cette caractéristique est généralement exprimée en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure pour une valeur donnée.

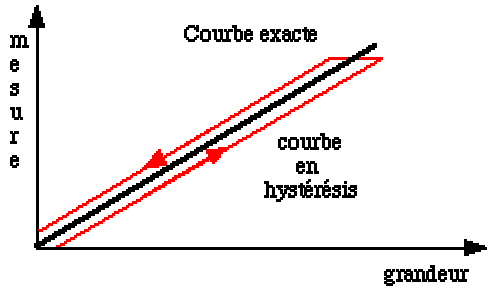


Figure 3-9 Hystérésis

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 temp 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 llustre 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*.

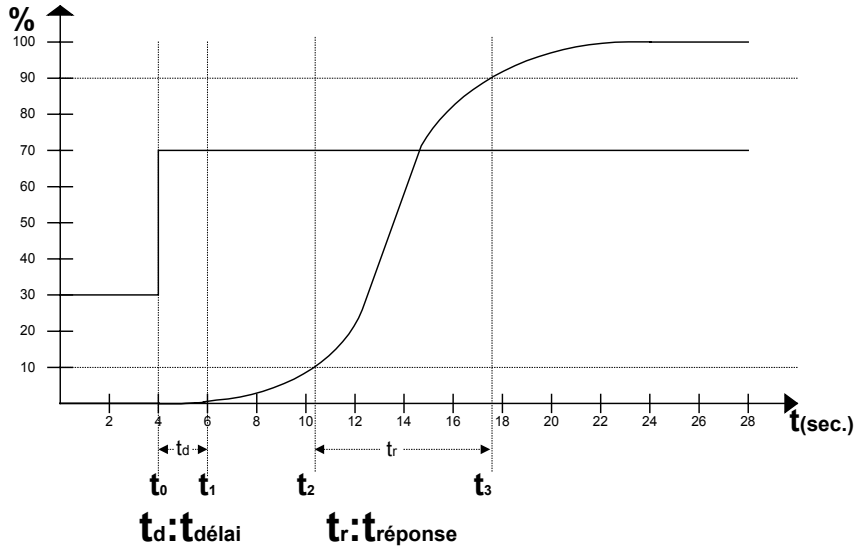


Figure3-10: Représentation de la réponse temporelle d'un capteur

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'etre 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 demandé 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 important sont :

1. la disponibilité en alimentation :
   - la distribution électrique de courant alternatif est-elle disponible ?
   - devrons-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.

100% COURS
MCours.com
Cours et mémoires gratuits
mcourscom@gmail.com

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 Celcius 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 base 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 ():

$$temp_{(Celcius)} = temp_{(Kelvin)} - 273°C.$$

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):

$$temp_{(Celcius)} = 5/9 \; x \; (temp_{(Fahrenheit)} - 32)$$

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

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/m² (1 Pa = 1 N/m²)
F : force en Newton
S : surface en m²
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^2 (lbs/po^2)ou psi
Force	Newtons (N)	livres (lbs)
Surface	mètres^2 (m^2)	pouces^2 (po^2)

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 . g . h (avec r masse volumique du fluide).

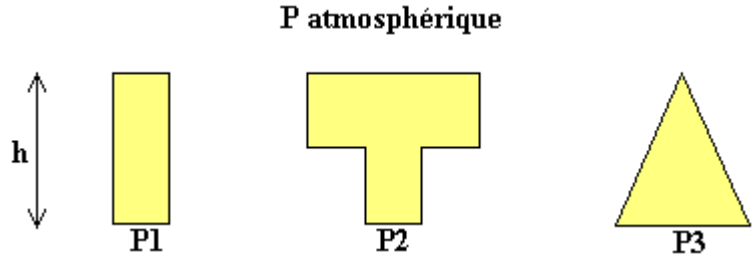


Figure 3-11 Pression hydrostatique

Pour chacun de ces récipients, la pression au fond de ceux ci est identique :
P1 = P2 = P3 = Pa + 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/m3, quelle doit être la hauteur d'une colonne d'eau qui exercera cette même pression?
hauteur = pression = 101 300 = 10,3 mètres
ρ x g 1000 x 9,81

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.

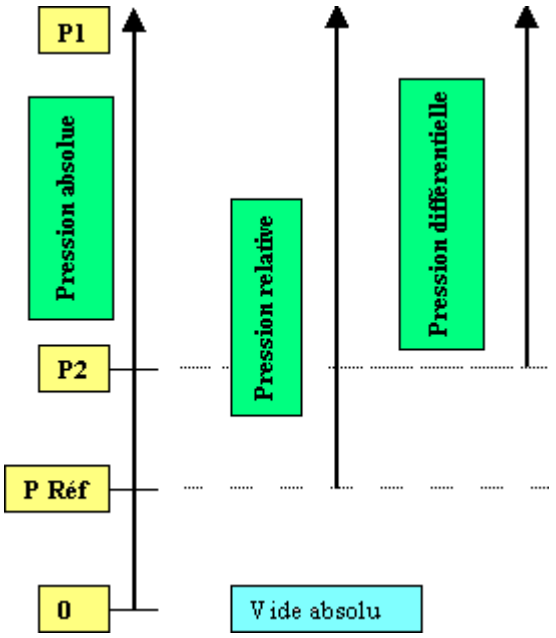


Figure 3-12 Echelle de pressions

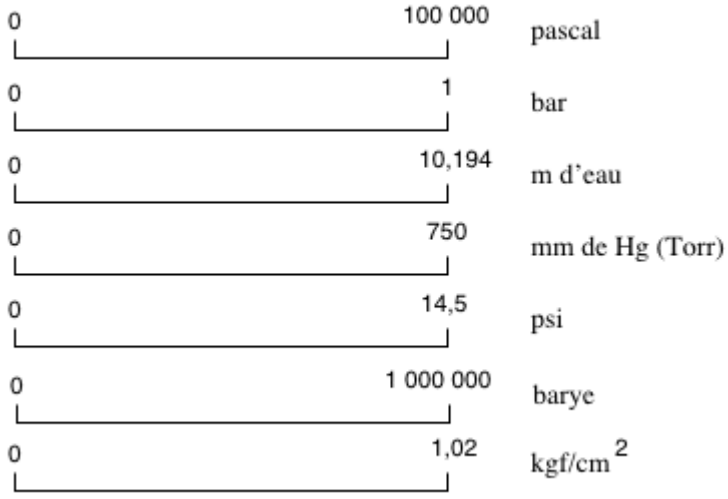
3.5.3.4 Les différentes unités de pression

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	1×10^{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.



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'.

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

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 ().

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

Équation de base pour la mesure du débit massique

$$Q_m = Q_v \, x \, \rho$$

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^3	L	ft^3	GPM(USA)	GPM(UK)
cm^3	1	1 x 10^{-3}	3,531 x 10^{-5}	2,641 x 10^{-4}	2,199 x10^{-4}
L	1000	1	0,035 3	0,264	0,220
ft^3	28 316	28, 316	1	7,480	6,228

L : litres ft^3 : pieds cubes

1mL occupe un volume de 1 cm^3
1L occupe un volume de 1000 cm^3

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

Tableau 3-5: conversion des unités de débit

	m^3/h	m^3/sec	L/sec	GPM(USA)	GPM(UK)
m^3/h	1	278 x 10^{-6}	0,2778	4,403	3,667
m^3/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^{-5}	0,0631	1	0,833
GPM(UK)	0.2728	7,58 x 10^{-5}	0,0758	1,201	1

m^3/h : mètres cubes par heure m^3/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

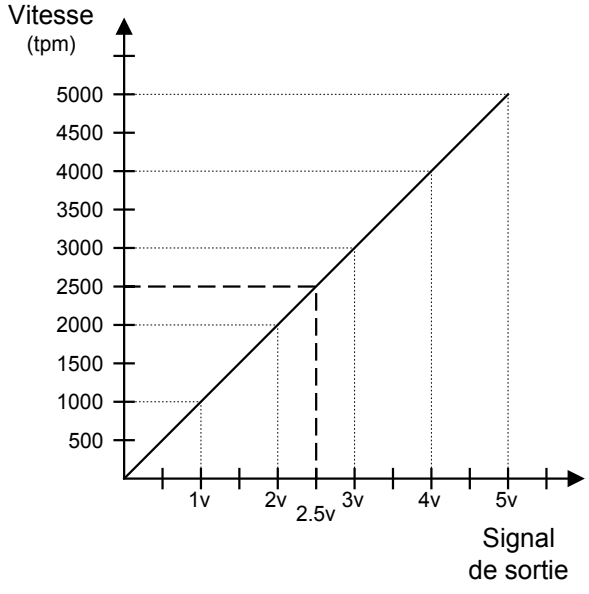
Pour signifier la présence ou l'absence d'un événement ou pour informer un opérateur d'une condition d'alarme, nous utilisons un signal numérique (TOR: tout-ou-rien). La logique des contacts permet, entre autre chose, d'indiquer:

- 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 ou 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.



Vitesse (tpm)	Signal de sortie
5000	5v
4000	4v
3000	3v
2500	2.5v
2000	2v
1000	1v

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 à15psi;
- 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 transmit 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.

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

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

- Rmax est la charge maximale;
- V_a: la tension de l'alimentation;

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

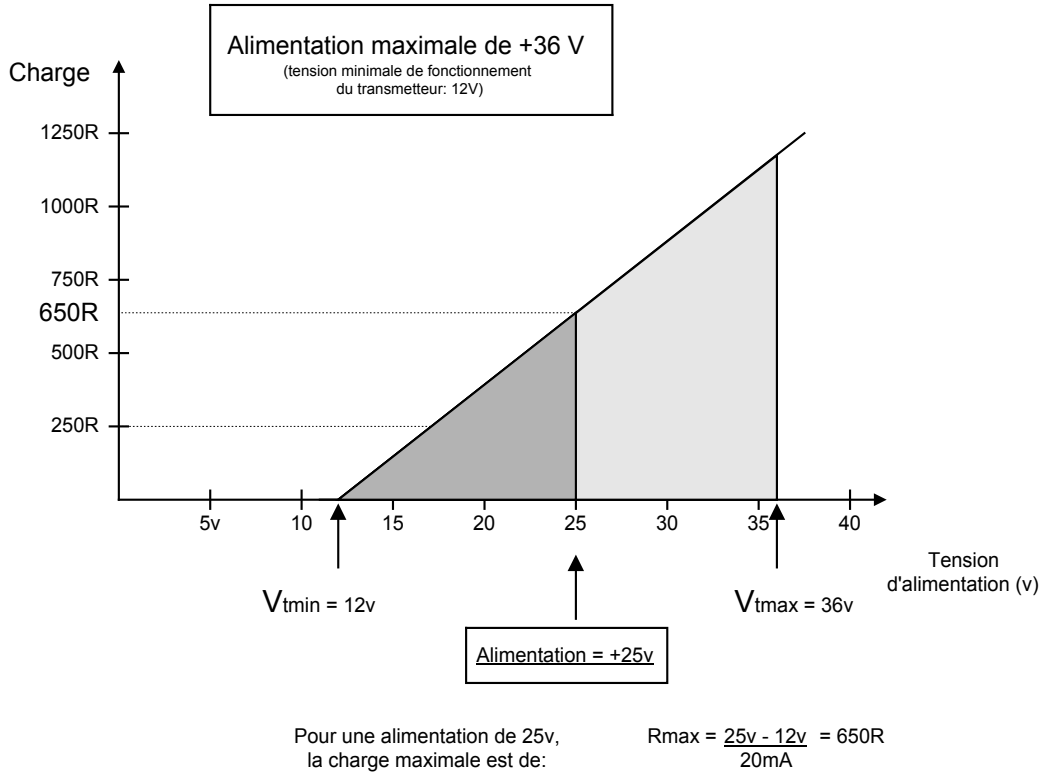


Figure 0-2 : Calcul de la charge maximale pour un transmetteur 4-20mA

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.

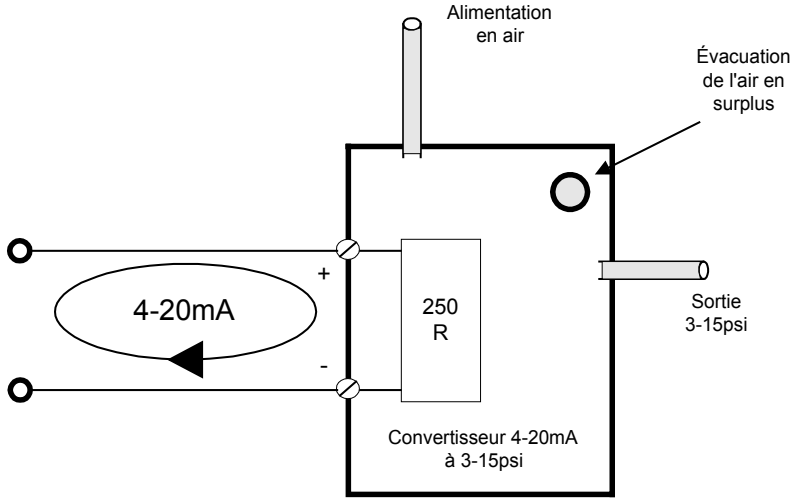


Figure 0-3 : Convertisseur 4-20mA à 3-15psi

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 manufacturier 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 transmit a 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 fourni 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.

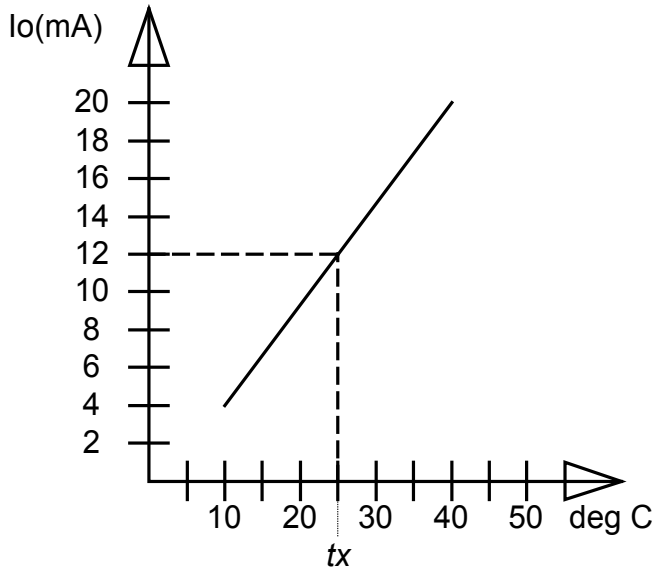


Figure 0-4: Fonction de transfert d'une chaîne de mesure de température

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:

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

Équation 0-2 : Fonction de transfert

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

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 coté, les valeurs des grandeurs physiques qui sont liées. L'unité de chaque grandeur est précisée en bord d'echelle. 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:

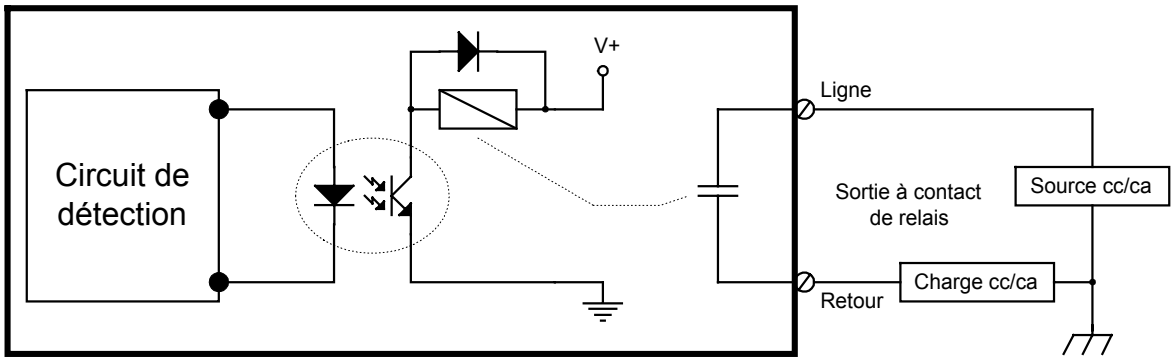
- les sorties à contact secs pour des signaux à courant continu ou alternatif;
- les sorties à transistor (NPN ou PNP) pour des signaux à courant continu seulement;
- les sorties à triac pour des signaux à courant alternatif seulement.

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.

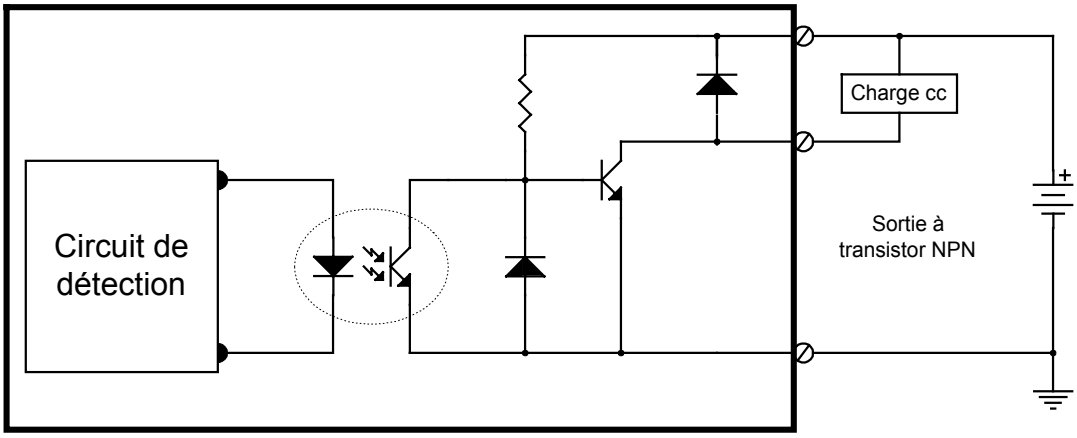
Dans le cas d'une charge c.a., deux protections sont nécessaires. Un filtre (Rs et Cs) empêche l'amorçage intempestif du thyristor ou du triac dû à l'effet de self d'une charge inductive. Les valeurs recommandées par la plupart des fabricants sont: Rs de 120Ω et Cs de 0.1μf. En plus, il est

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 ».



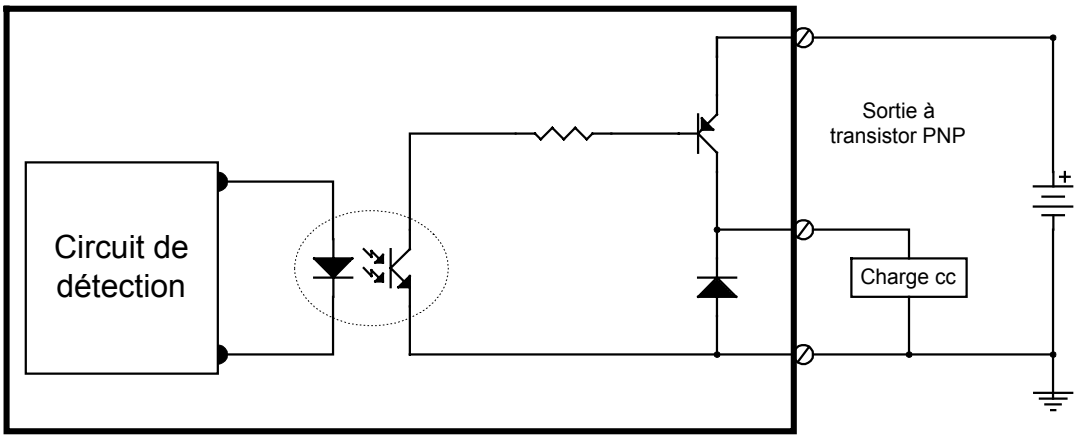
Module de sortie à contact sec pour charge cc ou ca

Figure 0-5



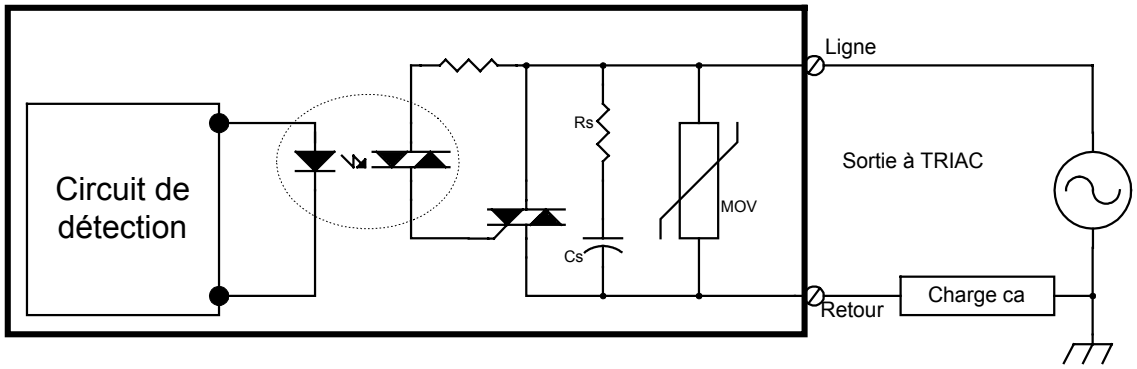
Module de sortie à transistor NPN pour charge cc

Figure 0-6



Module de sortie à transistor PNP pour charge cc

Figure 0-7



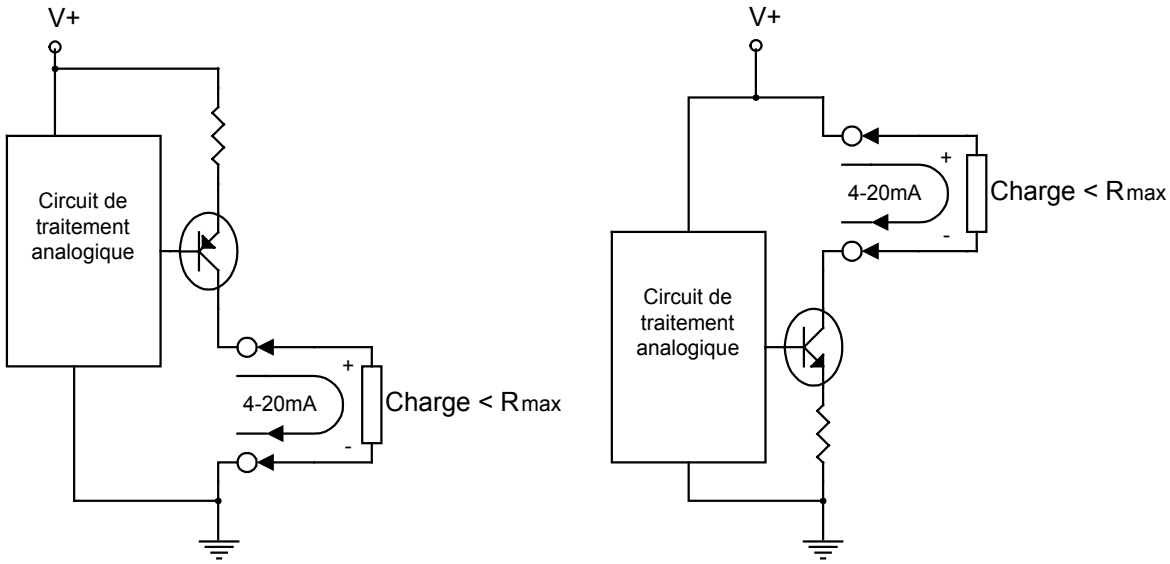
Module de sortie à TRIAC pour charge ca

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 manufacturier nous informe des caractéristiques du transmetteur.

Raccordement d'un transmetteur 4-20mA deux fils

Le transmetteur deux fils, aussi appelés transmetteurs autoalimenté, 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.

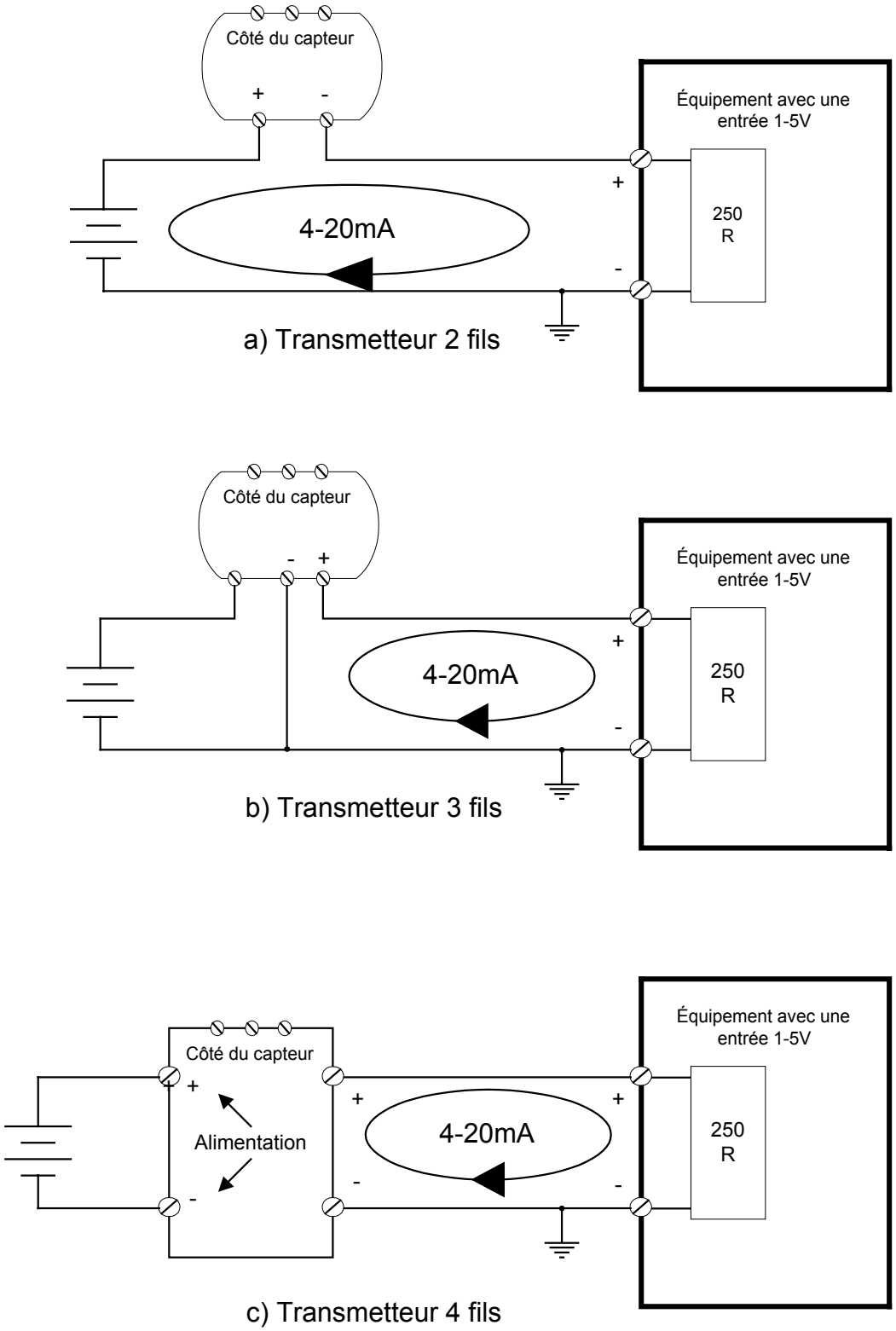


Figure 0-10 : Raccordement d'un transmetteur 4-20mA

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 250Ω commune, les entrées des instruments que nous voulons utiliser. Évidement, cette alternative est valable uniquement lorsque les équipements sont dans la même armoire.

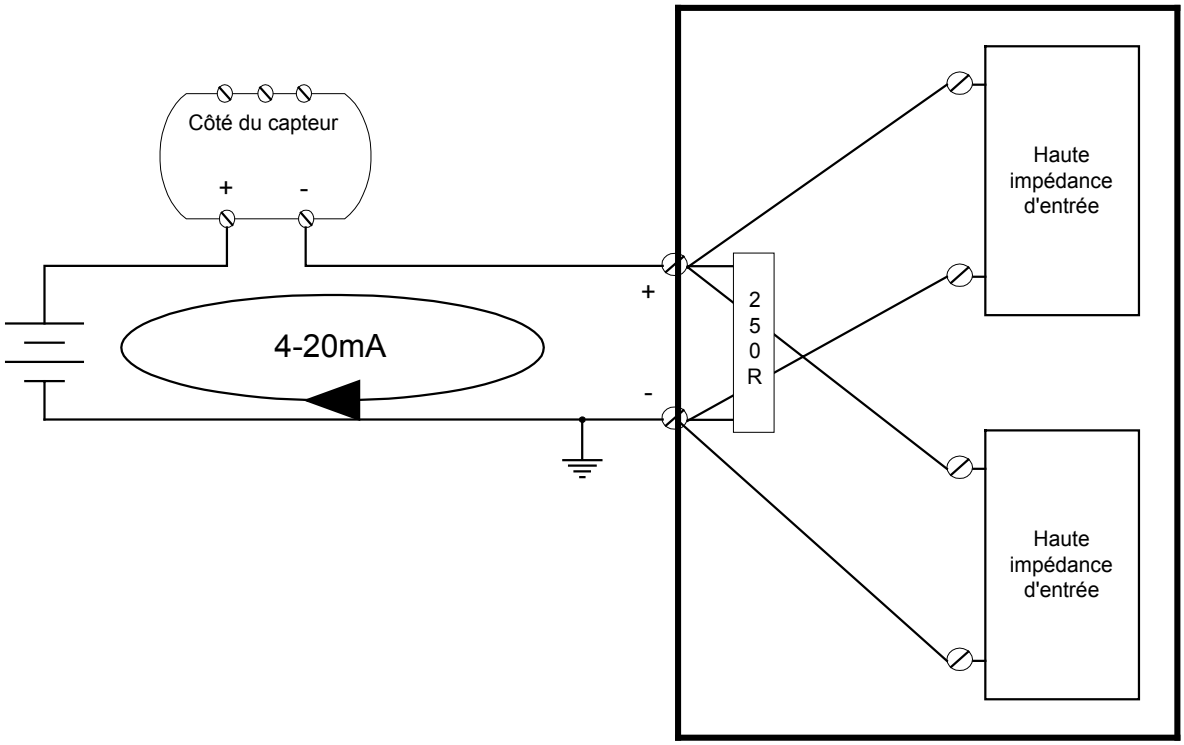


Figure 0-11 : Raccordement des équipements dans une armoire

4.1.15 Bus de terrain

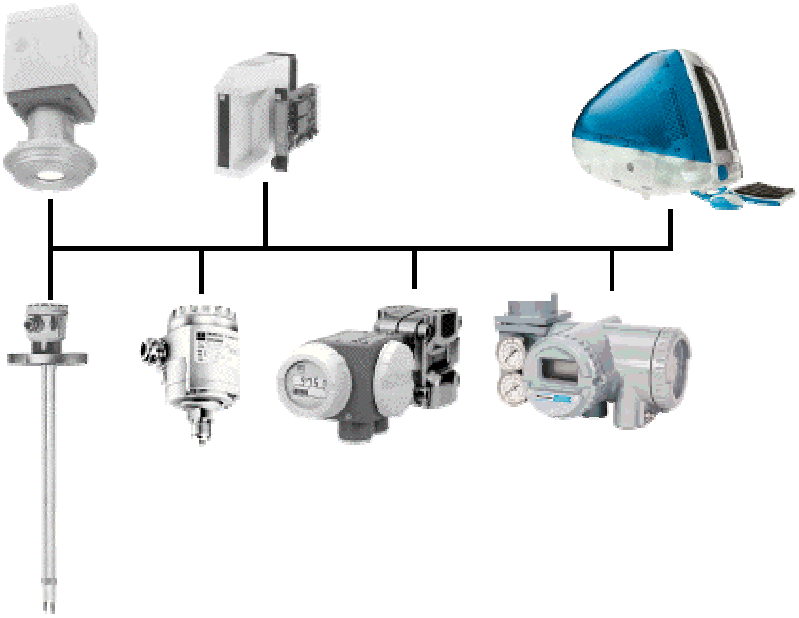


Figure 0-122 : Bus du terrain

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.).

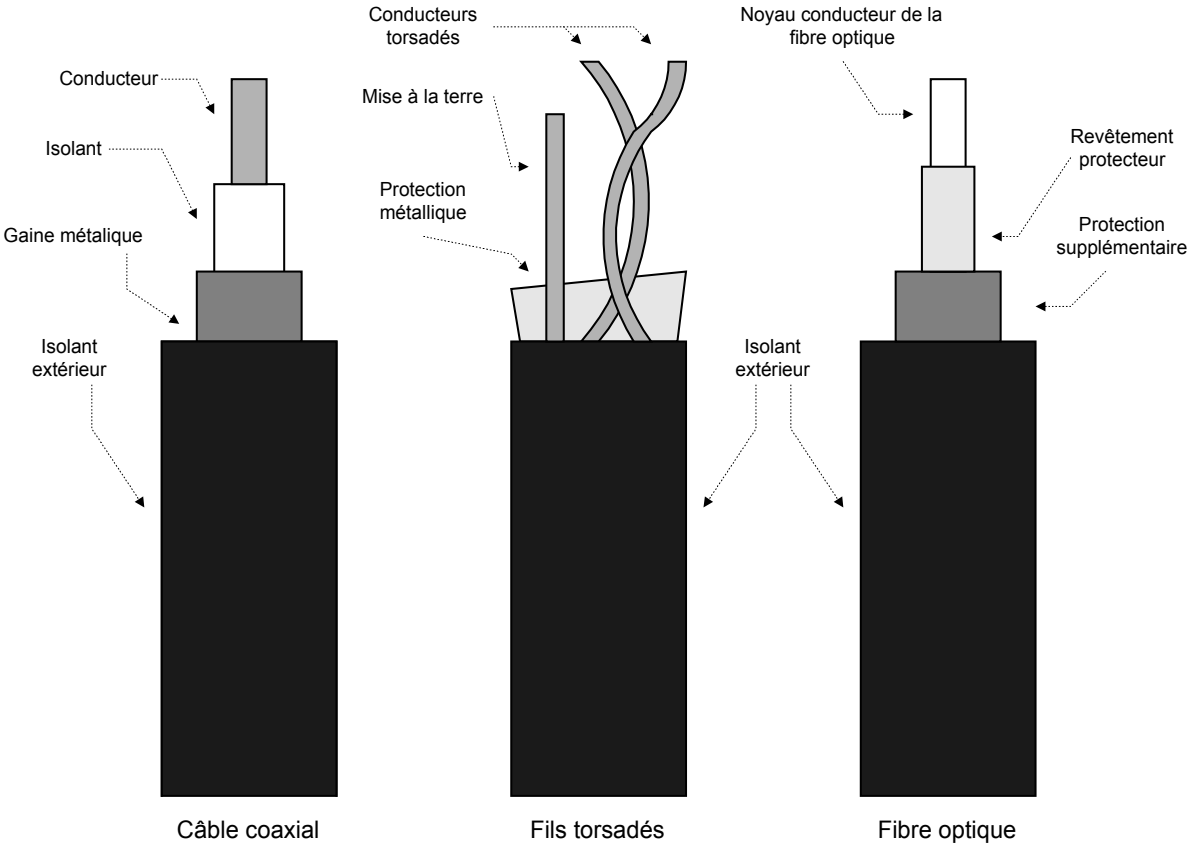


Figure 0-133 : Les types de lien de communication

4.2 L'ETALONNAGE 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 débuter 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 GENERATEUR D'ETALONNAGE 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, ±25,000mV, ±250,00mV, ±2,5000V, ±25,000V, ±250,00V;
    - 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, ±25,000mA, ±250,00mA;
    - mesure de signaux d'entrées à thermocouple;
    - mesure de signaux d'entrées à RTD;
    - avec un adapteur 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 1000,0Ω 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, ±25,000mV, ±250,00mV, ±2,5000V, ±25,000V;
    - 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 adapteur 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 inductantance (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 Ω) d'un conducteur s'écrit : $R = \frac{\rho \times L}{S}$

avec :

- ρ : La résistivité du conducteur en Ω/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.

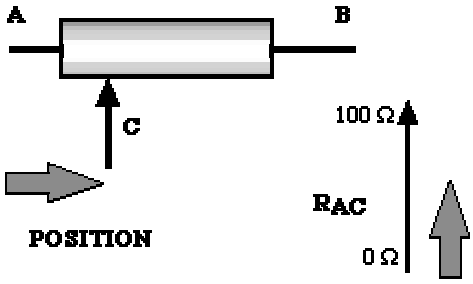


Figure 5-1 Potentiomètre

L'élément sensible est constitué d'un support sur lequel et déposé 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 ;

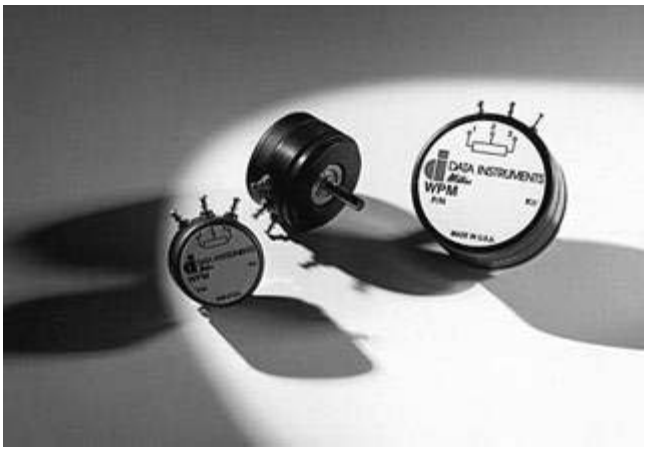


Figure 5-2

- 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

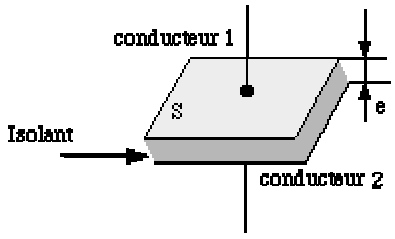


Figure 5-5

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

Capacité (en Farad) du condensateur plan : $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{e}$

avec :

- ε_0 : Permitivité du vide = 8,85 10^{-12} ;
- ε_r : Permitivité 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.

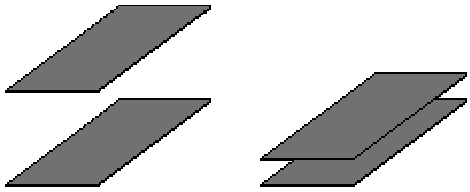


Figure 5-6

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.

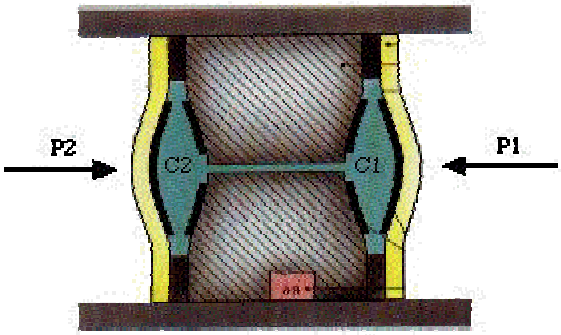


Figure 5-7 Capteur différentiel de pression

5.1.2.4 Capteurs inductifs

Figure 5-8

5.1.2.4.1 Rappel de physique

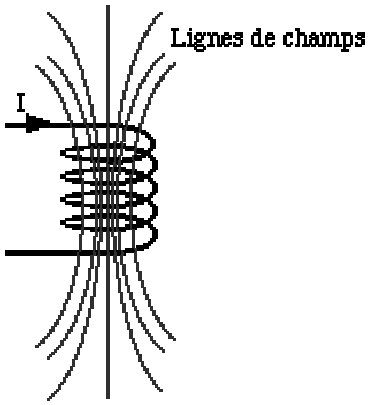


Figure 5-9

Un bobinage de fils conducteurs, parcouru par un courant électrique, crée un champs magnétique B.
On peut canaliser les lignes de champs en ajoutant un circuit magnétique :

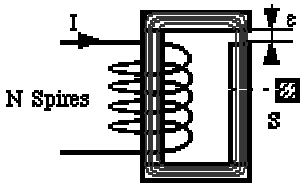


Figure 5-10

Dans le cas ci-dessus on peut écrire : $N \times I = \Re \times \Phi$

avec :

- N : Nombre de spires ;
- I : Courant dans les spires en A ;
- $\Re$: Reluctance du circuit magnétique en H-1 ;
- Φ : Le flux du champs 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.

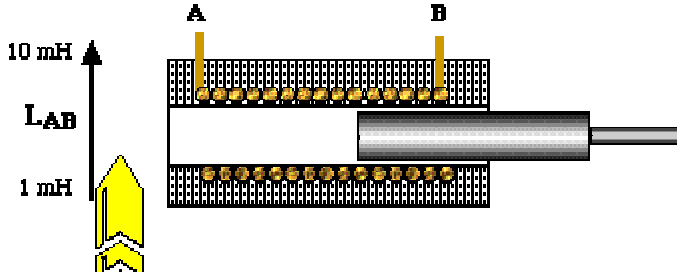


Figure 5-11

- **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.

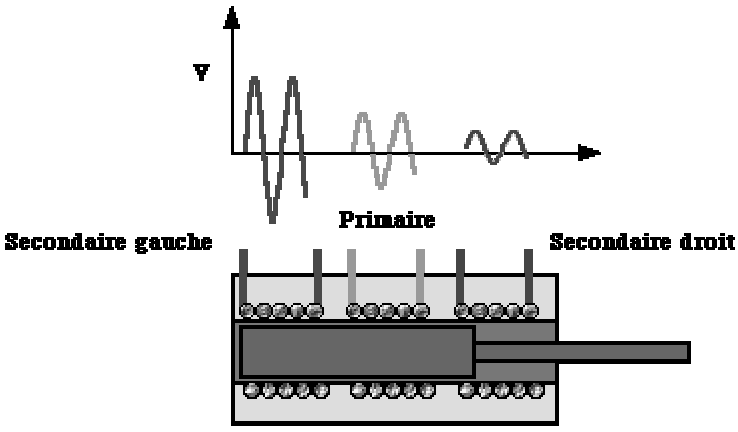


Figure 5-13 Enroulements d'un LVDT

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

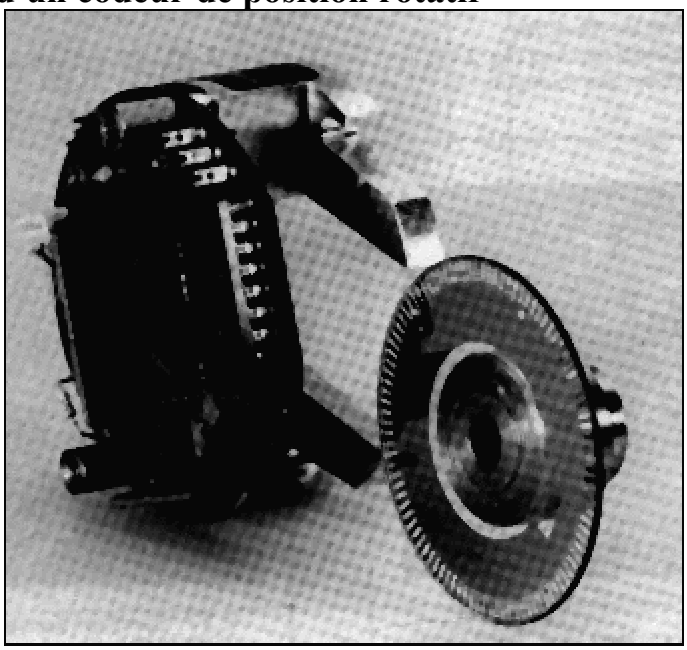


Figure 5-14

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 électrolumineuses, (DEL) traverse les fentes de ce disque et crée sur les photodiodes réceptrices un signal analogique. Une interface électronique (qui est inclue 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.).

II existe deux types de codeur de position rotatifs :

- Le codeur incrémental
- Le codeur absolu

5.1.3.2. Le codeur incrémental

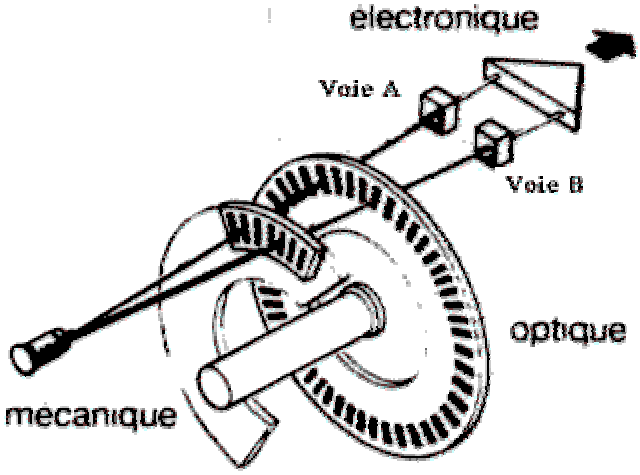


Figure 5-15 Principe de codeur incrémental

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 :

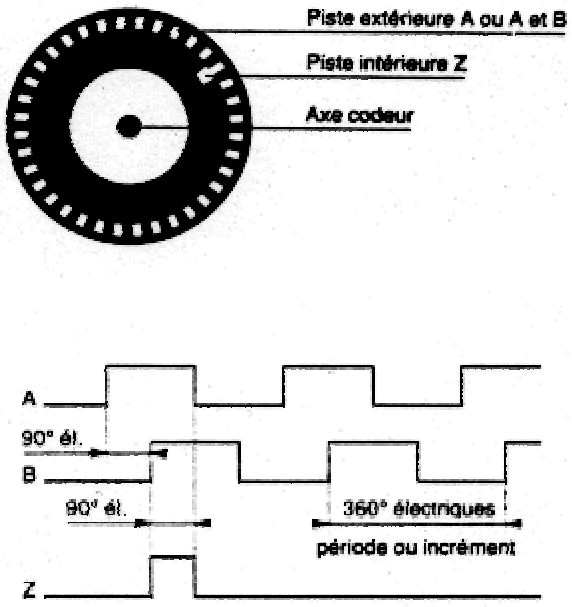
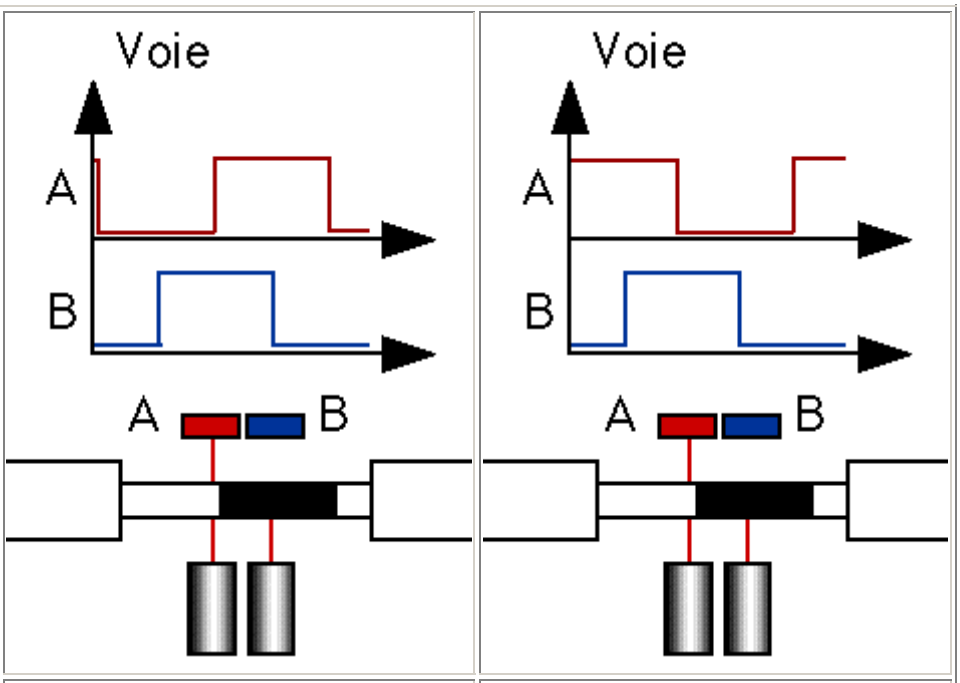


Figure 5-16 Disque du codeur incrémental

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



Dans un sens de rotation.	Dans l'autre sens.

Figure 5-17

Le déphasage de 90° 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° 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 nécéssite 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.

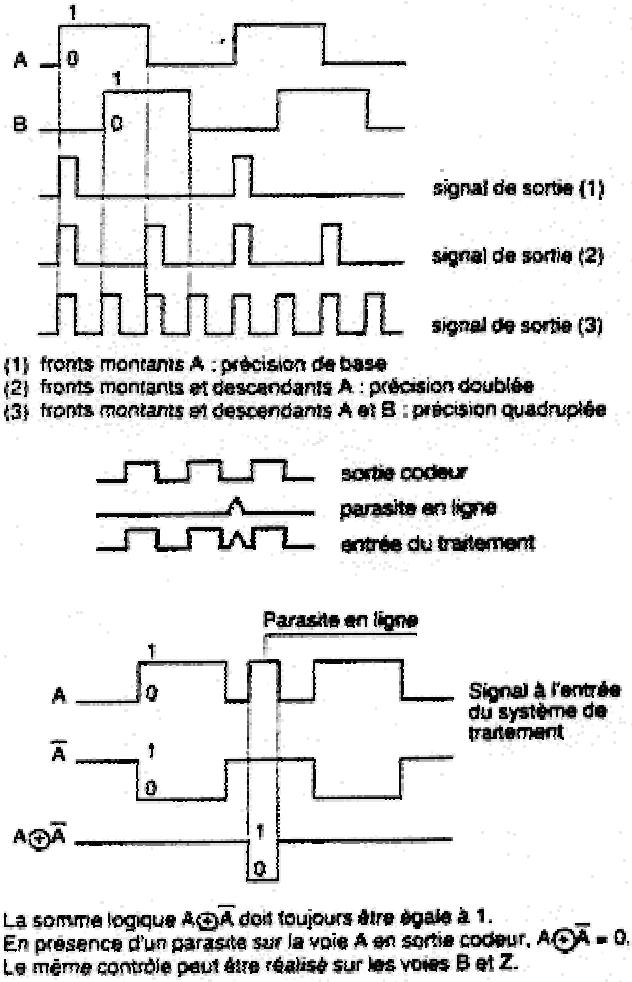


Figure 5-18

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, $\underline{A}$, B, $\underline{B}$, Z, $\underline{Z}$ 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 :

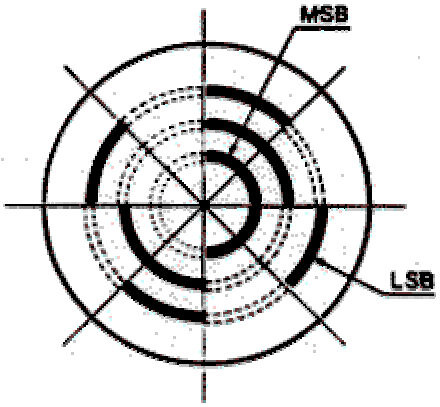


Figure 5-20

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 précèdente, 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**).

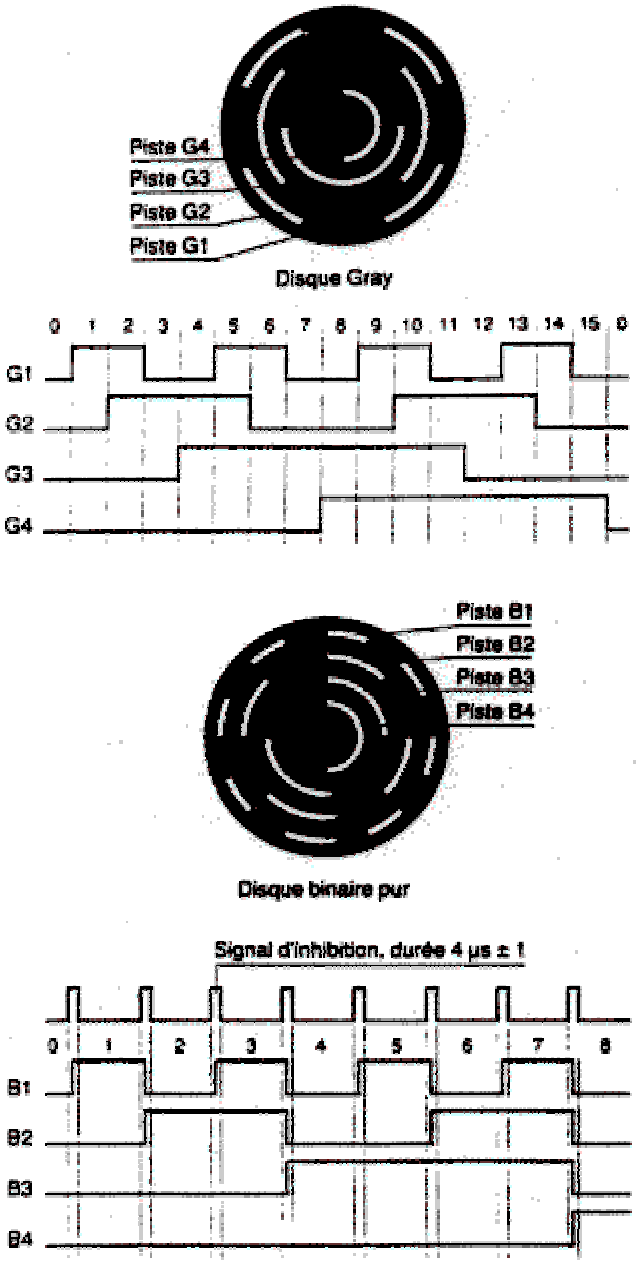


Figure 5-21

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
Avantages	
Le codeur incrémental est de conception simple (son disque ne comporte que deux pistes) donc plus fiable et moins onéreux qu'un codeur absolu.	II est insensible aux coupures du réseau : la position du mobile est détenue dans un onde qui est envoyé en parallèle au systéme de traitement. L'information de position est donc disponible dès la mise sous tension. 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.
Inconvénients	
II 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.	II est de conception électrique et mécanique plus complexe aussi son coût sera plus élevé qu'un codeur incrémental. Les informations de position sont délivrées « en parallèle » ; son utilisation mobilisera donc un nombre important d'entrées du système de traitement (A.P.l. par exemple).

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 dune 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.

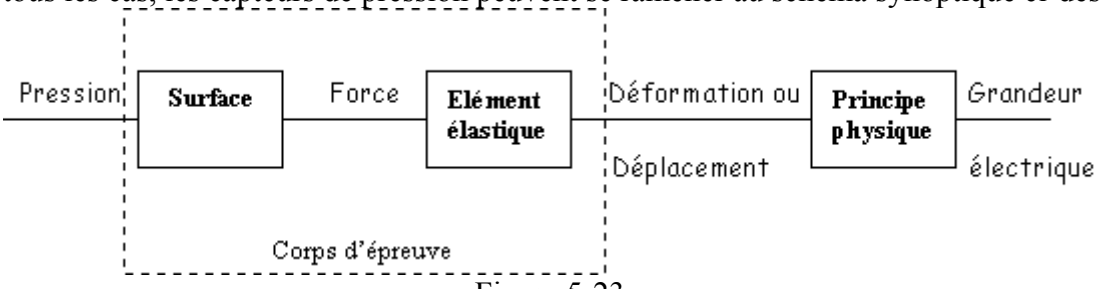


Figure 5-23

Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis au 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.

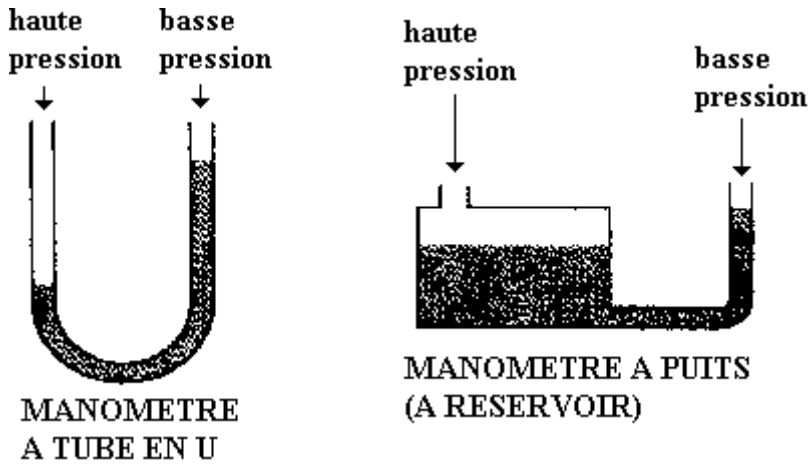


Figure 5-24

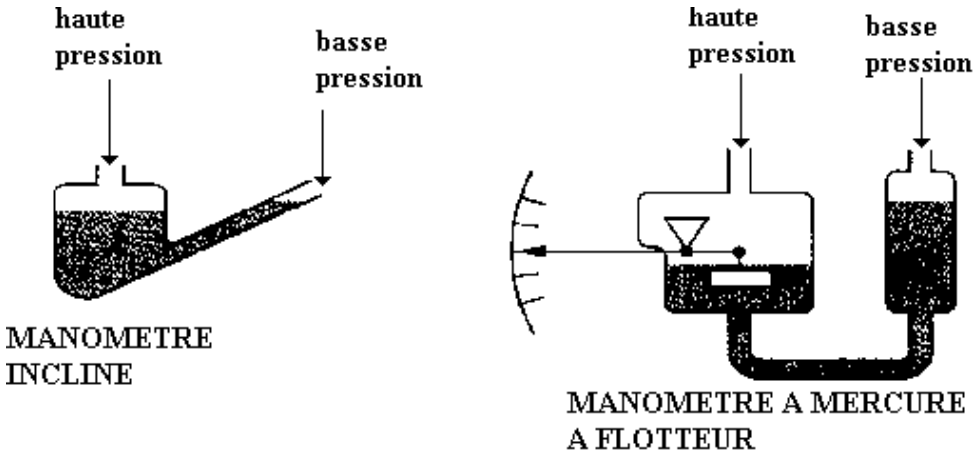


Figure 5-25

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.

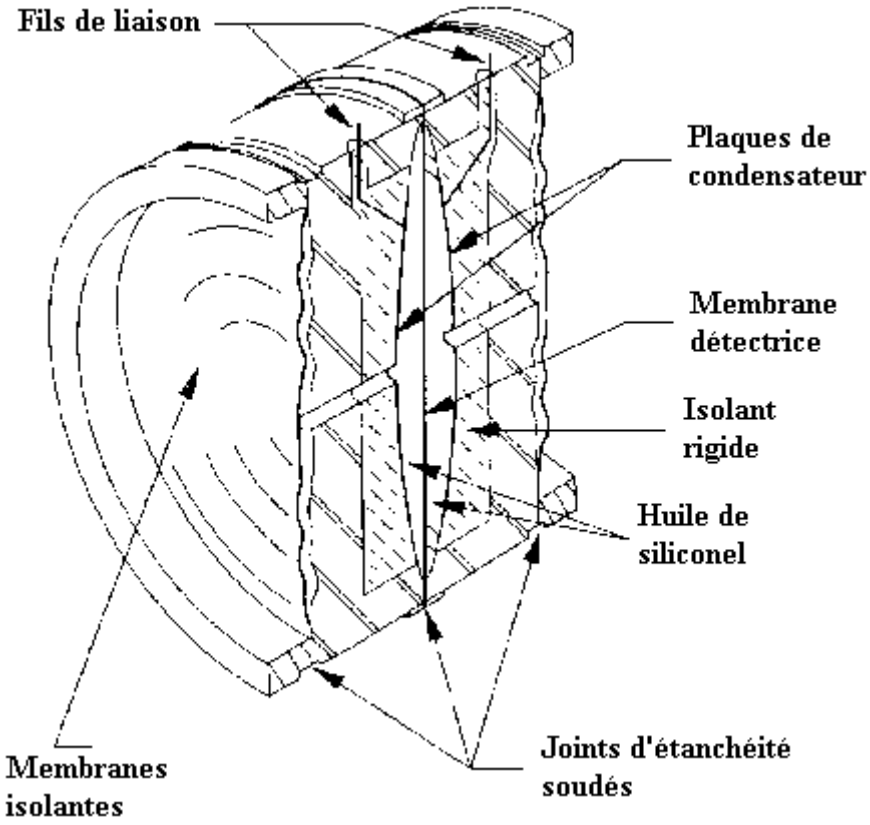


Figure 5-26

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

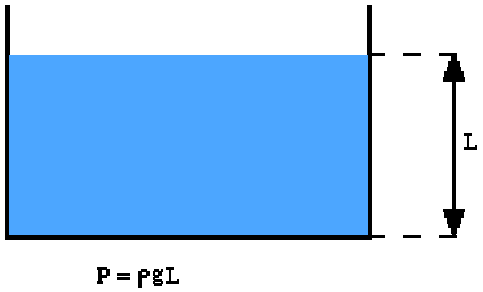


Figure 5-27

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 ρdu liquide.

5.3.1.2. Flotteur

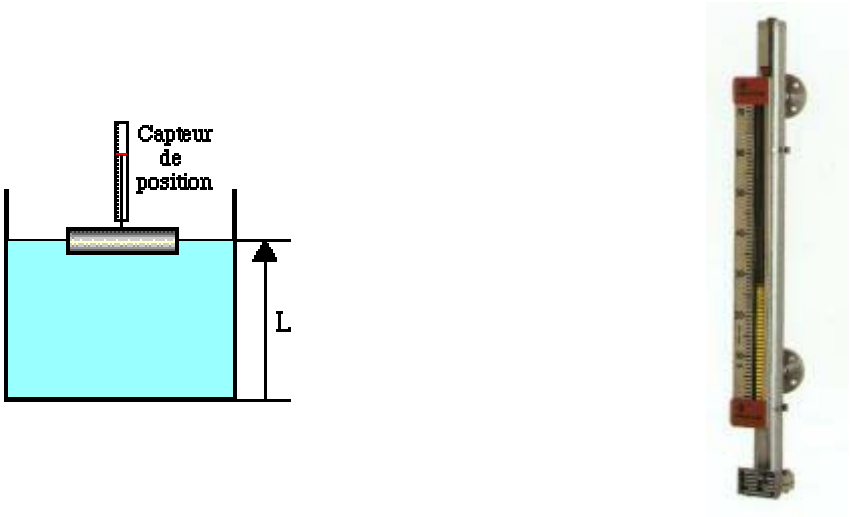


Figure 5-28

Le flotteur se maintient à la surface du liquide. II 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

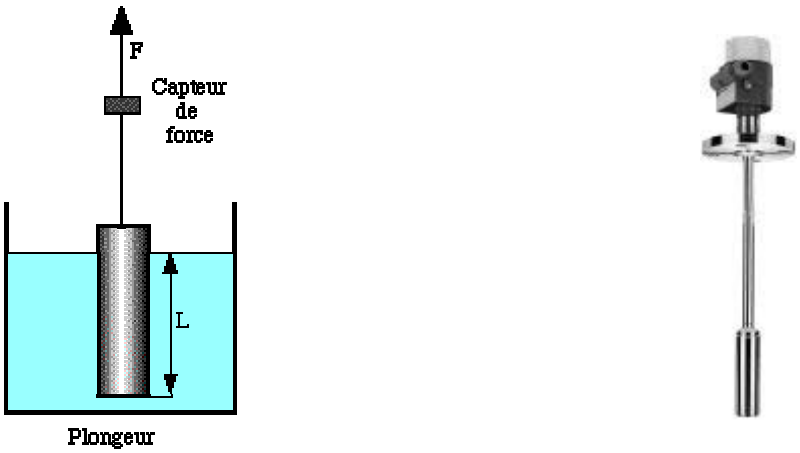


Figure 5-29

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 :

$$F = P - \rho gsL$$

où P est le poids du plongeur, s est l'aire de sa section, et ρgsL est la poussée d'Archimède s'exerçant sur le volume immergé du plongeur (ρ: 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

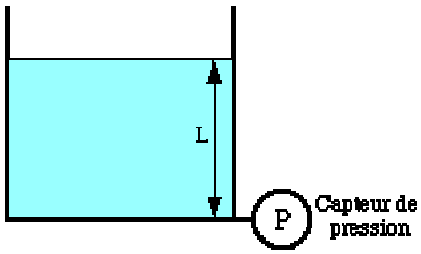


Figure 5-31

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.

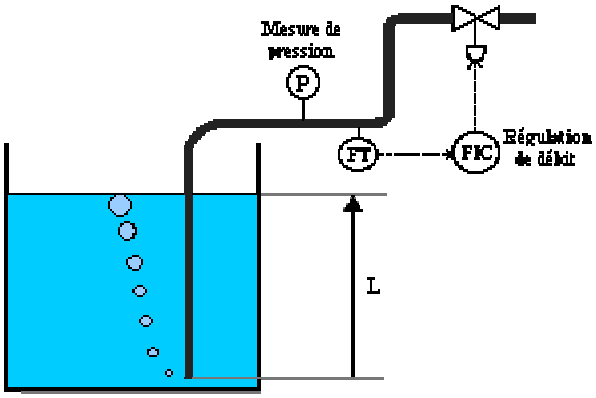


Figure 5-32

Le système comporte :

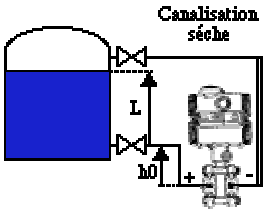
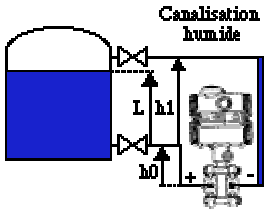
- Une canne d'injection ;
- Un manomètre mesurant la pression d'air de bullage ;
- Un contrôleur de débit visuel (dit bulleur) ;
- Un régulateur de débit ;

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 fournie 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.

Atmosphère sans condensation		Atmosphère avec condensation	
	$L = \frac{\Delta P}{\rho g} - h0$		$L = \frac{\Delta P}{\rho g} + h1$

5.3.1.5. Mesure de masse volumique

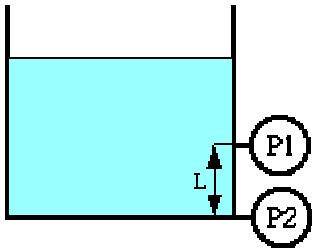


Figure 5-30

La mesure de la différence de pression P2 - P1 permet de connaître la masse volumique du liquide à l'intérieur du réservoir :

$$\rho = (P2-P1)/gL$$

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 conductimètriques

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.

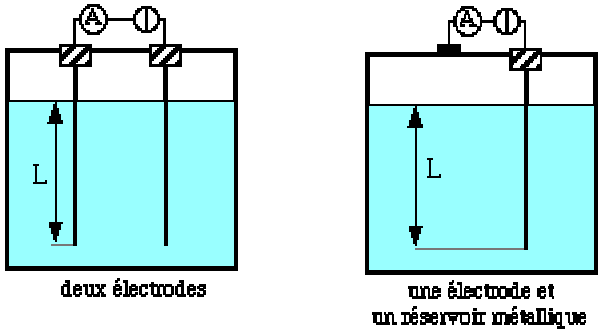


Figure 5-32

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.

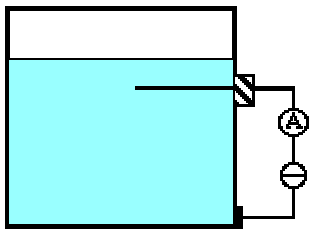


Figure 5-33

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 εr du liquide est supérieure à celle de l'air ; on prend généralement comme condition d'emploi de la méthode εr > 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.

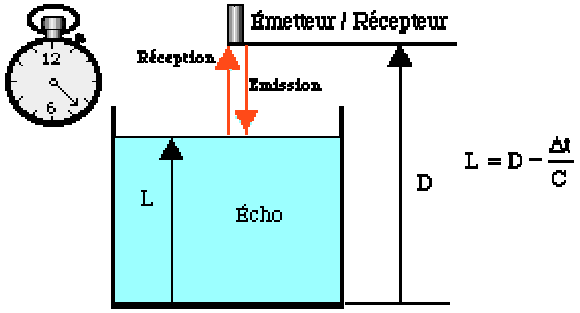


Figure 5-36

L'intervalle de temps ∆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 ; ∆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).

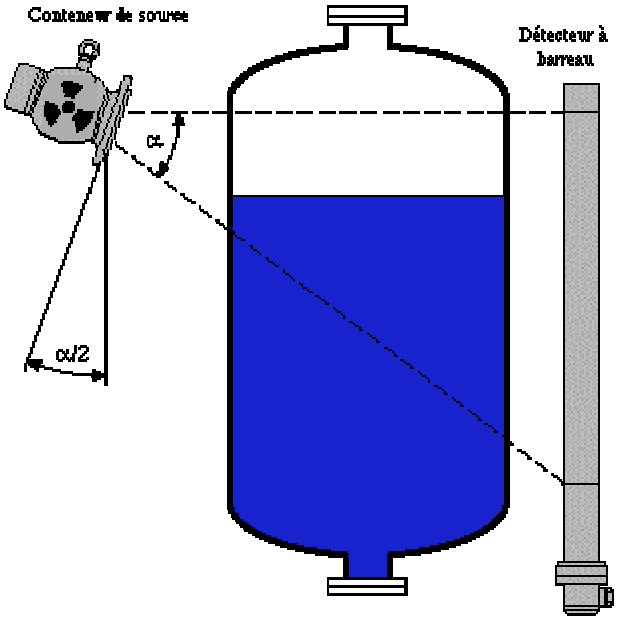


Figure 5-39

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 monté 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.

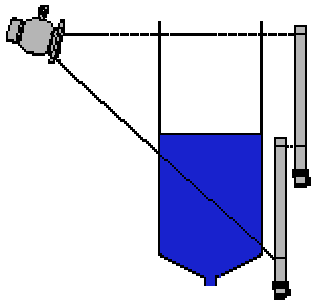


Figure 5-40

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.

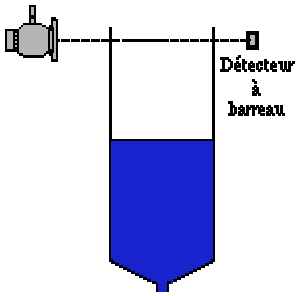


Figure 5-41

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.

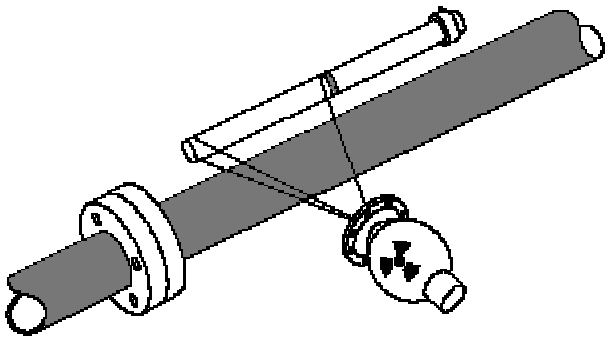


Figure 5-42

5.3.3.5. COMPARAISON DES DIFFERENTES METHODES

	Flotteur	Plongeur	Mesure de pression	Capteurs conductimètriques	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 Qv : Qv = S . V

S est la surface de section de la conduite en m².

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

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

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

En appelant ρ , la masse volumique du fluide (en kg/m^3) : Qm = ρ . Qv
Pour l'eau douce, la masse volumique ρ = 1000 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 prétendument " massiques ", déduisent le débit massique à l'aide de l'équation:
Qm = ρ . Qv

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 glissant 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 ℜ .

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.

- **ν:** viscosité cinématique du fluide en m²/s, (eau douce **ν = 1,1 × 10^{-6} m²/s**)

μ: viscosité dynamique du fluide en poise (1 centipoise = 1 millipascal.seconde)

La viscosité cinématique du fluide est: $$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Dans une conduite de section circulaire :
si ℜ < 2000, l'écoulement est laminaire.

si $\Re$ > 2000, l'écoulement est turbulent.

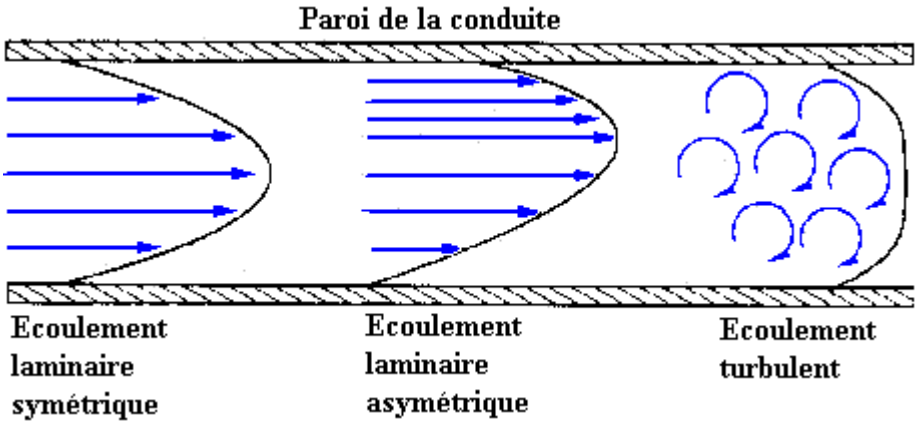


Figure 5-44

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 Qv, 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.

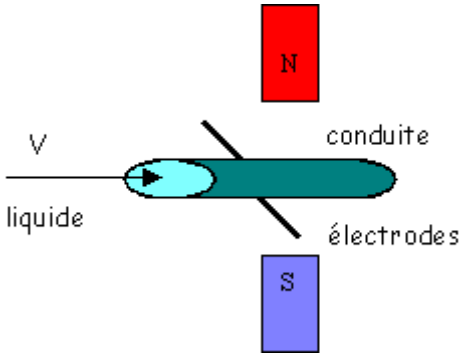


Figure 5-45

Un champ magnétique est crée 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 à 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 physique 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.

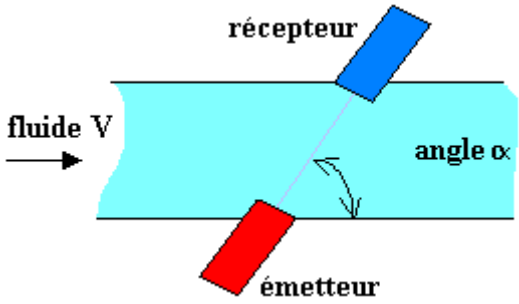


Figure 5-46

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 ou 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.

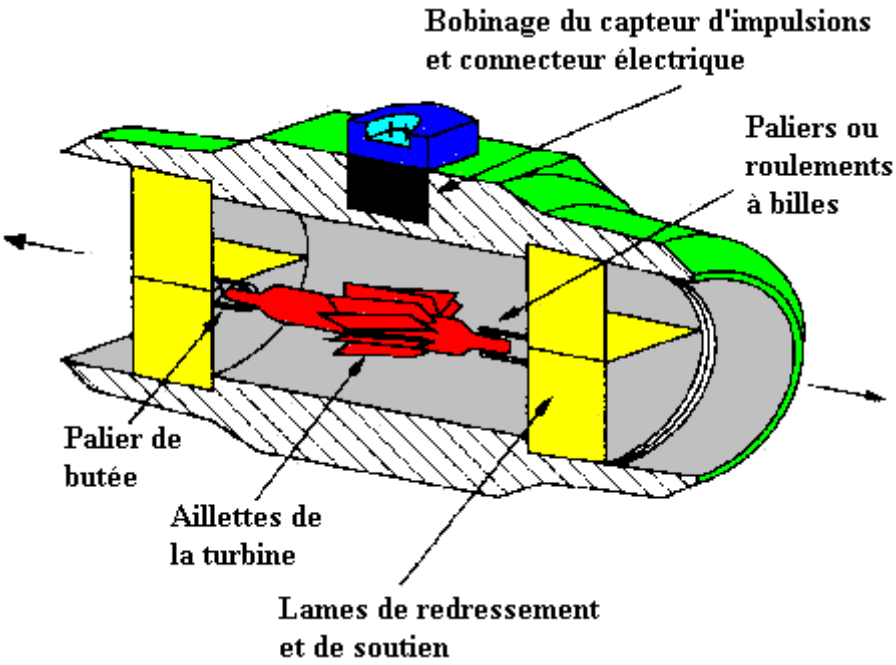


Figure 5-47

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.

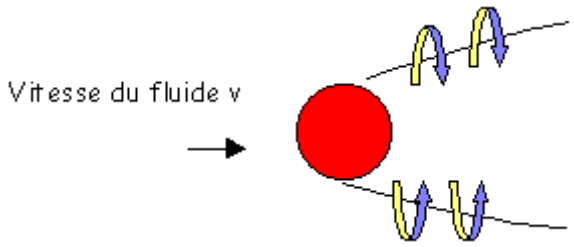


Figure 5-48

Vitesse du fluide = fréquence des tourbillons / facteur K
Le facteur K dépend du nombre de REYNOLDS, mais est pratiquement constant sur une vaste plage de débit.
domaine d'utilisation : Il est destiné au liquide propre, gaz ou vapeur et non recommandé pour la mesure de faibles débits. Il entraîne une perte de charge, supporte des vitesses de fluide importantes.
diamètre de canalisations : 12 à 500 mm
précision : 1 %
bonne dynamique : 1-20.

5.4.2.1.6 Par mesure de pression différentielle à l'aide d'organes déprimogènes

Ces débitmètres de type manométrique sont les plus utilisés pour la mesure des débits de fluide. Ils exploitent la loi de BERNOUILLI qui indique la relation existant entre le débit et la perte de charge résultant d'un changement de section de la conduite. Ces dispositifs sont utilisables que lorsque l'écoulement est turbulent. En partant de la relation Qv = S □ V (vue au 2.1) et en supposant une masse volumique constante (fluide incompressible), on peut écrire l'équation de continuité :
$Qv = S_1 \square V_1 = S_2 \square V_2$
Celle ci montre qu'avec un écoulement régulier et uniforme, une réduction de diamètre de la canalisation entraîne une augmentation de la vitesse du fluide, donc de l'énergie potentielle ou de la pression de la canalisation.
La pression différentielle est convertie en débit volumique, à l'aide de coefficients de conversion, selon le type de débitmètre manométrique utilisé et le diamètre de la conduite.

5.4.2.1.7. Diaphragme.

Il s'agit d'un disque percé en son centre, réalisé dans le matériau compatible avec le liquide utilisé. Le diaphragme concentrique comprime l'écoulement du fluide, ce qui engendre une pression différentielle de part et d'autre de celui-ci. Il en résulte une haute pression en amont et une basse pression en aval, proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. C'est le dispositif le plus simple, le moins encombrant et le moins coûteux.

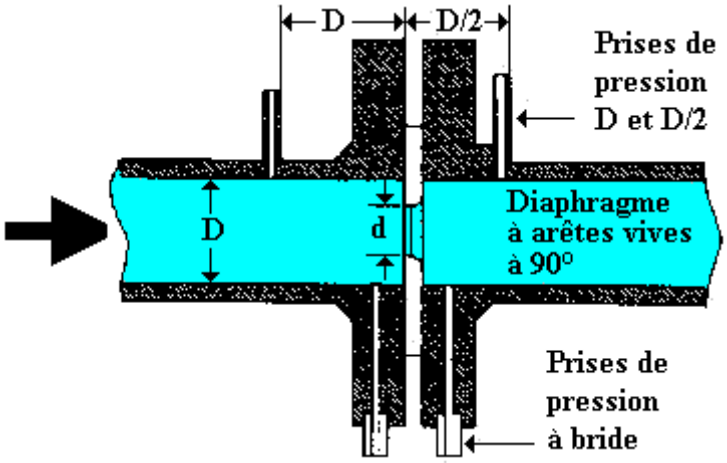


Figure 5-49

domaine d'utilisation : ne convient pas aux liquides contenant des impuretés solides car celles-ci peuvent s'accumuler à la base du diaphragme. Il introduit une perte de charge importante.
diamètre de canalisation : tous diamètres disponibles.
précision : 2 à 5 %
dynamique : 1-4

5.4.2.1.7.Tube de Venturi.

Il est constitué d'un tronc de cône convergent, d'un col cylindrique et d'un tronc de cône divergent. Le dispositif offre une bonne précision, mais reste coûteux et encombrant. Il dispose d'un bon comportement du point de vue perte de charge, usure et encrassement. Comme avec le diaphragme, les mesures de pression différentielle sont converties en débit volumique.

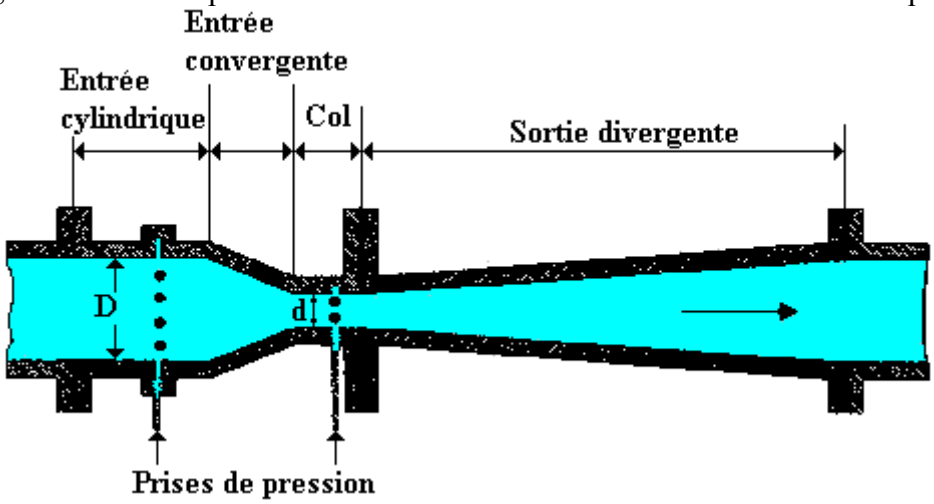


Figure 5-50

domaine d'emploi : liquide propre, gaz et vapeur.
diamètre de canalisation :
précision : 0,5 à 3 % selon les cas.

100% COURS MCours.com Cours et mémoires gratuits mcourscom@gmail.com

5.4.2.1.8.Tuyère.

Elle est considérée comme une variante du tube de VENTURI.
L'orifice de la tuyère constitue un étranglement elliptique de l'écoulement, sans section de sortie rétablissant la pression d'origine.
Les prises de pression sont situées environ ½ diamètre de la conduite en aval et 1 diamètre la conduite en amont.

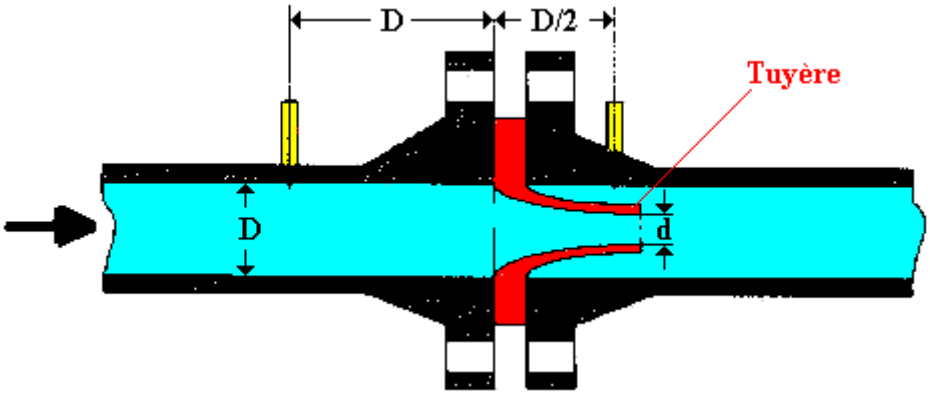


Figure 5-51

La perte de charge se situe entre celle d'un tube de VENTURI et celle d'un diaphragme.
domaine d'utilisation : pour les turbulences importantes (□ > 50000), notamment dans les écoulements de vapeur à haute température. Ce dispositif est inutilisable pour les boues.
diamètre de canalisation :
précision : 1 à 3 %
dynamique : 1-4

5.4.2.1.9 Débitmètre à section variable

Rotamètre.
Il est constitué d'un petit flotteur placé dans un tube conique vertical.
Le flotteur est en équilibre sous triple action de :
son poids (M.g)
de la force de poussée d'Archimède (□ □ g □ volume du flotteur)
de la poussée du liquide: $\rho \frac{SCxV^2}{2}$

M : masse du flotteur en kg
g : accélération de la pesanteur 9,81 m/s²
ρ : masse volumique du liquide en kg/m³
V : vitesse du fluide en m/s
S : surface du flotteur en m²
C : coefficient de traînée du flotteur (sans unité)

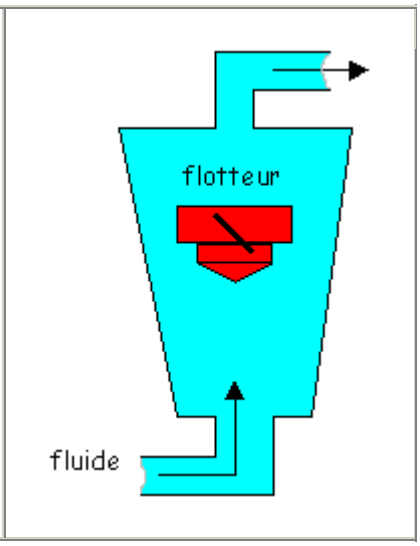


Figure 5-52

Le diamètre du tube en verre étant plus grand en haut qu'en bas, le flotteur reste en suspension au point ou la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure en équilibre le poids. Une encoche dans le flotteur le fait tourner sur lui-même et stabilise sa position. Le repérage de la position du flotteur se fait par lecture directe sur le tube en verre qui est muni de graduations ou par l'intermédiaire d'un couplage optique ou magnétique entre le flotteur et l'extrémité du tube. Il introduit une perte de charge qui est fonction du débit et doit être étalonné dans ses conditions d'emploi.
domaine d'utilisation : Il ne tolère pas de haute pression (20 bars au maximum pour les modèles en verre). Souvent utilisés pour les débits de purge.
diamètre de canalisation : 4 à 125 mm
précision : 2 à 10 % de l'étendue de mesure.
dynamique : 1-10

5.4.2.1.10.Tube de PITOT.

La méthode consiste à utiliser deux tubes qui mesurent la pression en des endroits différents à l'intérieur de la canalisation. Ces tubes peuvent être montés séparément dans la conduite ou ensemble dans un seul boîtier. L'un des tubes mesure la pression d'arrêt (ou pression dynamique) en un point de l'écoulement. Le second tube mesure uniquement la pression statique, généralement sur la paroi de la conduite. La pression différentielle mesurée de part et d'autre du tube de PITOT est proportionnelle au carré de la vitesse.
domaine d'utilisation : pour les liquides propres ou visqueux, la mesure de débit de gaz, la variation de la vitesse d'écoulement entre la moyenne et le centre n'étant pas aussi importante qu'avec les autres fluides. Ils sont facilement bouchés par des corps étrangers présents dans le fluide.
diamètre de canalisation : à partir de 300 mm et jusqu'à 3,8 m en France (9,6 m au USA)
précision : 1 à 2 % de la valeur réelle
dynamique : 1-4
La mesure de débit, réduite à la mesure des différences de pression □ p du fluide qui apparaît entre deux points situés en amont et en aval de l'étranglement de la conduite est donc réalisée par un capteur de pression différentielle. Un calculateur est alors nécessaire pour l'obtention d'un signal proportionnel au débit.

5.4.2.1.11. Débitmètre à cible .

Il comprend un disque (cible), centré dans une conduite. La surface de la cible est placée à 90 ° par rapport à l'écoulement du fluide. La force exercée par le fluide sur la cible permet une mesure directe du débit de fluide.

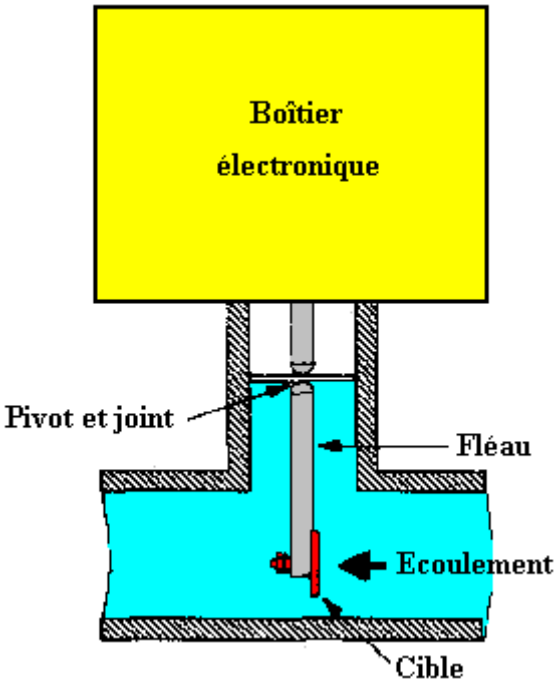


Figure 5-53

Comme précédemment, le signal de sortie est une pression différentielle, un calculateur est nécessaire pour l'obtention d'un signal proportionnel au débit.
domaine d'utilisation : fluides chargés ou corrosifs.
diamètre de canalisation : 15 à 1800 mm
précision : 1 à 2 % de la valeur réelle.
dynamique : 1-3

5.4.2.1.12.Par compteurs volumétriques.

Ils mesurent le volume écoulé Qv directement, en emprisonnant de façon répétée un volume élémentaire de fluide. Le volume total de liquide traversant le débitmètre pendant un laps de temps donné est le produit du volume élémentaire par le nombre d'emprisonnements.
Ces appareils totalisent souvent le volume directement sur un compteur intégré, mais ils peuvent également délivrer une sortie impulsions qui peut être transmis sur un afficheur.
Ils en existent plusieurs types selon le corps d'épreuve utilisé, à piston, à palettes (ou rotors), à roues ovales, à disque oscillant.
domaine d'utilisation : eau, acides, lubrifiants (surtout pas les boues…)
diamètre de canalisation : 10 à 300 mm
précision : 1 %
dynamique : 1-15

5.4.2.2. Mesure des débits massiques des fluides.

5.4.2.2.1.Débitmètre à effet CORIOLIS.

La force de CORIOLIS (Mathématicien français) explique notamment pourquoi les cyclones tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud et dans le sens inverse dans l'hémisphère Nord. Il est question, dans un système en rotation, de la force qui agit perpendiculairement sur la masse en mouvement dans le système, selon le vecteur vitesse relative et sur l'axe de rotation du système. Pour une masse m se déplaçant à une vitesse v, dans un système en rotation ayant lui-même une vitesse angulaire a, la force de CORIOLIS vaut $\mathbf{F = 2 \times m \times a \times v}$. Le débitmètre de CORIOLIS utilise comme détecteur un tube en U sans obstacle.

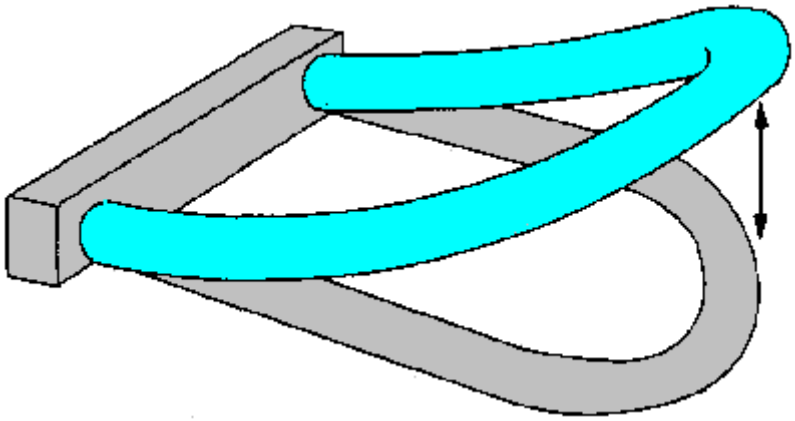


Figure 5-54

Le tube de mesure vibre à sa fréquence naturelle à l'intérieur du boîtier du capteur. Le tube de mesure est actionné par un bobinage électromagnétique situé au centre de la courbure du tube et vibre comme un diapason. Le fluide s'écoule dans le tube de mesure et est contraint de suivre le mouvement vertical du tube vibrant. Lorsque le tube monte pendant une moitié de sa période vibratoire, le fluide traversant le détecteur résiste à son entraînement vers le haut en repoussant le tube vers le bas.

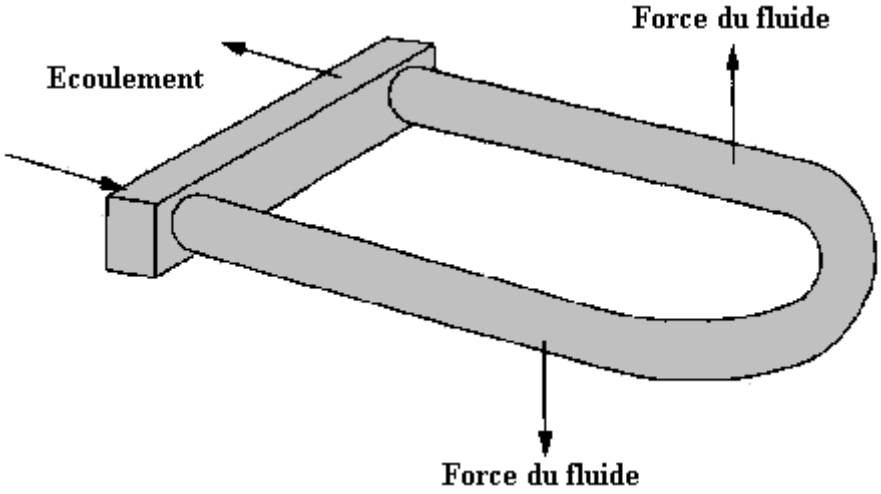


Figure 5-55

A la sortie du détecteur, le fluide a un mouvement ascendant, induit par le mouvement du tube. Lorsqu'il franchit le coude du tube, le fluide résiste aux modifications de son mouvement

vertical en repoussant le tube vers le haut. La différence de forces entraîne une torsion du tube de mesure. Lorsque le tube descend pendant la seconde moitié de sa période vibratoire, il se tord dans le sens opposé. C'est cette caractéristique de torsion qui est appelé effet CORIOLIS. Du fait de la seconde loi de mouvement de NEWTON, l'amplitude de la torsion du tube de mesure est directement proportionnelle au débit massique du fluide traversant le tube. Les détecteurs électromagnétiques situés de part et d'autre du tube de mesure enregistrent la vitesse du tube vibrant. Le débit massique se détermine en mesurant la différence de temps entre les signaux de détecteurs de vitesse. En effet la torsion du tube de mesure, pendant l'écoulement du fluide, entraîne une différence de temps entre les deux signaux de vitesse. C'est cette différence de temps qui est directement proportionnelle au débit massique traversant le tube et demeure indépendante des propriétés de ce fluide.
domaine d'utilisation : liquide propre et visqueux (pâtes, boues). Ce dispositif exige l'absence de toute bulle de vapeur formée momentanément dans le liquide et susceptible de perturber la mesure.
diamètre de canalisation : < 13 mm
précision : 1 %
dynamique : 1-50

5.4.2.2.2 Débitmètre massique thermique.

Le principe est basé sur la mesure des transferts caloriques par le fluide lui-même. Ces dispositifs sont constitués d'un tube métallique à paroi mince, des résistances chauffantes sont bobinées à l'extérieur du tube, la circulation du fluide provoque un déséquilibre thermique entre l'amont et l'aval du tube, le déséquilibre est proportionnel au débit massique.

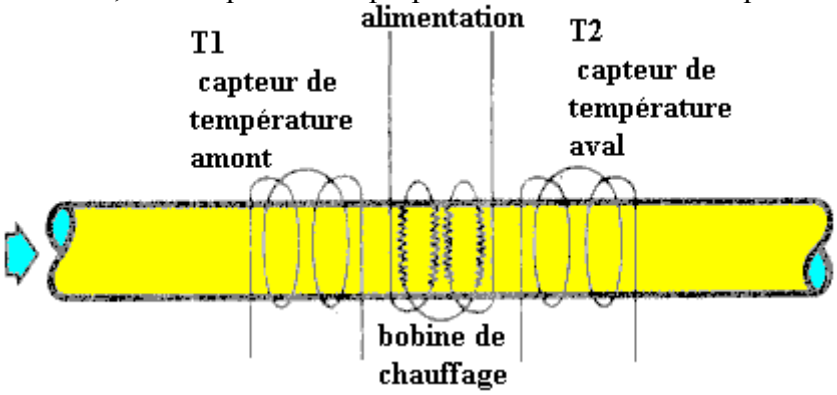


Figure 5-56

domaine d'utilisation : liquide propre, gaz, vapeur
diamètre de canalisation : tous diamètres
précision : de l'ordre de 1 %
dynamique : 1-10

5.4.2.3. Critères de choix des capteurs de débit.

Les critères de choix sont très nombreux, le tableau ci dessous donne une liste des principaux éléments à considérer.

Caractéristiques du fluide	Nature du fluide (liquide chargé, conducteur…) Viscosité Régime d'écoulement Température Pression Agressivité Compressibilité
Critères métrologiques	Nature du signal de sortie (0-10 V, 4-20 mA…) Dynamique * Précision Etendue de mesure Bande passante **
Caractéristiques de l'installation	Diamètre de canalisation Perte de charge engendrée Encombrement Etalonnage Usure

* Plage du débit de fonctionnement d'un appareil sur laquelle il conserve la précision de mesure annoncée (exemple : si Q_{min} = 1 m^3/h, avec une dynamique 1-4 alors Q_{max} = 4 m^3/h)
** Bande passante = plage de fréquence pour laquelle l'atténuation de la courbe de réponse en fréquence est inférieure à 3 dB de la valeur maximale.
Une première sélection peut avoir lieu en se basant sur les critères fondamentaux, c'est à dire :
nature du fluide transporté
type de signal de mesure
plage de mesure
diamètre de la canalisation

Equivalence Pouce / DN.
1 Pouce = 2,54 cm

Pouce	1	1 ¼	1 ½	2	2 ½	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
DN	25	32	40	50	64	75	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500

5.5. LES CAPTEURS DE TEMPÉRATURE

les systèmes de Les capteurs de température se trouvent sous diverses formes en industrie:

- mesure mécaniques:
  - lames bimétalliques (pyromètre à bilame);
  - les thermomètres à bulbes ou à dilatation;

- les systèmes de mesure électrique:
  - les diodes, les transistors et les transducteurs intégrés;

- les thermistances;
- les thermomètres à résistances RTD;
- les thermocouples;

• les systèmes de mesure optique:
- les thermomètres à rayonnement;
- les thermomètres optiques.

5.5.1.Mesure mécaniques:

5.5.1.1.Lames bimétalliques (bilame)

La température provoque une dilatation des métaux, et les coefficients de dilatation sont différents pour chaque métal.

Deux métaux à coefficients thermiques différents sont collés l'un sur l'autre et, par contraction mécanique, changent de forme. Pour une température spécifiée, il en résulte une déformation comme celle illustrée à la Figure 57.

Les détecteurs à lames bimétalliques sont utilisés pour détecter des températures excessives et, pour des conditions de températures données, ouvrir le circuit de commande ou dans les relais de surcharge des moteurs.

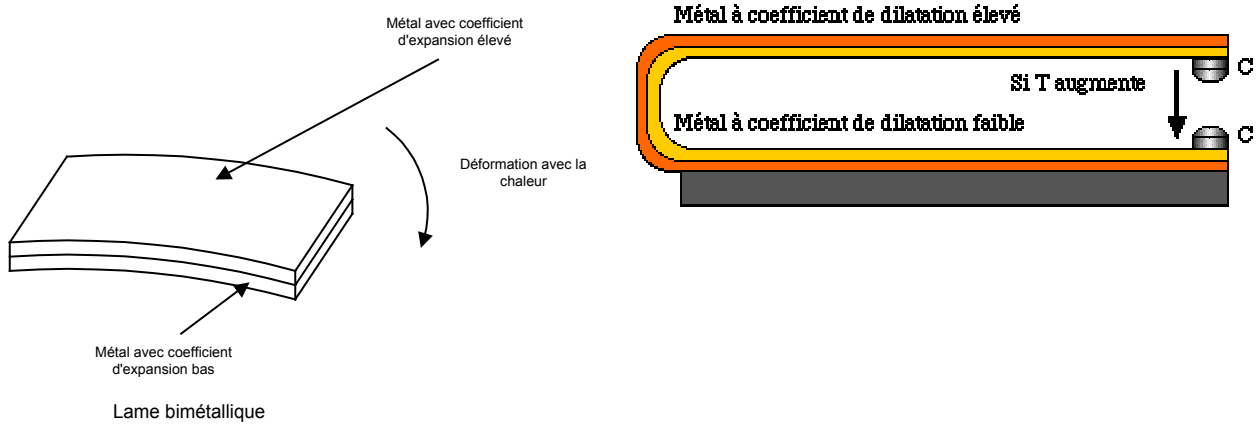


Figure 5-57 : Circuit de commande avec lame bimétallique

L'étendue de mesure recommandée est de -25°C à +500°C. La sensibilité est excellente, et le temps de réponse est bon. La précision est de l'ordre de 1% à 2% de l'étendue de l'échelle.

5.5.1.2.Les thermomètres à bulbes ou à dilatation

Les fluides changent de volume lorsque soumis à des variations de température. Pensons au thermomètre à mercure par exemple.

Le thermomètre à bulbe utilise le même principe. On transforme la dilatation d'un fluide en variation de mouvement ou de déplacement. Un exemple de thermomètre à bulbe est illustré par la Figure 5-5-58. Le bulbe, à l'extrémité, est soumis à la température à mesurer, et le transport du fluide est effectué à l'aide d'un capillaire.

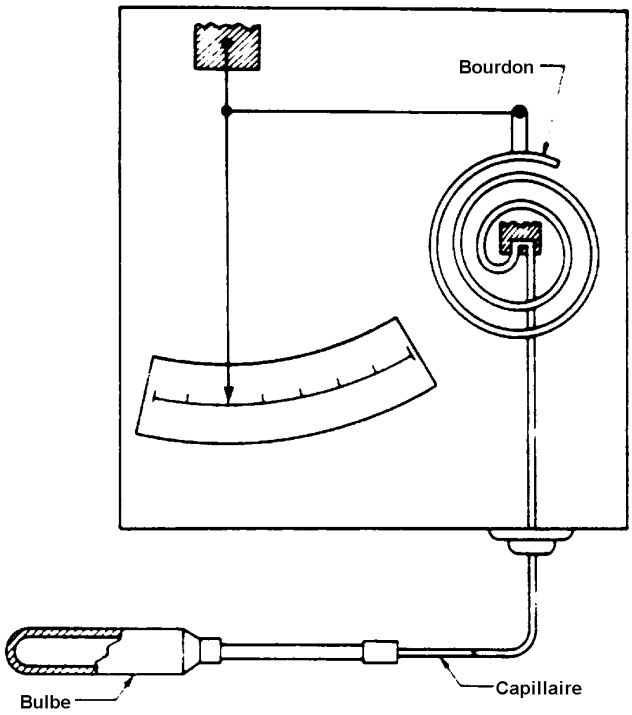


Figure 5-58 : Thermomètre à bulbe

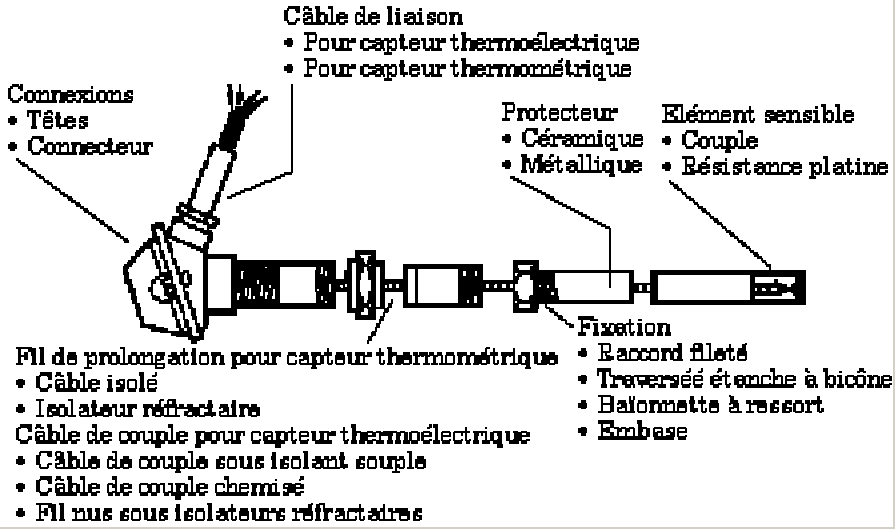
Gracieuseté BRIAN CONTROLS.

L'étendue de mesure recommandée est de -50°C à +1000°C. La sensibilité est bonne, et le temps de réponse est bon. La précision est de l'ordre de 0,5% à 2% de l'étendue de l'échelle.

5.5.2. THERMOMETRES ELECTRIQUES

5.5.2.1. Présentation

Les capteurs à signal électrique qui suivent auront l'avantage d'une plus grande souplesse d'emploi (information transmissible, enregistrement) tout en gardant une précision suffisante pour les emplois industriels et beaucoup d'emplois de laboratoire.



Structure fonctionnelle d'un capteur électrique

Figure 5-59

5.5.2.2. Thermomètres à résistance et à thermistance

Le fonctionnement des thermomètres à résistance et des thermistances est basé sur un même phénomène physique, à savoir la variation de la résistance électrique d'un conducteur avec la température. Les lois de variation étant très régulières, il est possible de les utiliser pour repérer les températures par des mesures de résistance. Mais comme ces lois sont différentes suivant qu'il s'agit d'un métal ou d'un agglomérat d'oxydes métalliques, deux cas ont été distingués sous les appellations de thermomètre à résistance d'une part et de thermistance d'autre part.

5.5.2.2.1. Thermomètres à thermistance

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000 °C. La composition d'une thermistance peut-être, par exemple :

- Fe2O3 (oxyde ferrique),
- MgAl2O4 (aluminate de magnésium),
- Zn2TiO4 (titane de zinc).

La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Il existe deux types de thermistance, les CTN à coefficient de température négatif, et les CTP à coefficient de température positif. La loi de variation est de la forme :

$$R = a \times e^{\frac{b}{T}}$$

a et b sont deux paramètres de la thermistance.

Les thermistances sont comprimées et moulées suivant différentes formes. La Figure 5-60 illustre ses formes et ses symboles usuels. Les thermistances sont habituellement insérées dans un circuit en pont dont la tension de sortie est fonction de la température, ou sur un diviseur de potentiel pour activer un circuit de comparaison.

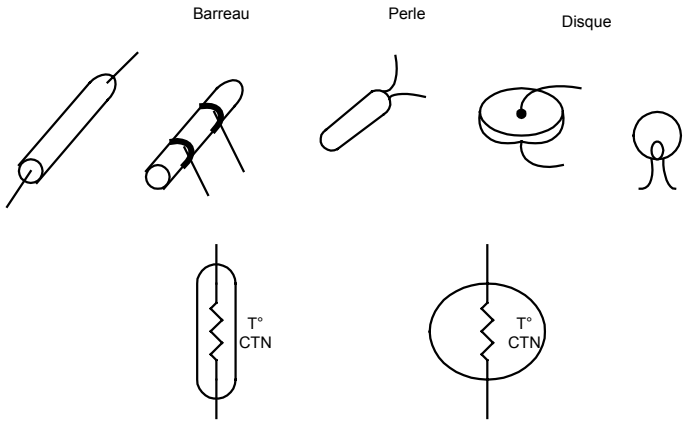


Figure 5-60 : Formes et symboles des thermistances

La valeur nominale de la thermistance est fournie pour une température nominale de 25°C. Des courbes typiques de thermistance CTN sont présentées à la Figure 5-61.

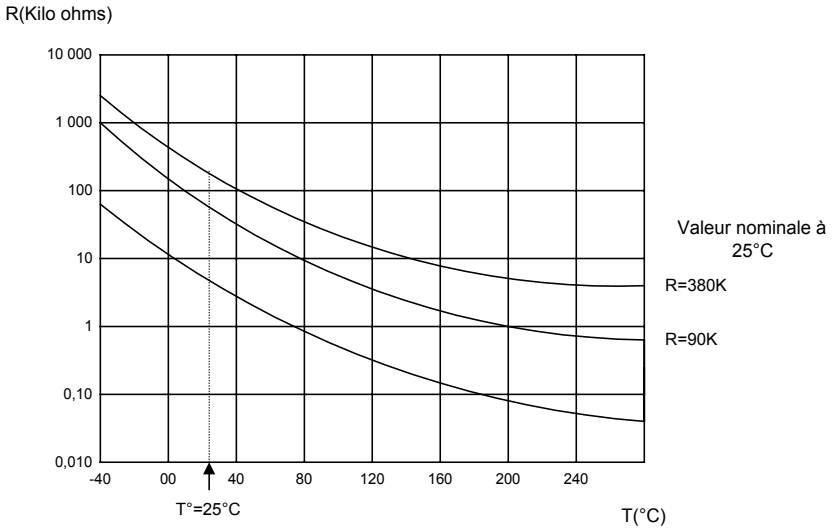


Figure 5-61 : Courbes typiques de thermistances CTN

Thermistances CTP - séries 660

BC Components (Philips Composants)

- Les CTP sont des résistances semiconductrices dont la résistance, à dissipation nulle, augmente avec la température dans une plage déterminée.
- La variation de température est obtenue soit par effet joule soit par variation de température ambiante, ou par la combinaison de ces deux moyens.
- Domaines d'application: stabilisation du courant, protection, senseur.

Spécifications techniques

Tolérance: ±20%

réf. BC Components	R (Ω) à 25°C	I (mA) à 25°C basculement	tension max. (V)
660-54792	240	70	145
660-53993	260	59	265
660-52893	500	42	265
660-51593	1900	23	265

Référez-vous aux circuits d'applications pour l'analyse de circuit.

5.5.2.2.2.Les thermomètres à résistances RTD

Sous l'action de la chaleur, la résistance de métaux tels le cuivre, le platine et le nickel varie de sorte que l'on peut avoir une indication de la valeur de la température en mesurant cette résistance.

Quoique travaillant sur le même principe, les manufacturiers ont développé des thermomètres à résistances de bien meilleure précision que les thermistances: il s'agit des RTD, « resistance temperature detector ». Ce capteur comporte des fils de platine, de cuivre ou de nickel, enfermés dans un boîtier étanche en matériau non corrosif (Figure 5-62). De tous les métaux utilisés, on retrouve surtout des thermomètres à fil de platine. Ces thermomètres sont habituellement plongés dans les liquides dont on veut connaître la température.

Le RTD platine 100Ω normalisé est devenu une norme en instrumentation. Celui-ci offre une résistance de 100Ω pour une température de 0,0°C et il peut mesurer des températures allant de (-180°C jusqu'à +650°C).

La matériau de la sonde est en acier inoxydable («stainless steel»).

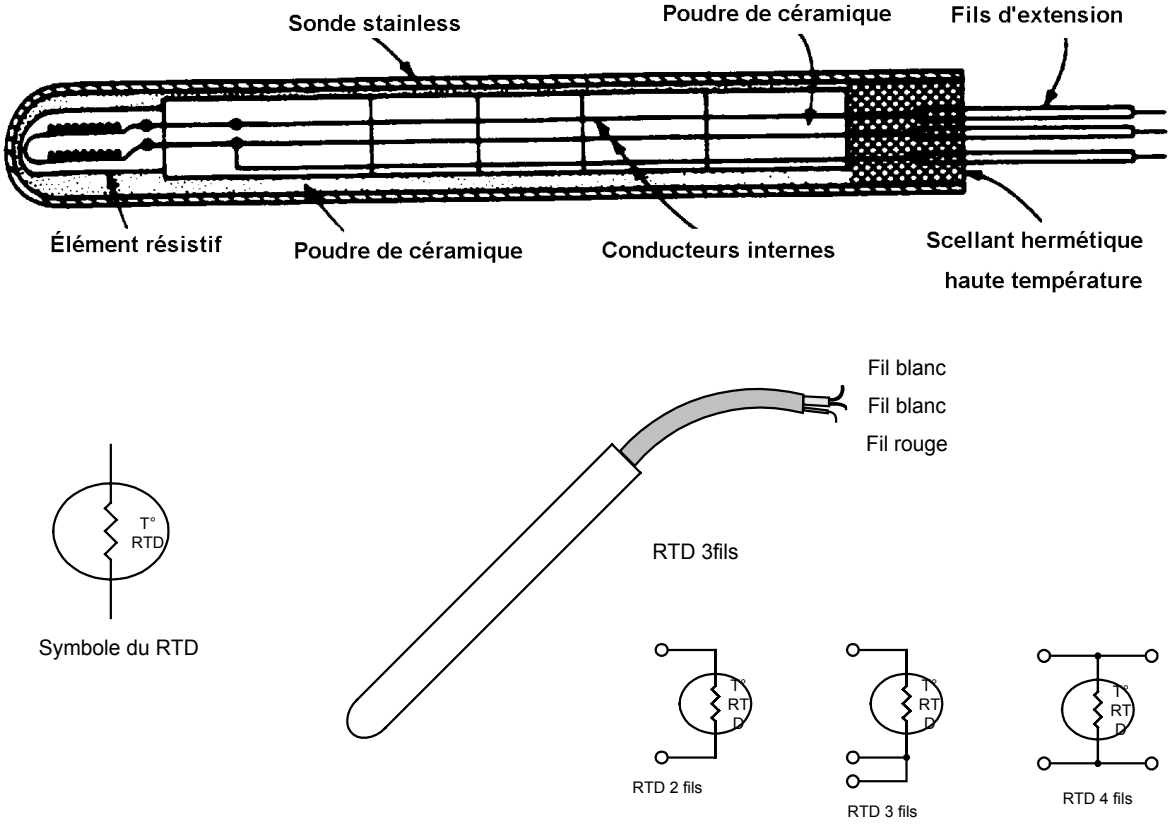


Figure 5-62 : Thermomètre à résistance RTD

Gracieuseté OMEGA TECHNOLOGIES co.

Le RTD est placé dans un pont de résistance de précision. Pour compenser la longueur des fils de cuivre dont le coefficient de température est supérieur au platine et qui influencerait la mesure, on utilise un RTD trois fils.

Pour éviter l'imprécision de la fonction de transfert du pont résistif et rendre l'influence des longueurs de fil négligeable, on utilise aussi le RTD à quatre fils alimentés par une source de courant. La 63 illustre divers circuits de branchement du RTD.

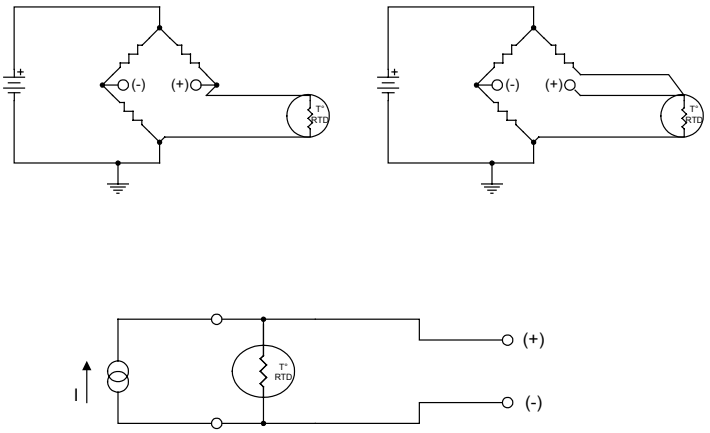


Figure 5-63 : Branchement du RTD

a) RTD 2 fils

b) RTD 3 fils

c) RTD 4 fils

La valeur de la résistance équivalente du RTD peut être calculée approximativement à l'aide de la formule empirique suivante (Équation 0-3):

$$R_{tx} = R_{0^oC}\left(1 + \alpha t_x\right)$$

Équation 0-3 : Calcul de la valeur résistive à une température donnée

où R_{tx} = la valeur de la résistance pour une température t_x donnée;

$R_{0\,°C}$ = la valeur de référence du RTD à 0°C;

α = la valeur du coefficient de température du matériau (Ω/°C).

Le Tableau 5-1 fournit le coefficient de température pour les principaux matériaux utilisés pour la fabrication d'un RTD.

Tableau 5-1

Matériau	Coefficient de température	Plage d'utilisation
Cuivre	0,00600(Ω/°C).	-40°C à +150°C
Nickel	0,00393(Ω/°C).	-150°C à +300°C
Platine	0,00385(Ω/°C).	-180°C à +650°C

Par exemple, à l'aide de la formule empirique, calculez la valeur d'un RTD platine 100Ω pour une température de 200°C.

$t_x = 200°C$; $R_{0°C} = 100\Omega$; $\alpha = 0{,}00385$

alors, à l'aide de la formule empirique, nous évaluons que le RTD vaudra 177,00Ω.

Le RTD n'étant pas parfaitement linéaire (environ 0,1% d'imprécision), il est difficile d'estimer précisément la valeur du RTD pour une température donnée avec une formule. Pour une meilleure estimation de la valeur du RTD à différentes températures, référez-vous à des tableaux de référence comme le Tableau 5-2 fourni par les fabricants de RTD.

Tableau 5-2 : Température et résistance pour RTD platine 100Ω

Temp. °C	R(Ω)	Temp. °C	R(Ω)	Temp. °C	R(Ω)
-150	39,65	0	100,00	150	157,32
-140	43,80	10	103,90	160	161,04
-130	47,93	20	107,79	170	164,76
-120	52,04	30	111,67	180	168,47
-110	56,13	40	115,54	190	172,16
-100	60.20	50	119,40	200	175,84
-90	64,25	60	123,24	210	179,51
-80	68,28	70	127,07	220	183,17
-70	72,29	80	130,89	230	186,82
-60	76,28	90	134,70	240	190,46
-50	80,25	100	138,50	250	194,08
-40	84,21	110	142,28	260	197,70
-30	88,17	120	146,06	270	201,30
-20	92,13	130	149,82	280	204,88
-10	96,07	140	153,57	290	208,46

Nous pouvons évaluer la sensibilité du RTD entre une température de 0,0°C et 100°C de la façon suivante:

$$\text{la sensibilité d'un RTD pt 100} = \frac{138{,}50\Omega - 100\Omega}{100^{o}C - 0{,}0^{o}C} = 0{,}385\Omega/^{o}C$$

Référez-vous aux circuits d'applications pour analyser les circuits.

Sondes Pt 100 avec câble de raccordement

Prosensor

- Sondes Pt 100 en céramique DIN IEC 751 Classe B, en montage 3 fils.
- Gaine de protection en acier inox 316L.
- Câble PTFE-silicone.
- Sortie protégée par ressort de courbure.

Spécifications techniques
Température d'utilisation: -50°C à +200°C
Tolérance: ±(0,3 + 0,005 T)°C
Diamètre de la gaine: 6 mm
Longueur de câble: 3 m
Longueur utile : 100 mm

Figure 5-64

5.5.2.3.Les thermocouples

Figure 5-65

En 1826 Thomas, J. Seebeck observe que, lorsque deux conducteurs de matériaux différents, sont reliés ensemble et que leurs points de jonction sont maintenus à des températures différentes, une force électromotrice est développée. Le thermocouple est constitué par deux fils de métaux différents réunis à une extrémité. Cette jonction est appelée « soudure chaude ». L'autre extrémité, appelée « soudure froide », est utilisée comme référence. Lorsque chauffée, une tension proportionnelle à la différence de température entre la soudure chaude et la soudure froide est générée (Figure 5-). Les tensions disponibles à la sortie du thermocouple sont de l'ordre du millivolt.

Si la température de référence (jonction froide) est maintenue constante, la variation de la tension de sortie dépendra uniquement de la température à la jonction chaude.

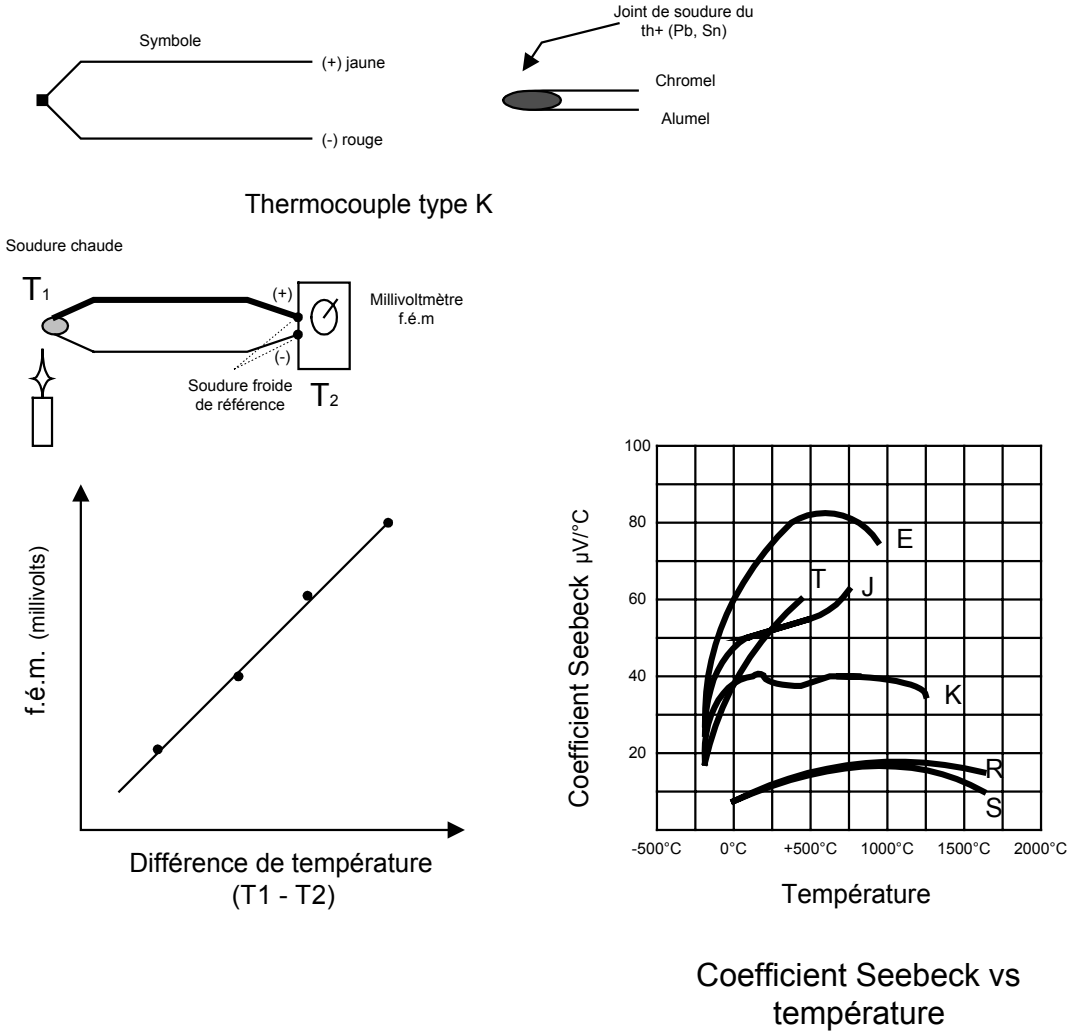


Figure 5-66 : Le thermocouple: symboles et principes

Pour obtenir une tension de sortie exempte des fluctuations de la température ambiante, la jonction froide (référence) est maintenue artificiellement stable. Plusieurs techniques sont utilisées par les manufacturiers pour compenser la variation de la température ambiante. Citons quelques exemples:

- maintien de la température de référence (jonction froide) à 0°C;
- maintien de la température de référence (jonction froide) à la température ambiante;
- compensation thermique de la tension de sortie en fonction des fluctuations de la température ambiante.

Toutes ces techniques donnent la même conclusion: obtenir une tension de sortie proportionnelle à la température mesurée à la jonction chaude.

Pour calibrer le circuit, référez-vous à la procédure fournie par le manufacturier. Certains appareils doivent être ajustés pour une jonction chaude à la température ambiante, d'autres appareils doivent être ajustés pour une jonction chaude à la température de 0°C.

Le thermocouple est souvent enfermé dans un tube protecteur. La Figure 05-67 illustre quelques boîtiers protecteurs.

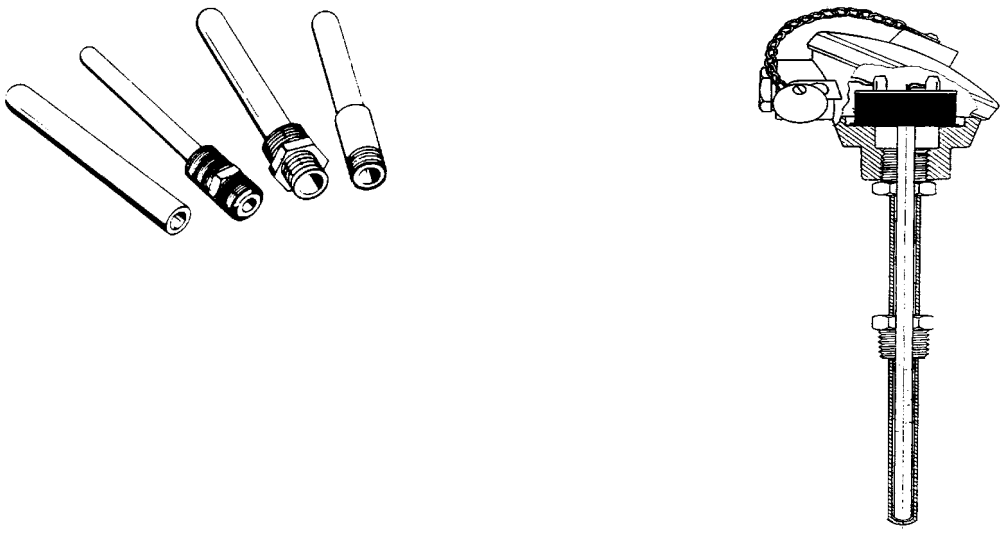


Figure 05-67 : Exemple de boîtier protecteur de thermocouple

Gracisuseté BRIAN CONTROLS

Pour pouvoir mesurer des plages de température de plus en plus grandes avec le plus de précision possible, plusieurs combinaisons de matériaux différents ont été expérimentées. Ces combinaisons multiples ont donné des types de thermocouples différents.

Les manufacturiers ont convenu d'un standard pour la couleur de la gaine protectrice des deux conducteurs du thermocouple. Le côté (-) sera toujours rouge, l'autre côté sera d'une couleur qui identifiera le type de thermocouple.

Les caractéristiques de sensibilité (coefficient Seebeck) des thermocouples ne sont pas linéaires sur l'étendue de mesure dévolue au thermocouple. Il faut minimiser l'étendue de mesure sur une courte section de l'étendue de mesure pour obtenir des fonctions de transfert linéaires. Référez-vous au Tableau 5-4 pour connaître les principales caractéristiques des différents types de thermocouples.

Tableau 5-3 NATURE DES CONDUCTEURS ET NORMES

SYMBOLE	NATURE DU THERMOCOUPLE	POLARITES	COULEURS	TEMPERATUREAPPROXIMATIVES
T	CUIVRE CONSTANTAN	+ -	JAUNE-BLEU	40 à 350 C°
J	FER CONSTANTAN	+ -	JAUNE-NOIR	- 40 à 750 C°
K	NICKEL-CHROME NICKEL-ALLIE	+ -	JAUNE-VIOLET	- 40 à 1000 C°
E	NICKEL-CHROME CONSTANTAN	+ -	JAUNE-ORANGE	- 40 à 900 C°
R	PLATINE RHODIE 13 % PLATINE	+ -	JAUNE-VERT	0 à 1600 C°
S	PLATINE RHODIE 10 % PLATINE	+ -	JAUNE-VERT	0 à 1600 C°
B	PLATINE RHODIE 30 % PLATINE RHODIE 6 %	+ -	JAUNE-GRIS	600 à 1700 C°

Tableau 5-4 : Principaux types de thermocouples et leurs limites d'emploi

Thermocouples	Plage de température	Sensibilité mV/°C	Précision	Coefficient Seebeck moyen	Couleur des conducteurs	Distinctions
Type T Cuivre/Constantin (diamètre 1,63mm)	-270°C à 370°C	0,016 à 0,06	± 2% de -100°C à -40°C ± 0,8% de -40°C à +100°C ± 0,75% de +100°C à +350°C	40 µV/°C	Bleu (+) Rouge (-) Rallonge: bleue	Résistant à l'humidité Linéarité: bonne Plage recommandée: -200 à +400
Type J Fer/Constantin (diamètre 3,25mm)	-210°C à 800°C	0,03 à 0,06	± 3% de 0°C à +400°C ± 0,75% de +400°C à +800°C	51 µV/°C	Blanc(+) Rouge (-) Rallonge: noire	Peu coûteux Linéarité: excellente Plage recommandée: -200 à +800
Type K Chromel/Alumel (diamètre 3,25m)	-270°C à 1250°C	0,018 à 0,04	± 3% de 0°C à +400°C ± 0,75% de +400°C à +1200°C	40 µV/°C	Jaune(+) Rouge (-) Rallonge: jaune	Meilleure linéarité Linéarité: excellente Plage recommandée: -200 à +1400
Type E Chromel/Constantin (diamètre 3,25mm)	-270°C à 870°C	0,03 à 0.08	± 3% de 0°C à +400°C ± 0,75% de +400°C à +1250°C	62 µV/°C	Violet(+) Rouge (-) Rallonge: violet	Meilleure linéarité Linéarité: bonne Plage recommandée: -200 à +1000
Type S Platine-Rhodium(10%) /Platine (diamètre 0,51mm)	-50°C à 1500°C	0,005 à 0,012	± 2,5% de 0°C à +600°C ± 0,4% de +600°C à +1600°C	7µV/°C	Noir(+) Rouge (-) Rallonge: verte	Réponse rapide Linéarité: bonne en haut de +500 Plage recommandée: -50 à +1500
Type R Platine-Rhodium(13%) /Platine (diamètre 0,51mm)	-50°C à 1500°C	0.005 à 0.014	± 1,4% de 0°C à +538°C ± 0,25% de +538°C à +1500°C (3)	7µV/°C	Noir(+) Rouge (-) Rallonge: verte	Réponse rapide Linéarité: bonne en haut de +500 Plage recommandée: -50 à +1600

Évaluer la tension de sortie (f.é.m.) du thermocouple est très complexe. Il faut faire appel à une conversion par série polynomiale dont les coefficients sont disponibles dans les catalogues des manufacturiers.

Nous vous recommandons d'utiliser plutôt les tableaux de conversion fournis par le manufacturier à l'achat d'un thermocouple, pour évaluer approximativement la force électromotrice du thermocouple à une température donnée.

Le montage en série de thermocouple permet de mesurer des différences de température (température différentielle), et le montage de thermocouple en parallèle permet de mesurer une température moyenne (Figure 5-).

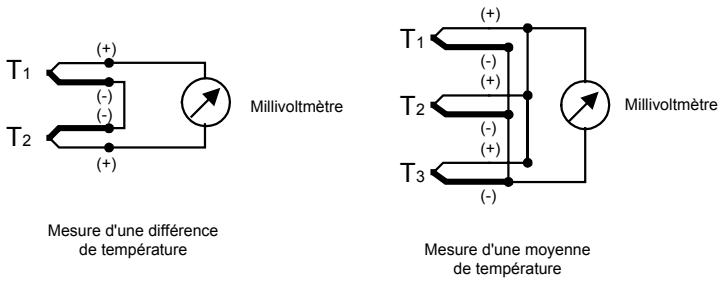


Figure 5-68 : Thermocouple en série et en parallèle

En résumé, l'utilisation d'un thermocouple pour la mesure de température en industrie est un capteur privilégié à cause de son faible coût, de sa grande plage de mesure et de sa versatilité.

Voici quelques conseils supplémentaires pour une utilisation adéquate:

1. Lorsque vous utilisez de longs fils de raccordement, choisissez du fil à paire torsadé.
2. Utilisez une rallonge de même type (matériau) que le thermocouple choisi et de diamètre le plus gros possible.
3. Évitez d'exposer les rallonges à des changements de température trop brusques.
4. Évitez toute tension (pression) mécanique ainsi que toute vibration au niveau du thermocouple.
5. Choisissez toujours le bon thermocouple en fonction de la plage de mesure.

Référez-vous aux circuits d'applications pour faire l'étude d'un circuit de mesure de température à l'aide d'un thermocouple.

5.5.3. Systèmes de mesure optique:

5.5.3.1 Thermomètres à rayonnement

Le principe de fonctionnement des thermomètres à rayonnement, découlant de la pyrométrie, est le suivant. Les corps émettent de l'énergie sous forme radiante lorsqu'ils sont chauds. La quantité d'énergie irradiée est proportionnelle à la température de ces corps.

Ces appareils sont très dispendieux et peu précis. Ils peuvent effectuer des mesures jusqu'à 50 mètres de distance avec une précision inférieure respectable. La gamme de mesure est très haute, soit de +200°C à +2500°C.

Les caractéristiques de ces appareils évoluent considérablement.

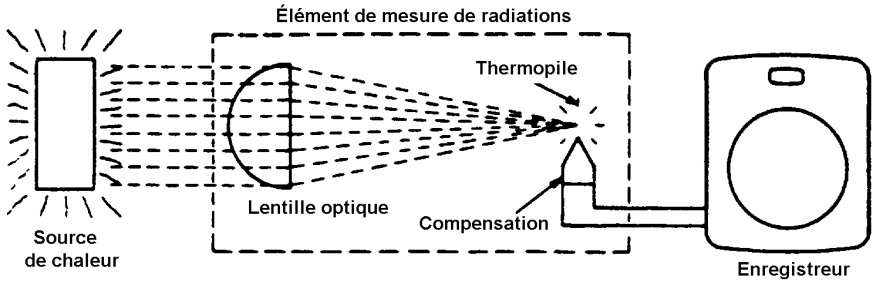


Figure 5-69 : Thermomètre mesurant les radiations

5.5.3.2.Les thermomètres optiques

Le principe de fonctionnement des thermomètres optiques, découlant aussi de la pyrométrie, est le suivant. La fréquence de l'énergie radiante varie avec la température, cela explique pourquoi la couleur des métaux chauffés passe du rouge au jaune. La longueur d'onde du signal reçu indique la température du corps.

Comme nous l'avons spécifié précédemment, la couleur des métaux en fusion change avec la température; le thermomètre optique mesure la température d'un métal en comparant la couleur de ce métal à celle d'un fil chauffé. Le courant dans le fil chauffé devient une indication de la température du métal.

Ces appareils aussi sont très dispendieux et en développement en ce moment. La gamme de mesure est très haute, soit de +200°C à +2500°C.

5.6. MESURE DE POIDS ET DE DÉFORMATION

5.6.1 Jauges de contrainte

Les jauges de contrainte servent à mesurer les très petites variations de dimension qui se produisent lorsqu'une structure est soumise à une force, une traction ou un couple. Elles peuvent servir également comme capteurs de pression ou comme capteurs de poids dans une géométrie de cellule de charge.

Une jauge de contrainte est composée essentiellement d'un papier mince, plus petit qu'un timbre-poste, sur lequel est collée, en zigzag, une longueur de fil résistant mince (Figure 5-70). Les extrémités de ce fil sont reliées à deux bandes de connexions.

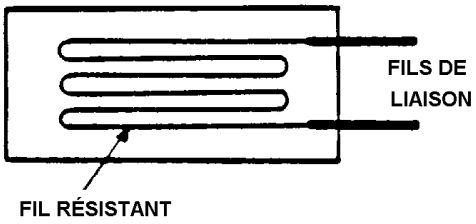


Figure 5-70 : Jauge de contrainte à fil résistant

La jauge de contrainte doit être collée le plus près possible sur la surface en déformation. Sous l'action de cette déformation, la jauge subit une variation de longueur, donc de résistance, proportionnelle au déplacement. Le collage doit être parfait pour que la jauge suive exactement l'allongement du support. On peut les retrouver sous diverses formes selon la contrainte mesurée. La Figure 71 illustre des exemples: les trois premières formes permettent d'effectuer la mesure de torsion; et la dernière, en forme de spirale, sert pour la mesure de pression.

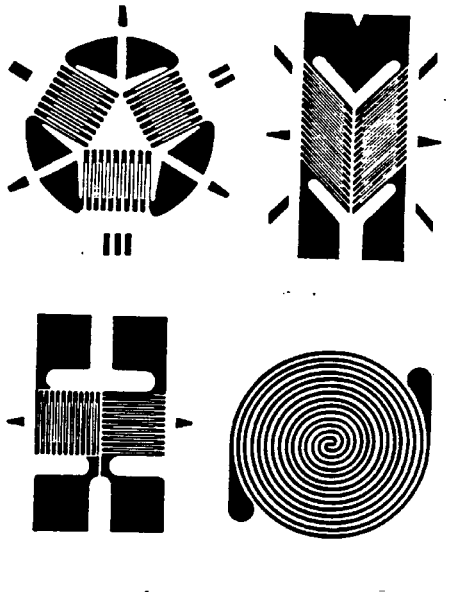


Figure 5-71 : Formes diverses de jauges de contrainte

Gracieuseté OMEGA TECHNOLOGIES co.

Les variations de résistances étant généralement inférieures à 1%, des variations aussi faibles de résistance ne sont mesurables qu'avec un pont de Wheatstone.

Quand une jauge subit un allongement longitudinal sous l'effet d'une force, on dit qu'elle est active et elle est dite passive quand elle subit une contraction ou un allongement transversal sous l'effet de la même force. Suivant l'Équation 5-1 et l'Équation 5-2, la variation la plus importante de la résistance se retrouve lors d'une variation de la longueur du fil de résistance, donc à la jauge active.

L : longueur et A : aire

$$R(\Omega) = \frac{\rho L}{A}$$

Équation 5-1 : Calcul de la résistance équivalente

$$\frac{\Delta R}{R} = K\frac{\Delta L}{L}$$

Équation 5-2 : Variation de la résistance en fonction de l'allongement

La constante K dépend du matériau utilisé pour fabriquer la jauge.

Pour les structures géométriques complexes, des jauges supplémentaires sont placées à des endroits stratégiques pour assurer une compensation en température adéquate au niveau du circuit en pont.

Dans certaines applications, comme à la Figure 05-72, il est nécessaire d'utiliser simultanément plusieurs jauges actives pour améliorer la sensibilité, J1 et J4 en sont un exemple. On élimine l'effet de la variation de température en montant, sur la même structure, une jauge passive de compensation J2. Dans l'exemple illustré, la jauge J1 est active puisqu'elle subit un allongement longitudinal, tandis que la jauge J2 est passive puisqu'elle subit un allongement transversal qui ne modifie pas sa valeur.

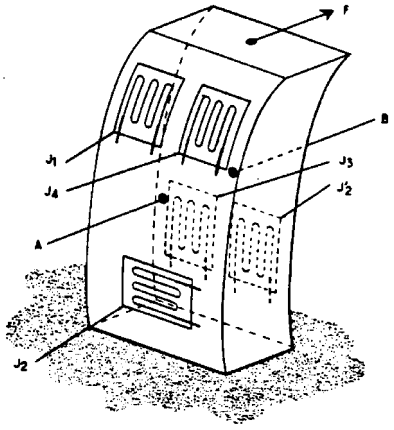


Figure 05-72 : Structure géométrique pour la mesure d'une force

5.6.2.La cellule de charge

La cellule de charge, « load cell » en anglais, utilisée pour la mesure de poids à l'aide d'une balance électronique, utilise une structure semblable à celle présentée à la Figure 05-72. Des jauges de contraintes collées sur une structure géométrique nous informe électriquement de la déformation qu'elle subit sous l'influence d'une force.

Les jauges sont reliées électriquement entre elles, selon une combinaison donnant un pont de Wheatstone. Des éléments résistifs sont placés dans le circuit pour assurer l'équilibrage du pont et ajuster la sensibilité. La caractéristique de sensibilité d'une cellule de charge est fournie en millivolts par volt d'alimentation du pont. Elle est de l'ordre de 1 à 5 mV/V.

La cellule de charge doit être alimentée selon les caractéristiques du manufacturier. Son utilisation doit respecter la capacité de la cellule, sinon on pourrait endommager la structure de façon permanente.

Sur une paire de fils en sortie, on recueille un signal en mode différentiel de l'ordre de quelques millivolts lorsque soumis à une force. Ce signal devra être traité par un amplificateur d'instrumentation.

5.7.Les capteurs à effet Hall

5.7.1. RAPPEL DU PRINCIPE DE L'EFFET HALL:

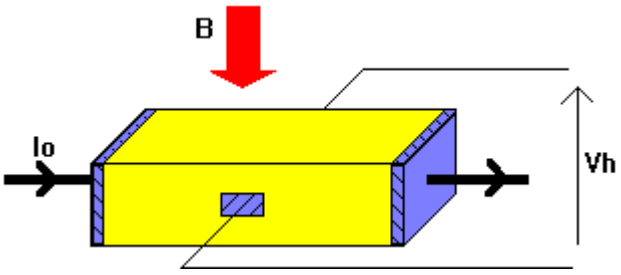


Figure 5-73

Si un courant Io traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si un champ magnétique d'induction B est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension Vh, proportionnelle au champ magnétique et au courant Io, apparaît sur les faces latérales du barreau. C'est la tension de Hall (du nom de celui qui remarqua le phénomène en 1879).

Vh = Kh * B * Io avec Kh: constante de Hall, qui dépend du matériau utilisé.

5.7.2.CAUSES DE L'EFFET HALL:

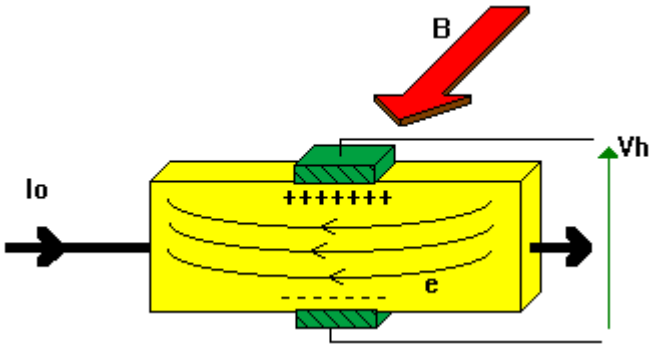


Figure 5-74

Les électrons sont déviés par le champ magnétique, créant une différence de potentiel appelée tension de Hall.

5.7.3. Applications

Les applications les plus courantes sont la détection (absence ou présence) d'un champ magnétique par commutation de la sortie ou pour la détection de fin de course. La détection du déplacement ou de la position d'un élément ferromagnétique résulte en commutation de sortie.

Le TIL 170, avec sortie à collecteur ouvert, en est un exemple typique. Ce dernier, lorsque soumis à un champ magnétique supérieur à 25mTesla, commute sa sortie.

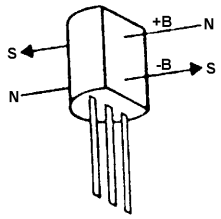


Figure 5-75 : Principe d'un capteur à effet Hall

On peut trouver aussi des capteurs à effet Hall dont la fonction de transfert de tension de sortie est proportionnelle au champ magnétique détecté.

Les avantages des détecteurs à effet Hall sont les suivants:

- grande vitesse de commutation (jusqu'à 100kHz;
- pas de rebondissement mécanique;
- pas de détérioration des contacts;
- résistant à la corrosion;
- la sensibilité est assez grande, un faible champ magnétique (moins de 10mTesla) peut les actionner.

5.8.Les capteurs de vitesse de rotation

La Figure 5-76 illustre trois techniques de mesure de vitesse de rotation. En A, un générateur à courant continu sert de capteur de vitesse. Un générateur à courant continu est couplé mécaniquement à l'arbre du moteur dont nous voulons connaître la vitesse. Une tension continue, mesurée à la sortie du générateur, est directement proportionnelle à la vitesse de rotation.

En B, l'arbre tournant entraîne une roue dentelée en matériel ferromagnétique. Les dents de la roue influencent la réluctance d'un capteur magnétique qui réagit aux absences et aux présences successives du métal. Il suffit de mesurer la fréquence des variations d'inductance pour la traduire en tension proportionnelle.

En C, un détecteur optoélectronique utilise un disque transparent dont la périphérie est recouverte d'un fin réseau de barres noires opaques. D'un côté du coupleur, on retrouve une diode émettrice, et de l'autre côté, un photodarlington. Lorsque les barres fines coupent le faisceau, il en résulte un signal de fréquence que nous traduisons en tension proportionnelle à l'aide d'un convertisseur fréquence - tension.

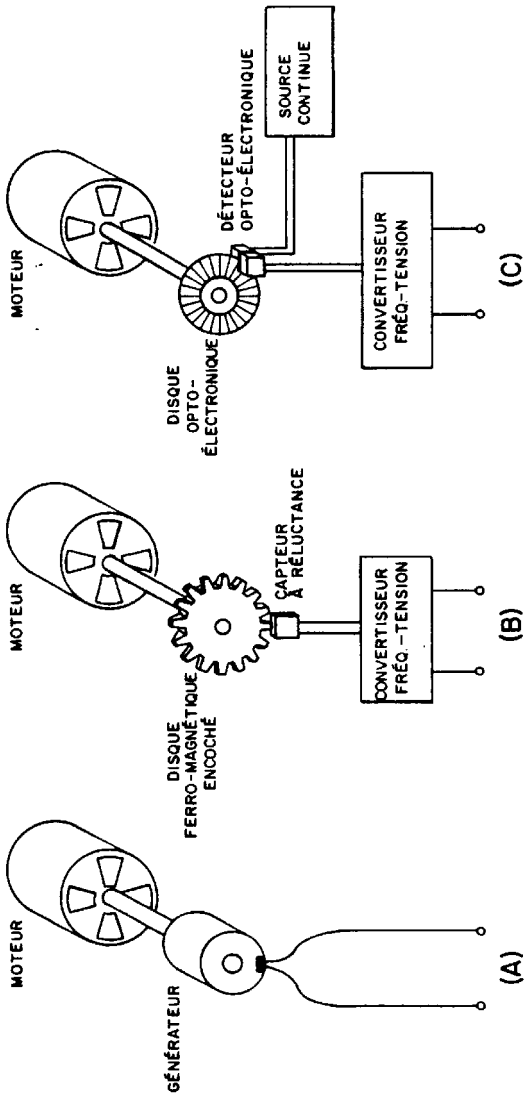
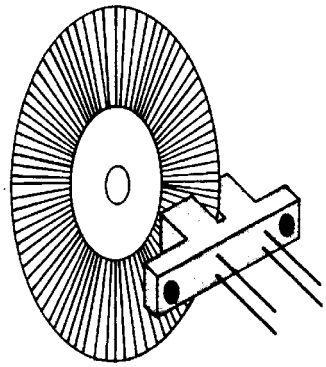
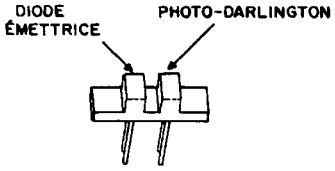


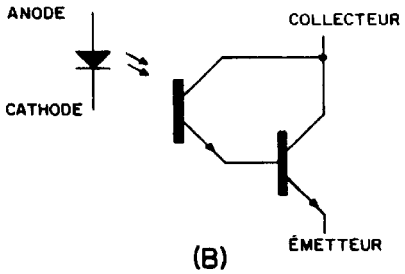
Figure 5-76 : Trois techniques de mesure de la vitesse de rotation

Gracieuseté OMRON co.




DIODE
ÉMETTRICE
PHOTO-DARLINGTON

(A)


ANODE
CATHODE
COLLECTEUR
ÉMETTEUR

(B)

6. Définition du procédé

À première vue, le travail d'un système asservi peut sembler assez simple. Ce système agit de façon à maintenir une grandeur physique conforme à une valeur de consigne. Pour y parvenir, il doit être sensible à toute cause de changement et être en mesure d'apporter la correction adéquate. Puisqu'une erreur est nécessaire pour déclencher une correction, la qualité d'un système asservi est donc proportionnelle à sa capacité de minimiser cette erreur.

Par contre, dans la réalité, le problème s'avère plus complexe que cela. Il existe un certain nombre de facteurs physiques dont il faut prendre conscience, et dont la conséquence globale est de limiter l'efficacité du système de commande, voire même de le rendre instable. Il est aisé de constater comment il est difficile de contrôler une voiture lorsqu'un vent latéral souffle par rafales. Même un système asservi, qui est pourtant un système en boucle fermée, peut être sérieusement affecté par des perturbations et sa correction peut même devenir imparfaite dans certaines conditions. La présente section a pour but d'analyser toute cette problématique.

6.1 Causes de modification de l'équilibre du procédé

Parmi les principales causes influençant directement l'équilibre d'un procédé, on dénote:

- les délais (dans le procédé et dans la commande);
- la variation de la consigne;
- la variation de la charge (variation de la demande - « demand disturbance »);
- les perturbations et le bruit;
- une variation à la source - « supply disturbance ».

Tous ces changements obligent le système asservi à réagir pour préserver la condition d'équilibre. Cette réaction se traduit nécessairement par une modification de la variable manipulée qui, rappelons-le, nous informe de l'importance de la charge du système.

La présente section détaille ces multiples causes à l'exception de la variation à la source, puisque celle-ci se définie simplement par une variation physique de la variable manipulée Voici quelques exemples concrets d'une variation à la source:

- une variation de la tension de ligne qui affecterait la vitesse d'un moteur;
- une variation de la température du fluide chauffant dans un échangeur de chaleur;
- une variation de l'indice d'octane de l'essence fournie à un moteur.

6.1.1. Les délais

Quant aux délais, ils sont d'importants facteurs affectant la réponse d'un système asservi lorsque des perturbations tendent à modifier l'état d'équilibre dans lequel le procédé se trouve. Il existe deux familles de délais:

- les délais dans le procédé;
- les délais dans la commande.

Tout d'abord, analysons **les délais dans le procédé**. Ils sont les conséquences de l'utilisation d'une multitude de composants, dont chacun possède des caractéristiques physiques qui peuvent retarder considérablement la réponse d'un système asservi aux perturbations. Dans un procédé industriel, on retrouve habituellement les sources de délais suivantes:

- la capacité;
- la résistance;
- les systèmes d'ordre supérieur;
- le temps de délai du procédé.

Afin de présenter ces différentes sources de délais, nous allons considérer un cas spécifique, celui de l'échangeur de chaleur illustré à la Figure 06-1. Ce modèle-ci diffère quelque peu de l'échangeur tubulaire mais son principe est le même. Le système détecte les changements de température grâce à un capteur thermique collé sur la paroi du tuyau de sortie; la correction a lieu en modifiant la position de la valve qui règle le débit de vapeur dans le serpentin.

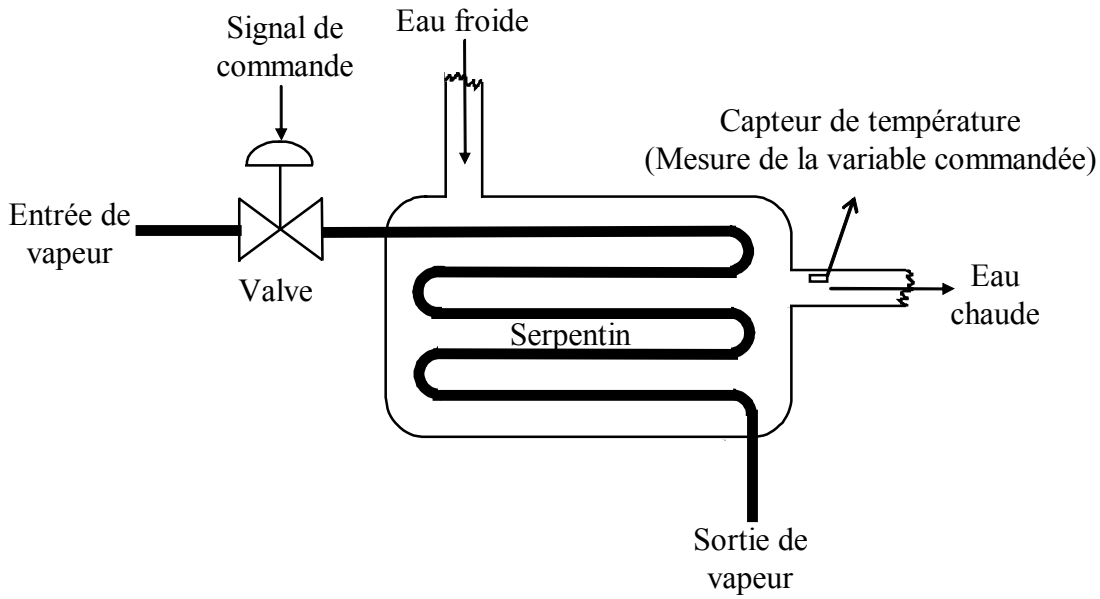


Figure 06-1 Échangeur de chaleur typique

Les procédés, comme celui illustré à la Figure 06-1, possèdent tous la propriété inhérente de retarder les effets résultant de perturbations. C'est justement cette propriété qui complique la commande. Identifions la nature de ces sources de retard.

La capacité est représentée par tout système qui emmagasine de l'énergie. Ainsi, la masse d'eau contenue dans l'échangeur est capable d'emmagasiner une quantité d'énergie thermique tout comme le condensateur emmagasine de l'énergie électrique. Nous savons cependant qu'une capacité est caractérisée par le fait qu'elle ne se charge pas instantanément; un temps de charge est toujours requis. En l'occurrence, si le débit de vapeur augmente dans le serpentin, il faudra un certain temps à la masse d'eau pour atteindre une nouvelle température plus élevée. Ce temps de charge est proportionnel au volume de liquide à chauffer.

La résistance est le facteur qui s'oppose au transfert d'énergie dans un système. Il est possible de faire une analogie parfaite avec la résistance d'un circuit RC qui s'oppose à la charge ou à la décharge d'un condensateur. En effet, plus un système oppose de la résistance à l'accumulation ou à la restitution d'énergie, plus il mettra de temps à atteindre la charge voulue.

Dans notre échangeur, la résistance au transfert d'énergie thermique provient de l'existence d'un film isolant qui se forme toujours entre un corps solide et un fluide en contact. Ce film consiste

en une mince couche stagnante de fluide qui recouvre le corps solide et l'isole thermiquement comme le ferait un recouvrement de caoutchouc mousse. L'effet d'isolation dû à ce phénomène physique s'oppose au transfert thermique.

L'effet combiné de la résistance au transfert thermique et de la capacité de la masse de liquide engendre un délai plus ou moins considérable entre l'application d'une quantité de chaleur et le réchauffement général de la masse de liquide.

Pour le traitement mathématique, on a l'habitude de représenter les procédés par leurs équivalents électriques. Ainsi, le système d'échangeur thermique pourrait équivaloir, en première approximation, au circuit de la Figure 06-2. Nous n'insisterons cependant pas trop sur cette représentation.

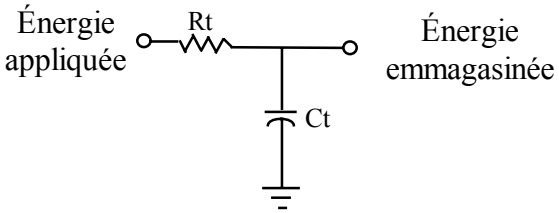


Figure 06-2 Équivalent électrique simplifié de l'échangeur de chaleur

Les systèmes d'ordre supérieur (les procédés multicapacitifs et multirésistifs) peuvent être comparés à un schéma électrique composé d'une suite de circuits RC consécutifs. Afin de poursuivre l'analogie avec l'échangeur de chaleur, il faut ainsi tenir compte de la capacité thermique du serpentin lui-même, dont la masse doit absorber la chaleur avant de la transférer au liquide, et d'une seconde résistance de transfert. On se retrouve donc devant un système à deux cellules RC (système d'ordre deux).

Par ailleurs, les parois du réservoir, à moins d'être très bien isolées, sont refroidies par l'air ambiant et refroidissent donc eux-mêmes le liquide. Cette fuite thermique, par laquelle l'énergie accumulée par la masse de liquide se perd, équivaut à une résistance de décharge. Ces éléments supplémentaires nous amènent à un schéma équivalent plus réaliste que montre la Figure 6-3. Dans ce schéma, on voit que l'énergie appliquée est d'abord transférée à C_{T1} via R_{T1}, c'est-à-dire à la vapeur du serpentin, lequel la retransfère à C_{T2} via R_{T2}, c'est-à-dire à la masse de liquide. Cependant, une partie de l'énergie accumulée dans C_{T2} se dissipe dans R_{T3} qui représente la perte dans la paroi du réservoir.

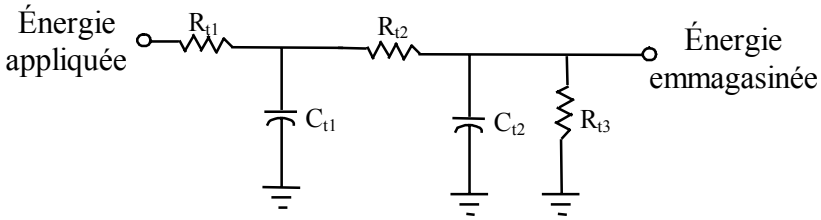


Figure 6-3 Équivalent électrique amélioré de l'échangeur de chaleur

Le temps de délai du procédé, « dead time », est une autre importante cause de retard dans le procédé et c'est le temps requis pour qu'une modification se transporte d'un point à l'autre. La conséquence directe de ce retard est qu'un changement de la variable commandée n'est pas détecté immédiatement par le capteur. Ainsi, supposons que la température de l'eau injectée dans l'échangeur baisse de plusieurs degrés. Cette diminution devrait être compensée immédiatement

par le contrôleur. Cependant, le contrôleur n'a connaissance du changement que lorsque la masse d'eau plus froide a traversé le réservoir et s'est rendue au capteur. Ce retard, ou temps de délai, dépend de la vélocité du fluide et de la distance à parcourir.

Maintenant, analysons **les délais dans la commande**. Ils sont les conséquences de l'utilisation d'une multitude de composants, dont chacun possède un temps de réponse bien spécifique. Donc, les caractéristiques intrinsèques de ces composants peuvent retarder considérablement la réponse d'un système asservi.

Plusieurs sources de retards apparaissent également dans un système asservi mais leur ampleur est généralement moindre surtout s'il s'agit d'une commande électronique. En ce qui a trait à la commande, nous retrouvons habituellement les délais suivants:

- retard de l'élément primaire;
- retard dans la détection d'erreur;
- retard de transmission;
- retard de l'élément final de commande.

Le retard de l'élément primaire est le plus important retard de cette catégorie. En effet, le capteur ne répond pas instantanément à un stimuli physique. Le capteur thermique, par exemple, équivaut thermiquement à un circuit RC qui requiert un certain temps avant d'atteindre la température du milieu qui l'entoure.

Le retard dans la détection d'erreur est plutôt faible. On peut considérer les retards de nature capacitive comme très négligeables dans les contrôleurs pneumatiques et électroniques, comparativement aux phénomènes rencontrés dans le procédé même.

Le retard de transmission, à toute fin pratique, ne s'applique qu'aux systèmes pneumatiques (lignes 3-15 psi). Ces lignes ne doivent pas s'allonger indûment car le retard de transmission est proportionnel à la distance.

Le retard de l'élément final de commande est simplement relié au fait que la réponse d'un élément final n'est pas instantanée. Selon le cas, des retards peuvent être causés par l'inertie au mouvement, la friction mécanique, le transfert d'énergie (délai capacitif) ou par un temps de délai.

La valve pneumatique, par exemple, oppose une friction mécanique (ou résistance mécanique) qui retarde son déplacement et provoque, à la limite, un déplacement par à-coups très néfaste pour la stabilité du système. Une lubrification périodique est d'ailleurs recommandée dans certains cas. Le moteur, quant à lui, ne modifie pas sa vitesse instantanément en raison de son inertie. L'élément chauffant réagit à peu près comme le serpentin à vapeur: il ne chauffe pas instantanément et demeure chaud un certain laps de temps après qu'on cesse de l'alimenter en tension.

À la suite de l'analyse des multiples retards que l'on peut retrouver dans un système asservi, il est de mise de présenter leurs conséquences sur la réponse du système lorsqu'une variation quelconque survient. L'action visant à corriger l'écart dû à une perturbation ne peut être entreprise que lorsque le contrôleur a détecté cette perturbation via la chaîne de mesure. Cette information prend un certain temps à lui parvenir (temps de délai). Dès qu'il la possède, le contrôleur génère la correction adéquate mais un délai s'ajoute encore avant que cette correction ne provoque un certain effet dans le procédé (délai capacitif). À cause de ces délais, la correction, qui limiterait ainsi la déviation à l'instant où elle prend naissance, est impossible dans

la plupart des systèmes. Par conséquent, avant que le contrôleur ne puisse enrayer cette déviation, il s'écoule toujours un certain temps durant lequel la variable commandée n'est pas conforme à la consigne. Ainsi, l'information est retardée et il est alors impossible d'anticiper les réactions du procédé pendant ce délai.

6.1.2. La variation de la consigne

Afin de bien maîtriser l'effet de ces variations sur l'équilibre du procédé, nous allons poursuivre l'analyse à l'aide de notre échangeur de chaleur.

Il est aisé de constater qu'une variation de la consigne vient briser l'équilibre du procédé. En effet, on lui demande de quitter un état stable pour qu'il puisse se stabiliser à une nouvelle valeur. Il est souvent exigé que le changement d'état stable s'exécute dans le moins de temps possible et ce, sans dépasser le nouveau seuil visé. Par contre, une variation de la consigne provoque une erreur immédiate (la différence entre la consigne et la mesure) que le régulateur se doit d'éliminer. Mais, il est important de noter que la variable commandée n'est nullement affectée à ce stade du processus.

Avec l'échangeur de chaleur (Figure 06-1), la variation de consigne s'établie, dans notre cas, par la nécessité d'obtenir de l'eau plus chaude. Ainsi, le signal de commande augmente afin d'ouvrir la valve et de laisser entrer plus de vapeur dans le système. À cet instant, avant même que la température du serpentin ait débuté à réchauffer l'eau qui se dirige vers la sortie, l'erreur (la consigne - la mesure) est maximale.

Le serpentin, par la suite, est traversé par une plus grande quantité de vapeur et permet alors le réchauffement de l'eau. Bien sûr, cette correction est victime de la panoplie de délais que nous avons traitée précédemment. L'eau, qui se réchauffe lentement, tend ainsi à faire diminuer l'erreur et le signal de commande est donc modulé à la baisse. Le tout se stabilise lorsque le capteur de température retourne la mesure de la variable commandée correspondant à la nouvelle consigne.

6.1.3. La variation de la charge

Puisque la variation de la charge affecte directement la variable commandée, elle modifie donc considérablement l'état d'équilibre d'un procédé. En effet, une augmentation de la charge signifie une baisse, parfois même drastique, de la mesure de la variable commandée. Donc, l'erreur (la consigne - la mesure) est de la même polarité que l'augmentation de consigne.

Puisque la charge nominale représente la consommation du système, il est possible de déduire la valeur de la variation de la charge en considérant la variation du signal de commande. Ainsi, si une augmentation du débit de l'eau oblige la valve à s'ouvrir de 20 %, c'est que la charge a augmenté de 20 %. Mais, pour valider cette relation, il est essentiel que la mesure de la variable commandée retourne au point de consigne.

Voici, à titre indicatif, quelques exemples de variations de la charge:

- une variation de la charge mécanique couplée à un moteur;
- un flux d'air froid ou d'air chaud dans un milieu à température contrôlée;
- une variation du débit du fluide chauffé par un échangeur de chaleur.

Il s'agit, dans ce cas, de perturbations qui vont nuire au système dans son travail pour maintenir la variable commandée à la valeur de consigne. Dans le cas de notre échangeur de chaleur, une

variation de la charge consisterait soit à une variation du débit de l'eau, soit à une variation de sa température à l'entrée de l'échangeur.

Aussi, un laps de temps s'écoule avant que le régulateur ne ramène la variable commandée à sa valeur de consigne. Il faut noter que la correction ne débute qu'après le temps de délai.

6.1.4. Les perturbations et le bruit

Les perturbations sont des modifications que l'on retrouve surtout au niveau de la variable manipulée et de la charge. Elles se manifestent donc principalement à l'entrée et la sortie du procédé.

Les perturbation reliées à la variable manipulée peuvent être du type:

- pulsation d'une pompe (contrôle de niveau via un débit);
- pression du réseau de distribution;
- température;
- densité du liquide (contrôle de niveau via un débit);
- etc.

Quant aux perturbations reliées à la charge, elles peuvent être de différentes natures:

- pression de sortie;
- température;
- débit de sortie;
- densité du liquide (contrôle de niveau via un débit);
- etc.

Par contre, il existe des variations plus lentes qui affectent également le procédé:

- l'usure de la pompe;
- l'usure de la valve;
- l'accumulation de dépôts dans les conduits;
- etc.

Pour ce qui est du bruit, il est possible de le définir comme étant une perturbation constante et prévisible. Il provient habituellement d'oscillations ou de perturbations rapides.

On constate aisément que le bruit est fort indésirable car il fausse l'information qui parvient au régulateur. Ainsi, le signal de commande peut être modifié inutilement et les actions posés peuvent même être nuisibles à l'équilibre du procédé.

6.2. REPONSE DES SYSTEMES ASSERVIS

Un système asservi présente de nombreux avantages indéniables qui peuvent se manifester à plusieurs niveaux:

- augmenter la productivité;
- uniformiser la production et la qualité;
- augmenter le rendement et l'efficacité;
- favoriser la sécurité et la fiabilité de systèmes autonomes.

Pour rencontrer ces objectifs, il est nécessaire de bien modéliser le procédé et de bien connaître ses caractéristiques intrinsèques. Ainsi, il est plus aisé de prédire le comportement du procédé suite à une perturbation quelconque.

6.2.1. En boucle ouverte

Pour obtenir le meilleur compromis entre la stabilité et la précision dans un système asservi, il faut déterminer la meilleure combinaison possible des paramètres de fonctionnement du régulateur.

Pour ce faire, il faut avoir une bonne connaissance du comportement de l'ensemble suivant:

- l'élément final de commande;
- le procédé;
- l'élément de mesure.

La Figure 6-164 présente le schéma de principe d'un système asservi qui se trouve en boucle ouverte (le régulateur est alors en mode manuel).

Un système asservi, lorsqu'il est en boucle ouverte, réagit différemment à un échelon suivant le nombre de capacités qu'il possède (système du N^{ième} ordre). Ainsi, la réponse d'un système en boucle ouverte, en fonction du nombre de capacités, est présentée à la Figure 6-4.

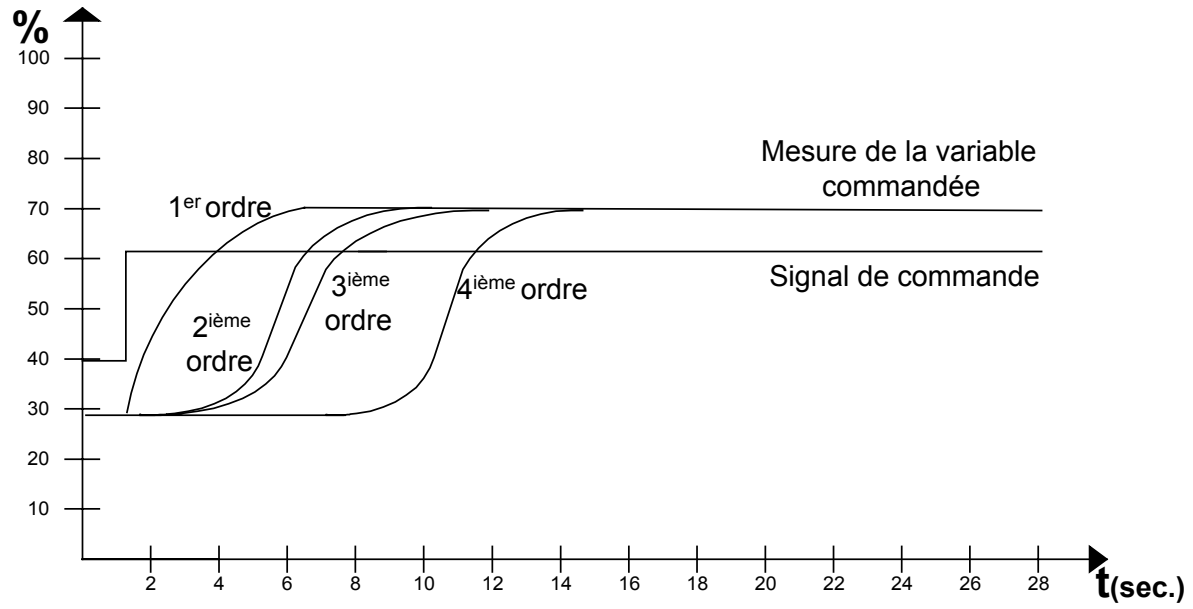


Figure 6-4 Réponse du procédé en boucle ouverte

6.2.2. En boucle fermée

Lorsque, par exemple, une augmentation de température est demandée au système, trois types de réponses peuvent se produire:

- réponse sur-amortie;
- réponse critique;
- réponse sous-amortie.

La réponse sur-amortie (Figure 6-5 et Figure 6-6) est caractéristique d'un procédé à longue constante de temps, où les capacités sont importantes, et où le régulateur n'envoie qu'une faible puissance. Dans le cas d'une commande de température, il en résulte un faible taux de transfert de chaleur et le système met du temps à se rendre à la température désirée.

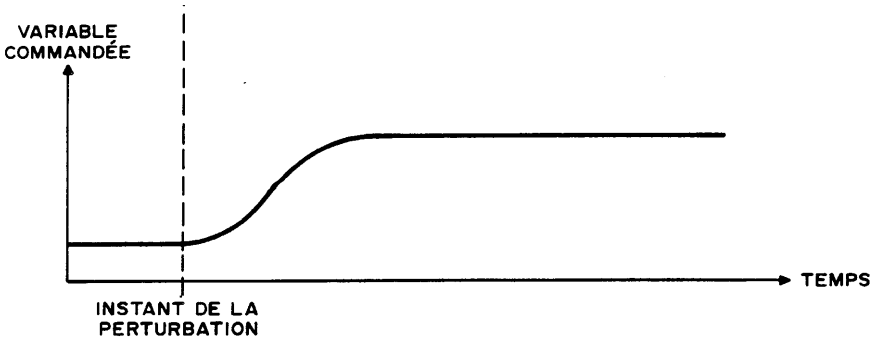


Figure 6-5 Réponse sur-amortie lors d'une variation de consigne

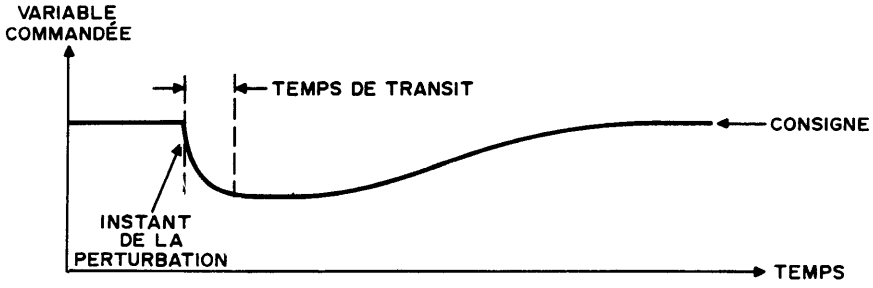


Figure 6-6 Réponse sur-amortie lors d'une variation de la charge

La réponse critique (Figure 6-7 et Figure 6-8) est obtenue via un ajustement optimal. Une augmentation du gain du contrôleur donne lieu à un plus fort signal de commande pour la même erreur, donc à un taux plus élevé de transfert de chaleur. Il s'agit de la correction la plus rapide que l'on puisse obtenir sans qu'il y ait dépassement de la valeur-cible.

Figure 6-7 Réponse critique lors d'une variation de consigne

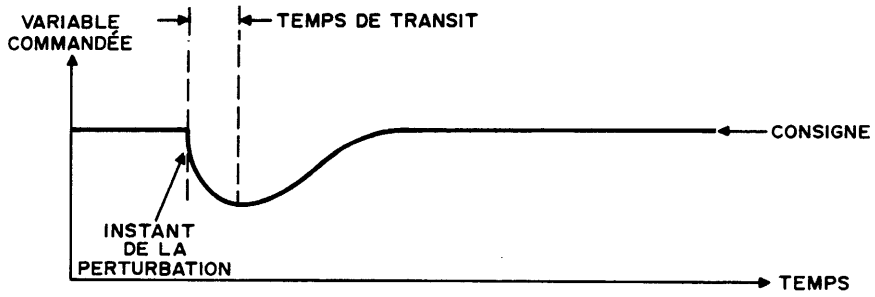


Figure 6-8 Réponse critique lors d'une variation de la charge

La réponse sous-amortie (Figure 6-9 et Figure 6-10) est un compromis entre la vitesse de correction et un dépassement acceptable. Si le gain dépasse la valeur critique, la correction devient rapide, mais la surdose d'énergie thermique provoque un dépassement de la valeur-cible. Le contrôleur devra alors corriger à nouveau, à plusieurs reprises, pour se stabiliser graduellement à la nouvelle consigne.

D'un autre point de vue, cette réponse caractérise un procédé à constante de temps courte (capacité relativement faible qui réagit vivement à la commande).

Quand le gain devient trop élevé pour un procédé à faible capacité, le système ne parvient pas à se stabiliser et la variable commandée oscille perpétuellement autour de la consigne.

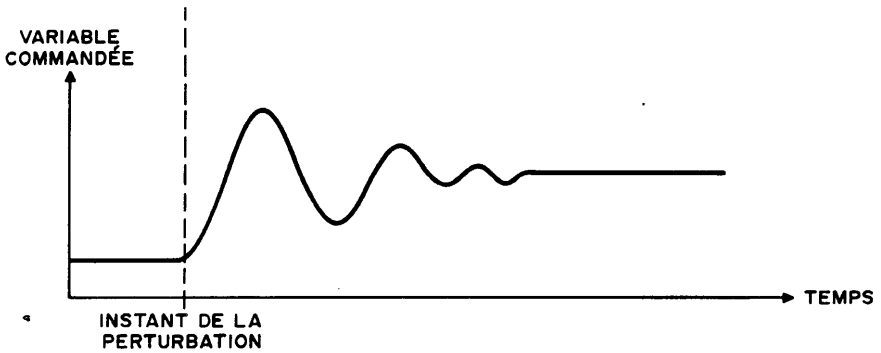


Figure 6-9 Réponse sous-amortie lors d'une variation de consigne

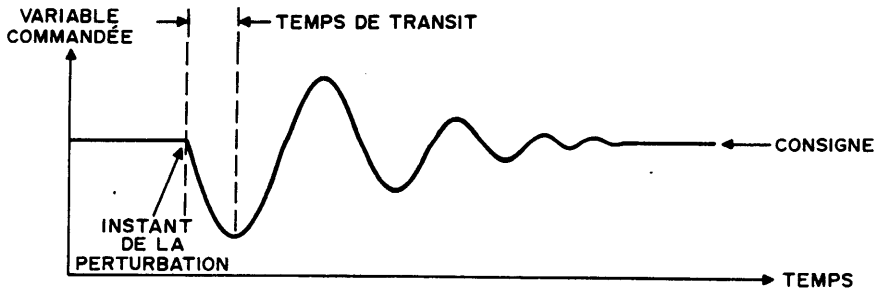


Figure 6-10 Réponse sous-amortie lors d'une variation de la charge

6.2.3. Objectifs de la régulation de procédé

Un système asservi se doit de maintenir la mesure de la variable commandée égale à la consigne et ce, malgré les perturbations, les changements de charge ou de consigne. Il est raisonnable de s'attendre à ce que des erreurs soient présentes temporairement car le système de régulation réagit aux erreurs.

Il existe trois grandes caractéristiques (Figure 6-11) que l'on peut observer lors de la réponse d'un système asservi:

- l'erreur maximale;
- le temps de rétablissement (ou d'établissement);
- l'erreur résiduelle.

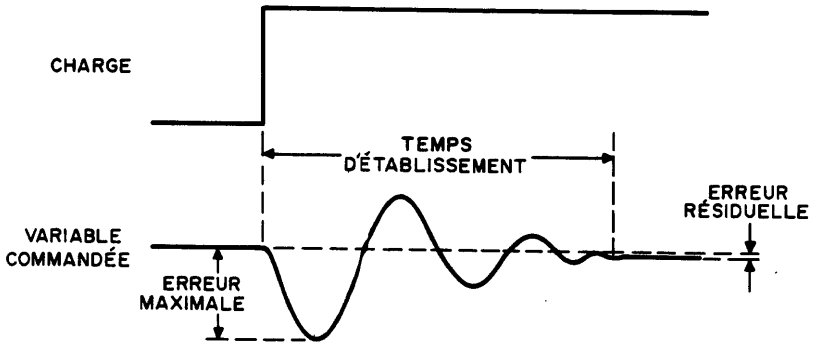


Figure 6-11 Objectifs d'un système asservi

L'erreur maximale peut se définir comme étant le plus grand écart, par rapport à la valeur désirée, à survenir à la variable commandée lors d'une perturbation quelconque. Grâce à la valeur de l'erreur maximale, il est possible de déterminer le **taux de dépassement**. Celui-ci représente la différence, en pourcentage, entre la valeur maximale de la réponse et la valeur finale sur une échelle normalisée. On obtient donc cette valeur en déterminant le rapport entre l'erreur maximale (lors du premier dépassement) et le changement de la mesure (Figure 6-12).

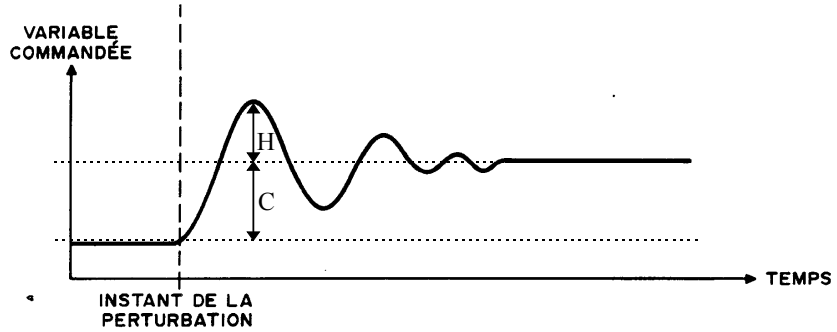


Figure 6-12 Le taux de dépassement

Il est possible de déterminer le taux de dépassement à l'aide de l'Equation 6-1. Aussi, ce dépassement est exprimé en pourcentage.

Taux de dépassement = H / C * 100

Equation 6-1

Pour ce qui est du **temps de rétablissement**, c'est le temps compris entre le début d'une perturbation et le moment où la mesure de la variable commandée se stabilise à l'intérieur d'une plage de ±5% de sa valeur finale. Cette plage de ±5% implique l'utilisation d'une échelle normalisée concernant la variation totale de la mesure.

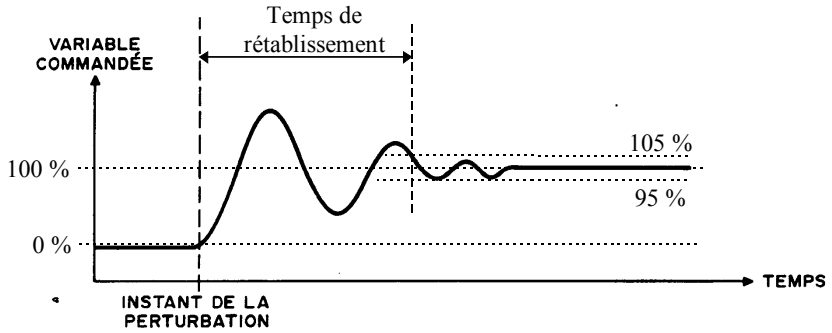


Figure 6-13 Le temps de rétablissement

Enfin, **l'erreur résiduelle** est la différence permanente entre la variable commandée et le point de consigne à la suite de l'atteinte d'un nouveau point d'équilibre pour le système.

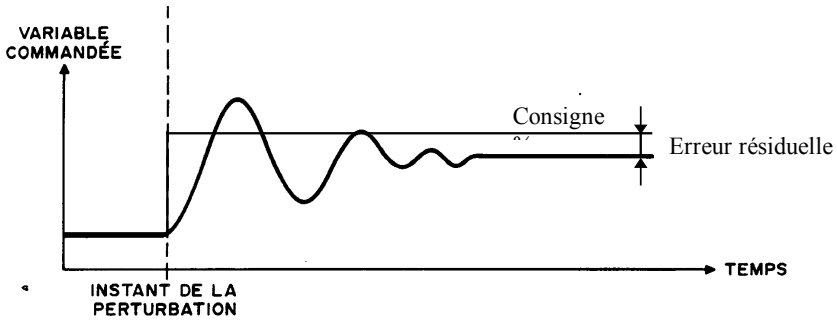


Figure 6-14 L'erreur résiduelle

6.3. MODELISATION DU PROCEDE SELON LA REPONSE A L'ECHELON

Tout d'abord, il importe de bien modéliser le procédé. Ainsi, chacun des appareils, constituant le système asservi, possède son modèle qui le caractérise.

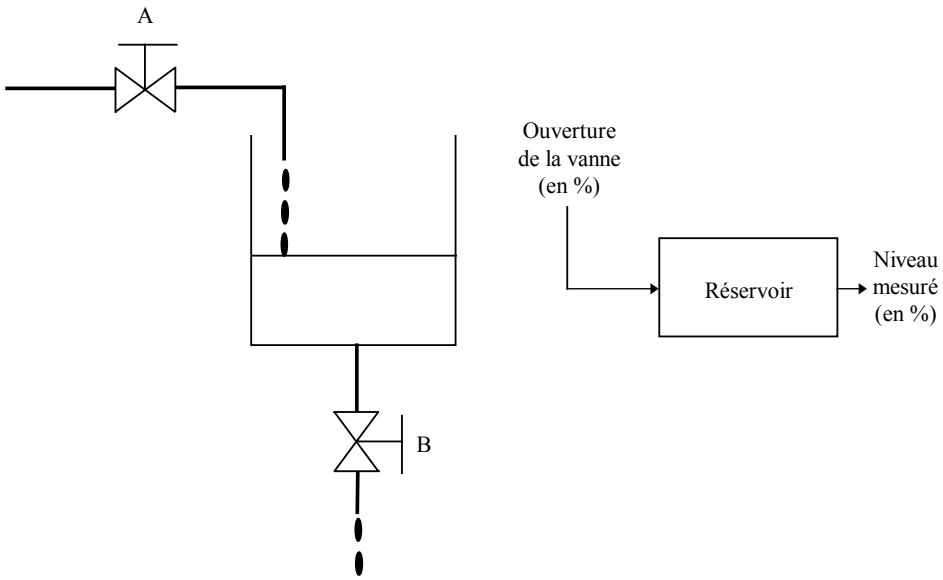


Figure 6-15 Réservoir simple

On constate que, dans le procédé de la Figure 6-15, le niveau de liquide se stabilise lorsque la pression, due à la colonne de liquide, est suffisante pour assurer un débit de sortie équivalent au débit d'entrée. En effet, si la quantité de liquide en entrée augmente, le niveau augmente rapidement car la différence, entre le débit d'entrée et le débit de la sortie, est grande. Puisque le niveau monte, le débit de sortie augmente aussi car la hauteur de la colonne de liquide devient de plus en plus importante. Ce type de procédé est autorégulateur car il ne requiert pas de régulateur pour maintenir un niveau stable.

En ce qui concerne le test à l'échelon, le régulateur du système asservi doit être mis hors fonction ou il doit se trouver en mode manuel.

6.3.1. Les caractéristiques du procédé

Afin d'extraire les principales caractéristiques d'un procédé, il est nécessaire d'effectuer la réponse à l'échelon.

Cette méthode, qui doit être réalisée en boucle ouverte, consiste à imposer une variation instantanée au signal qui pilote l'élément final de commande et d'observer ensuite le comportement de la variable commandée. Après la stabilisation du système, il faut imposer une seconde variation au signal de l'élément final mais, cette fois, le saut doit être de signe contraire (on revient ainsi à l'état initial). Pour que le test soit valide, il est nécessaire que le saut imposé modifie le procédé d'un état stable à un second état stable. Afin d'analyser les résultats ultérieurement, il est judicieux de posséder un enregistreur graphique qui inscrit sur papier tous les détails du test.

Le schéma de principe d'un système asservi en boucle ouverte est présenté à la Figure 6-16 et la méthodologie de la réponse à l'échelon est détaillée à laFigure 6-17.

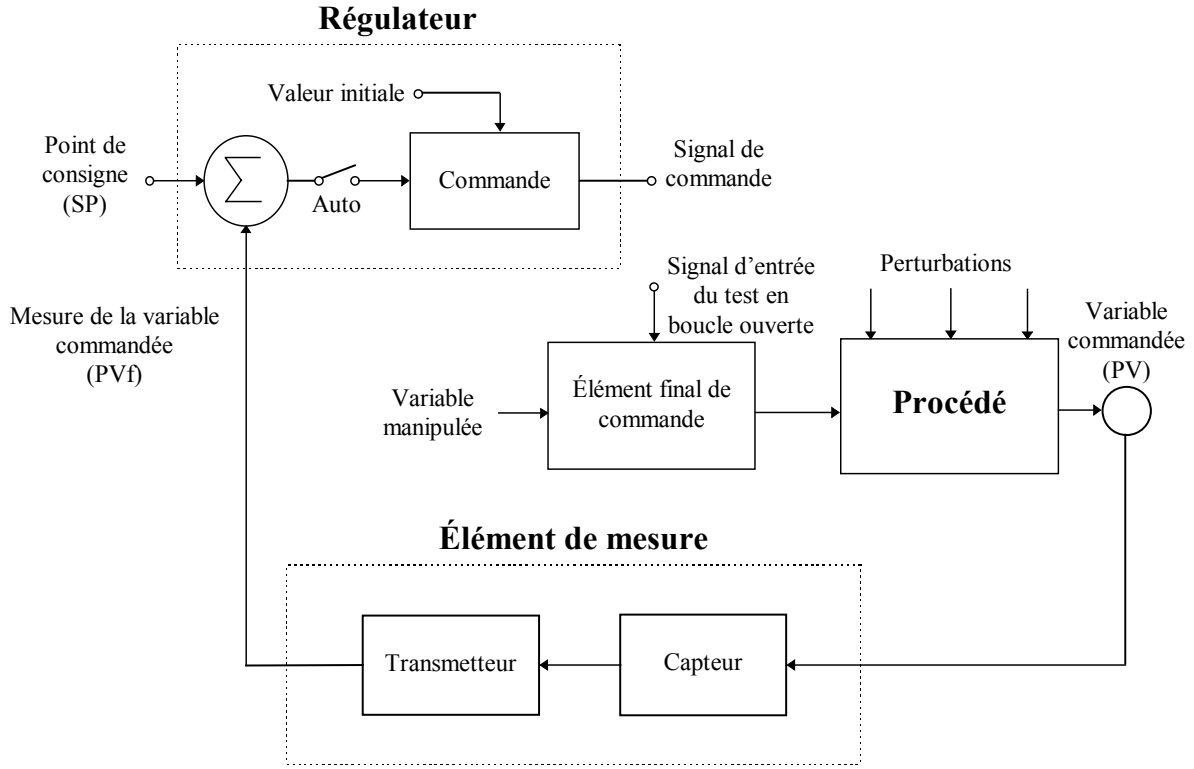


Figure 6-16 Système asservi industriel en boucle ouverte

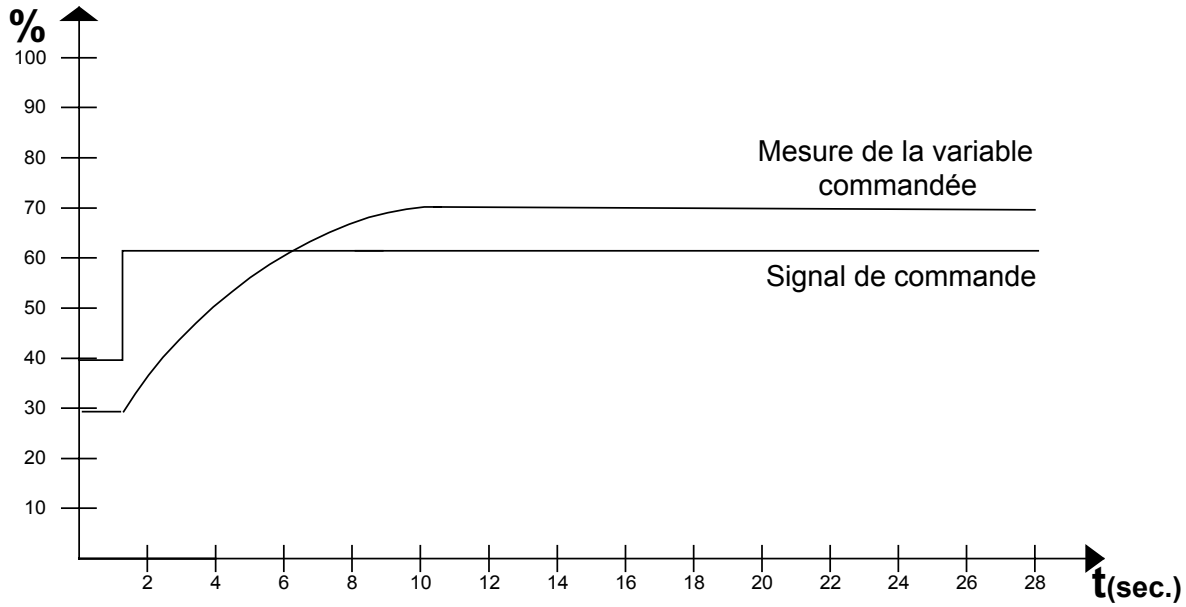


Figure 6-17 Réponse à l'échelon

La réponse à l'échelon nous renseigne sur les informations suivantes:

- le gain du procédé;
- la constante de temps;
- le temps de délai.

Ces valeurs sont importantes puisqu'elles permettent de prédire le comportement du procédé.

Le gain du procédé est le rapport entre la variation de la grandeur mesurée et la variation du signal de commande.

$$Gp = \frac{\text{variation du signal mesuré (\% Pvf)}}{\text{variation du signal de commande (\%)}}$$

Equation 6-3

Le gain de procédé est une information très importante car il permet de déterminer la sensibilité du système asservi en réponse au signal de commande.

Dans un procédé de régulation de niveau, le gain de procédé est influencé par la densité des liquides en présence. En effet, la hauteur de la colonne de liquide, qui est nécessaire pour assurer un débit de sortie équivalent au débit d'entrée, sera très différente selon que le liquide est léger ou lourd.

Donc, le gain de procédé nous renseigne sur la valeur avec laquelle le procédé réagit à une perturbation.

La constante de temps (τ ou *tau*) du procédé permet de déterminer la rapidité avec laquelle le système aurait atteint le prochain état stable (la valeur finale pour une variation du signal de commande donnée) et ce, en conservant la vitesse initiale.

En réalité, le temps nécessaire pour atteindre la valeur finale est plus élevé puisque le rythme n'est pas maintenu; il est plutôt réduit graduellement.

Le tau est un paramètre important lorsque le système réagit à une perturbation. En effet, la vitesse de réaction du système est d'abord dictée par la constante de temps. Si des perturbations continuelles sont présentes, le procédé débute sans cesse un nouveau régime transitoire dont la pente est proportionnelle au tau.

Dans un procédé de régulation de niveau, la modification du diamètre du réservoir influence directement la constante de temps et ce, sans changer le gain de procédé. Le gain est inchangé car il est fonction de la hauteur de la colonne de liquide (ou de sa densité). Par contre, la constante de temps est grandement affectée car la quantité de liquide nécessaire varie en fonction de la capacité du réservoir.

Sommes toutes, il est plus usuel de définir la constante de temps comme étant le temps nécessaire pour atteindre 63,2% du changement total (voir Figure 6-18).

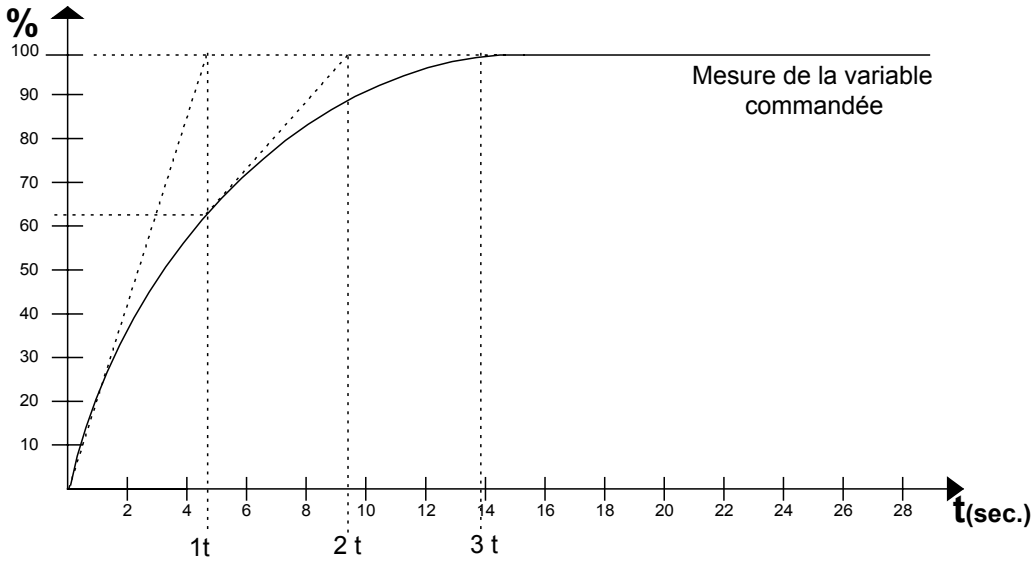


Figure 6-18 La constante de temps τ *(tau)*

Le temps de délai est le retard que l'on observe entre le moment où un signal est appliqué au procédé (une variation du signal de commande ou une perturbation) et le moment où on observe une réaction sur la variable mesurée. Un temps de délai pur ne fait que retarder le signal et ce, sans l'altérer.

Le temps de délai est la conséquence directe du retard reliée au transport de matériel ou d'énergie. Par contre, ce type de délai est très nuisible car il retarde l'information et qu'il est alors impossible d'anticiper les réactions du procédé.

6.3.2. Méthode du 2 à 63%

Puisqu'on dispose maintenant de la réponse à l'échelon, il est nécessaire d'y extraire l'information concerant le procédé.

Tout d'abord, il importe de déterminer le point où le procédé dépasse approximativement 2 % de la variation totale et d'y associer le temps de délai. Ensuite, on reprend l'opération en localisant, cette fois, le point où le procédé atteint 63,2% de la variation totale. La différence entre les deux points localisés symbolise la constante de temps *tau*. Se référer à la Figure 6-19 pour de bien visualiser les paramètres ainsi trouvés.

On utilise la valeur à 2% car elle permet d'isoler facilement le temps de délai. Aussi, il est aisé de situer graphiquement une telle donnée.

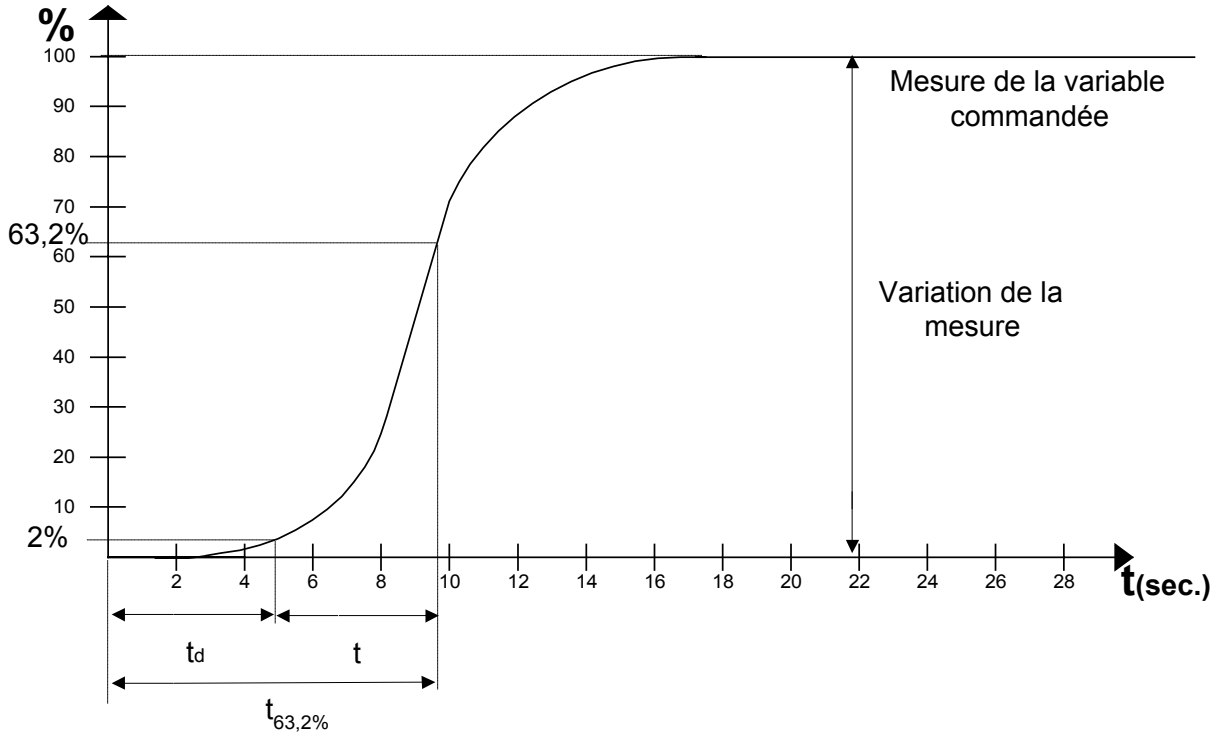


Figure 6-19 Mesure des caractéristiques du procédé

6.3.3. Méthode de la pente maximale

Cette méthode consiste à localiser le point d'inflexion (l'endroit où la pente est maximale) et de tracer la tangente à la courbe en ce point d'inflexion. La rencontre de cette droite, avec les valeurs stabilisées initiales et finales de la réponse à l'échelon, permet de déterminer le temps de délai ainsi que la constante de temps du procédé (voir Figure 6-20).

Il est à noter que cette méthode exige beaucoup de minutie et il est particulièrement difficile de bien localiser le point d'inflexion et de tracer une droite tangente. Ce qui tend à rendre cette méthode beaucoup moins précise que la méthode du 2 à 63%.

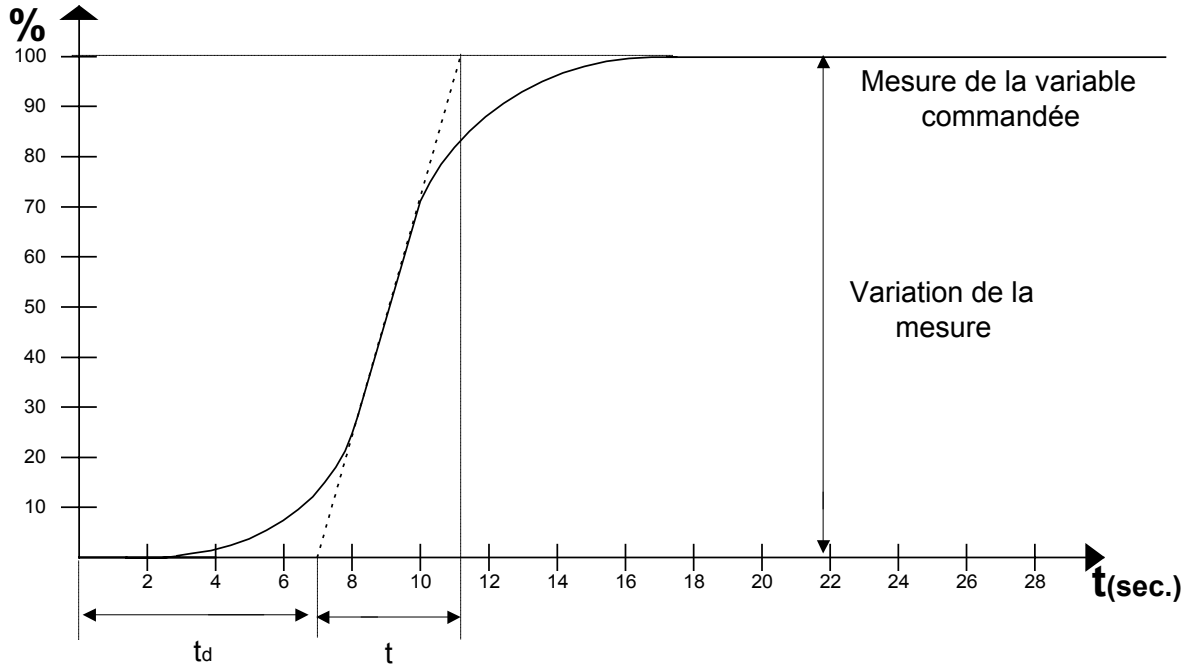


Figure 6-20 Mesure des caractéristiques du procédé

6.4. AUTRES CARACTERISTIQUES DU PROCEDE

La **saturation** détermine les limites d'un procédé. Le comportement du procédé, dans le voisinage de ces régions, peut être très différent. Voici une liste de quelques limites de procédés:

- réservoir vide ou plein;
- point d'ébullition d'un liquide;
- débit maximal de la pompe;
- concentration saturée;

Pour ce qui est de l'**hystérésis,** c'est une caractéristique souvent engendrée par un jeu mécanique, ou un frottement excessif, qui est généralement présent dans l'élément final de commande (vanne pneumatique).

Il est très aisé de vérifier si un procédé possède de l'hystérésis ou non. Il suffit d'effectuer la réponse à l'échelon et de vérifier si le procédé retourne, une fois le test complété, à la valeur initiale. Si tel n'est pas le cas, nous sommes en présence d'un procédé qui possède de l'hystérésis.

L'hystérésis est très indésirable car elle perturbe le procédé en causant des oscillations, en augmentant le temps de délai et en détériorant la régulation. La Figure 6-21 illustre un procédé doté de cette caractéristique.

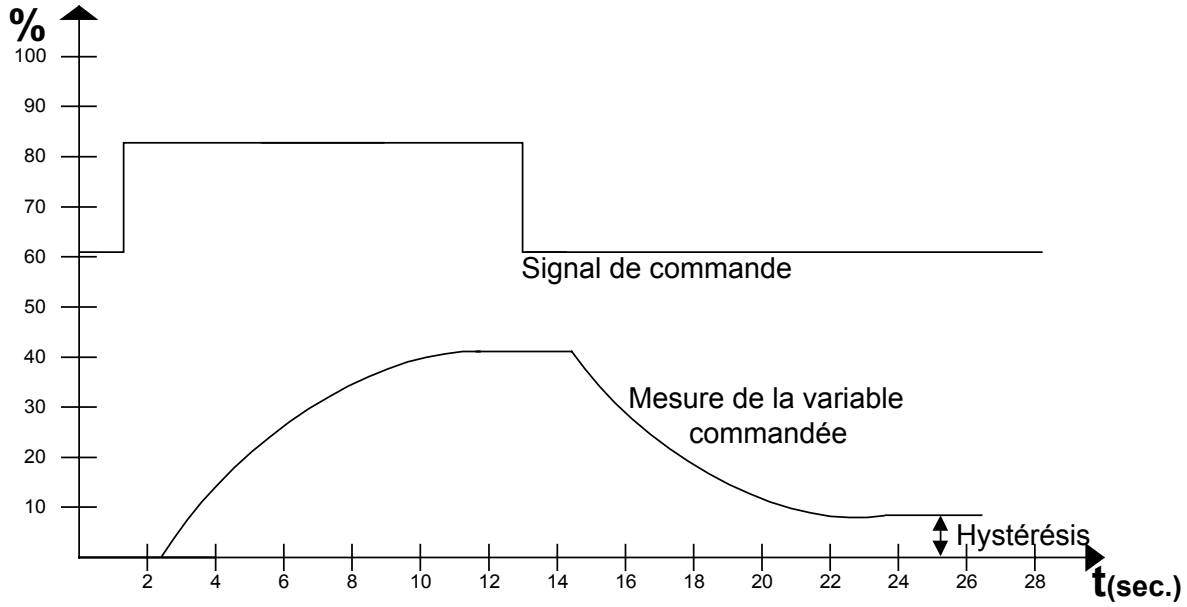


Figure 6-21 Réponse d'un procédé avec hystérésis

6.5. LES TYPES DE PROCEDES

Il existe principalement trois types de procédés:

- un procédé autorégulateur;
- un procédé intégrateur;
- un procédé à emballement.

Un procédé autorégulateur est un procédé qui atteint une valeur stable même sans régulateur. En boucle ouverte, il est possible de modifier manuellement le signal de commande et le procédé se stabilise à un nouveau point d'équilibre. Donc, il tend à se corriger lui-même.

Un procédé intégrateur est l'inverse du type précédent. Le procédé intégrateur n'atteint jamais l'équilibre suite à une nouvelle valeur du signal de commande. Il ne parvient donc pas à se stabiliser.

Un procédé à emballement est un procédé qui, non seulement ne parvient pas à se stabiliser, mais il s'emballe. En effet, la pente de la grandeur mesurée s'accroît avec le temps.

Les principaux procédés, qui possèdent ce type de caractéristiques, sont:

- les réactions exothermiques;
- les réactions biologiques;
- la vitesse de certains types de compresseurs.

La

Figure 6-22 présente les courbes de réponse de chacun des types de procédé.

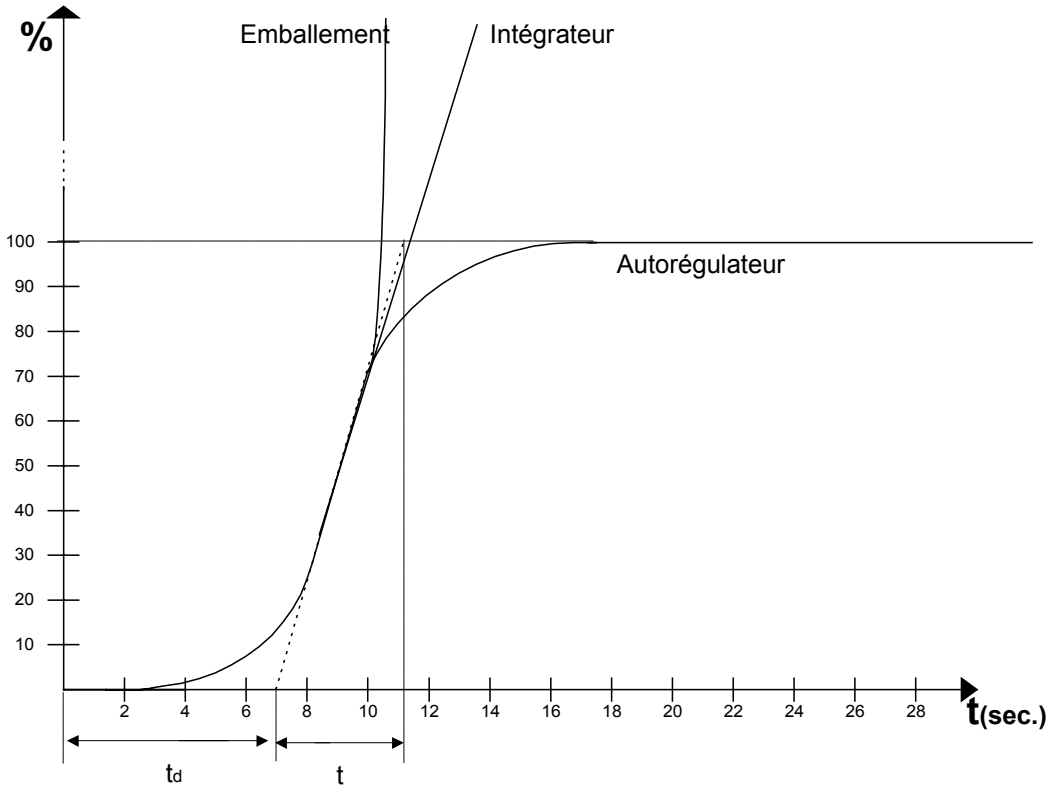


Figure 6-22 Types de procédé

6.5.1. Sens de l'action d'un régulateur

Définition

Un procédé est direct, quand sa sortie varie dans le même sens que son entrée. Dans un régulateur, la mesure est considérée comme une entrée.

Dans le cas contraire, on dit que le procédé est inverse.

Choix du sens d'action du régulateur

Si le procédé est direct -> Choisir un régulateur à action inverse.

Si le procédé est inverse -> Choisir un régulateur à action directe.

Remarque : Pour avoir un système stable dans une boucle de régulation, le régulateur doit agir de manière à s'opposer à une variation de la grandeur X non désirée. Si X augmente, le couple régulateur + procédé doit tendre à le faire diminuer.

EXERCICES

En vous référant au test à l'échelon de la Figure 6-23, utiliser la méthode de la pente maximale pour compléter le Tableau 3.

Tableau 3

Paramètres	*la pente maximale*
temps de délai	
constante de temps	
gain de procédé	

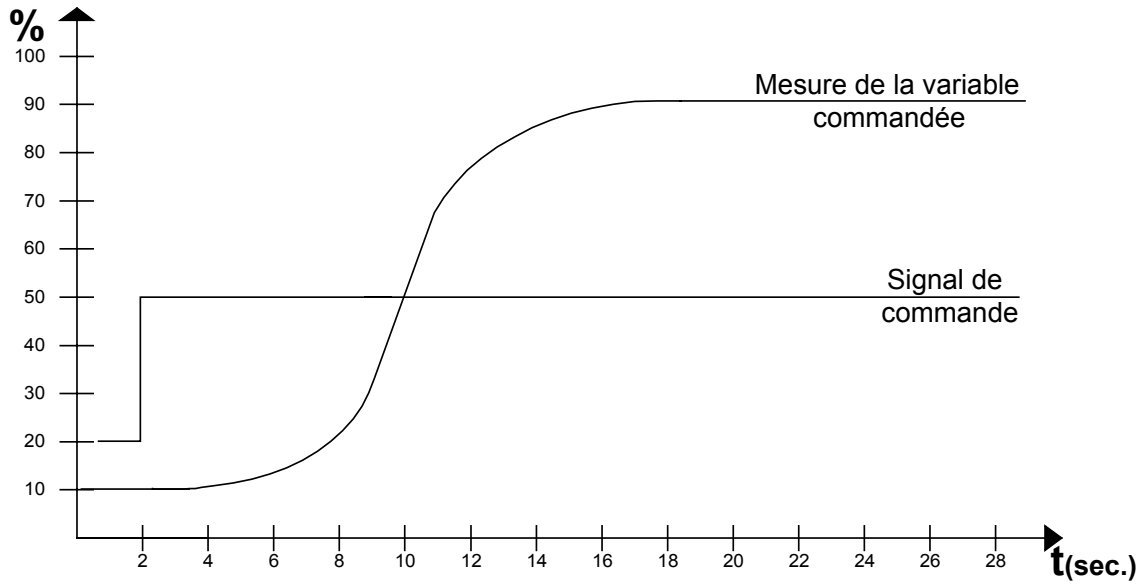


Figure 6-23 Test à l'échelon

En vous référant à la Figure 6-24, déterminer l'erreur résiduelle suite à la variation de la charge.

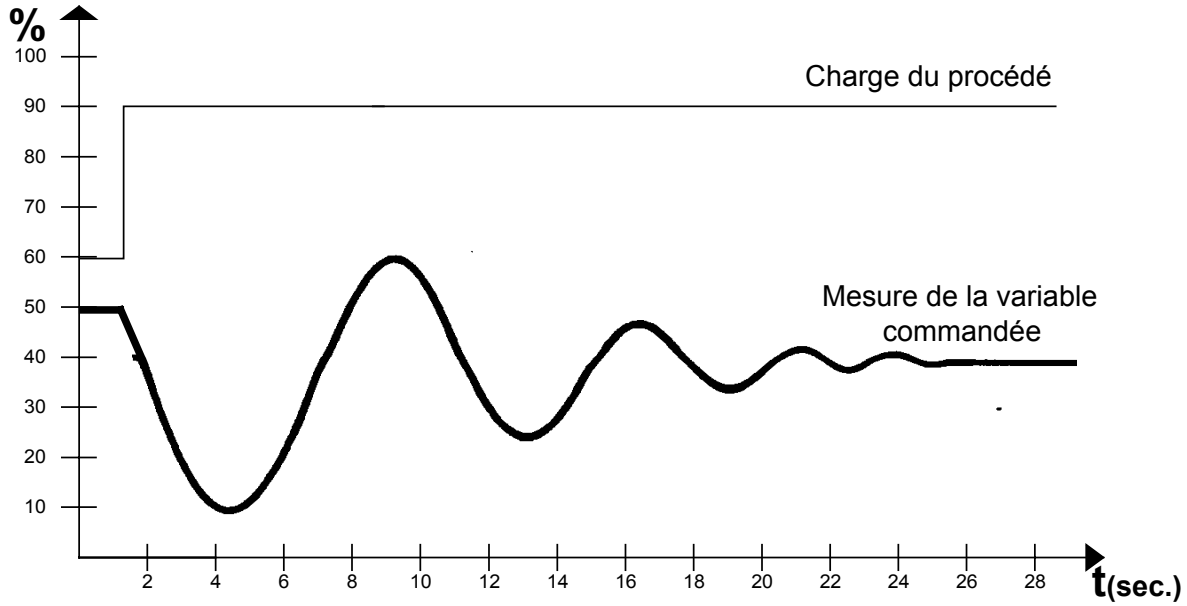


Figure 6-24 Variation de charge

7. ACTIONNEURS

En ce qui concerne l'actionneur ou l'élément final de commande, il est celui qui transfère l'énergie ou le matériel de la source vers le procédé en fonction du signal de commande. Ceux que l'on rencontre le plus fréquemment en industrie, sont:

- les moteurs;
- les embrayages magnétiques;
- les valves et les dispositifs pneumatiques;
- les éléments chauffants;
- les relais et les contacteurs;
- les solénoïdes;
- les pistons hydrauliques et les pompes.

7.1 Les moteurs

Les moteurs électriques existent en une infinité de modèles, les puissances allant d'une fraction à plusieurs milliers de Watt. Bien qu'il existe également de nombreuses technologies possibles, chacune ayant ses avantages, il convient surtout de faire la distinction entre les deux familles de moteurs:

- les moteurs à courant continu;
- les moteurs à courant alternatif.

Règle générale, les moteurs à courant continu ont l'avantage de mieux se prêter à la commande de vitesse puisqu'ils réagissent avec souplesse aux variations de tension sur l'armature ou sur la bobine de champ. Pour profiter de cet avantage en industrie, on n'hésite pas à utiliser de gros redresseurs dans le but d'alimenter les puissants moteurs à courant continu.

Parmi les différents types de moteurs électriques, le moteur à impulsion ou pas à pas (stepping motor) est abondamment utilisé dans les servomécanismes, particulièrement en robotique. Un moteur à impulsion est un moteur qui, à chaque fois qu'une impulsion de commande est appliquée, avance d'un certain nombre de degrés. Ce mouvement angulaire est répétitif à chaque nouvelle impulsion. Le nombre d'impulsions requises pour l'accomplissement d'une révolution dépend de la construction du moteur. Aussi, l'emploi d'un moteur à impulsion présente surtout l'avantage de ne pas nécessiter de capteur de position angulaire étant donné qu'il suffit de compter les impulsions pour connaître sa position actuelle. De plus, l'erreur sur un déplacement est minime (inférieure à 1%) et non-cumulative.

7.2 L'embrayage magnétique

Pour ce qui de l'embrayage magnétique, c'est une machine tournante qui transmet un pouvoir moteur vers une charge mécanique. Le moteur, qui est la source d'énergie motrice, tourne à vitesse constante. L'embrayage magnétique communique une fraction variable de cette vitesse à la charge mécanique, selon le courant d'excitation appliqué à la machine. L'embrayage magnétique ne fournit pas d'énergie propre. On l'utilise pour réaliser des commandes de vitesse à partir d'un moteur à vitesse constante, alternative ou continue. Ce principe offre plus de souplesse et de précision qu'une commande directe en tension sur un moteur.

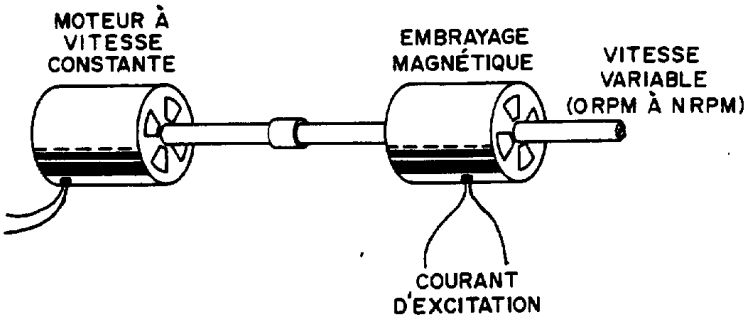


Figure 7.1 Moteur couplé à un embrayage magnétique

7.3 Les éléments chauffants

Parmi les multiples composants que l'on utilise comme élément final, l'élément chauffant est fréquemment rencontré en industrie afin de contrôler la température. Il existe plusieurs méthodes différentes pour d'obtenir une augmentation de température dans un procédé industriel:

- avec un élément résistif parcouru par un fort courant;
- par rayonnement lumineux;
- par réactions chimiques;
- par compression (gaz);
- par conduction avec une source de chaleur quelconque.

L'élément résistif est le plus usuel et son principe de fonctionnement est très simple. Il suffit de disposer d'un conducteur dans lequel on fait circuler un courant plus ou moins intense, suivant l'intensité du dégagement de chaleur que l'on désire obtenir. Il suffit de penser à l'augmentation de température que subit toute résistance électrique lors du passage du courant électrique. Ce phénomène s'explique aisément en imaginant l'effet que provoque le passage des électrons dans le goulot d'étranglement qu'est la résistance. L'intensité de leur déplacement, dans un endroit aussi restreint, engendre une augmentation de la température.

Par contre, l'utilisation des éléments chauffants entraîne parfois des contraintes additionnelles pour la régulation du procédé. En effet, il est fréquent que le système réagisse différemment suivant que l'on chauffe ou que l'on refroidit le procédé.

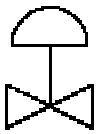
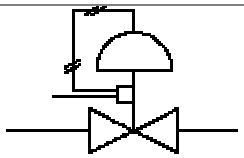
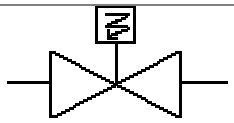
7.4 La vanne de réglage

Figure 7-2

7.4.1 GENERALITE

7.4.1.1. Schématisation

Tableau 7-1

Vanne	
Actionneur manuel	
Vanne de régulation	
Actionneur pneumatique à membrane avec positionneur	
Électrovanne	

7.4.1.2. Situation

La vanne de régulation est utilisée comme organe de réglage dans différentes boucles de régulation.

7.4.1.2.1. Régulation de niveau

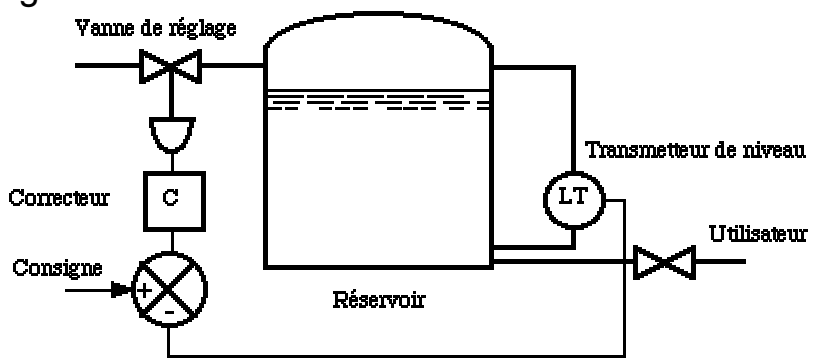


Figure 7-3

Le niveau varie en fonction du débit d'alimentation et du débit utilisateur ;

La grandeur réglée est le niveau ; elle doit suivre la consigne du régulateur ;

La vanne de réglage "LCV" (Level Contrôle Vanne) est l'élément de la chaîne de régulation permettant de faire varier le débit d'alimentation en fonction de la consigne.

7.4.1.2.2. Régulation de pression

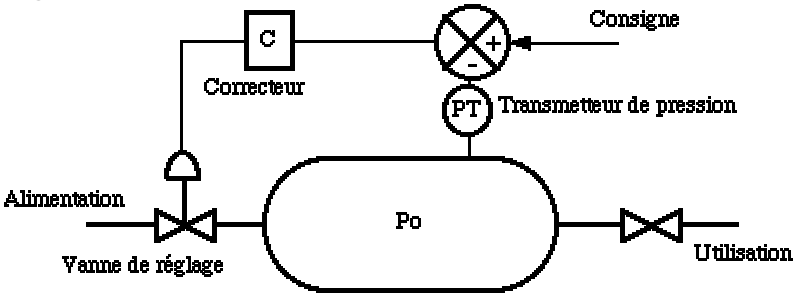


Figure 7-4

La cuve est sous pression Po (air comprimé par exemple) ;

Po est la grandeur à régler ;

La grandeur réglante est le débit d'alimentation ;

Les perturbations proviennent de l'utilisation.

7.4.1.2.3. Régulation de débit

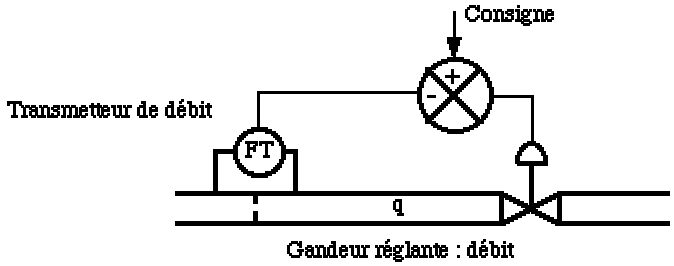


Figure 7-5

7.4.1.3. Fonction de la vanne de réglage

On attend donc de la vanne qu'elle fasse varier un débit de fluide en fonction des variations du signal en provenance du régulateur.

La vanne de réglage est 'un robinet' commandé non plus manuellement, mais à distance, par un signal électrique ou pneumatique.

7.4.1.4. Contraintes dues au fluide et à l'environnement :

La vanne de réglage devra être conçue et fabriquée de manière à fonctionner correctement, et avec un minimum d'entretien, malgré un certain nombre de problèmes posés par le fluide et par son environnement.

Le fluide qui passe dans la vanne de réglage peut être :

- Corrosif (attaque chimique des matériaux) ;

- Chargé de particules solides (érosion, encrassement de la vanne) ;
- Chargé de bulles gazeuses, ou constitué d'un mélange de liquides et de gaz non homogènes ;
- Visqueux (exemple de l'huile) ;
- Inflammable ou explosif en présence de l'air, d'une étincelle ;
- Toxique, donc dangereux en cas de fuite ;
- Dangereux , car il peut se transformer chimiquement tout seul (polymérisation) ou réagir avec d'autres produits, parfois violemment ;
- Un liquide qui se solidifie lorsque la température baisse (cristallisation) ;
- Un liquide qui se vaporise lorsque la température augmente ou que la pression diminue ;
- Une vapeur qui de condense lorsque la température baisse ou que la pression augmente.
- Sous forte pression ou sous vide ;
- À très basse température ou à très haute température.

L'analyse approfondie et la résolution de ces problèmes doivent permettre d'assurer la sécurité du personnel et des installations, ainsi que le bon fonctionnement de la vanne.

L'ambiance extérieure peut poser les problèmes suivants :

- Atmosphère explosive, corrosive, sèche ou humide, poussiéreuse, chaude ou froide ...
- Vibrations, dues par exemple à une machine voisine ;
- Parasites, dus à des appareils demandant une grande puissance électrique.

7.4.1.5. Éléments constituants la vanne de réglage

La vanne est constituée de deux éléments principaux :

- **Le servo moteur** : c'est l'élément qui assure la conversion du signal de commande en mouvement de la vanne ;
- **Le corps de vanne** : c'est l'élément qui assure le réglage du débit.

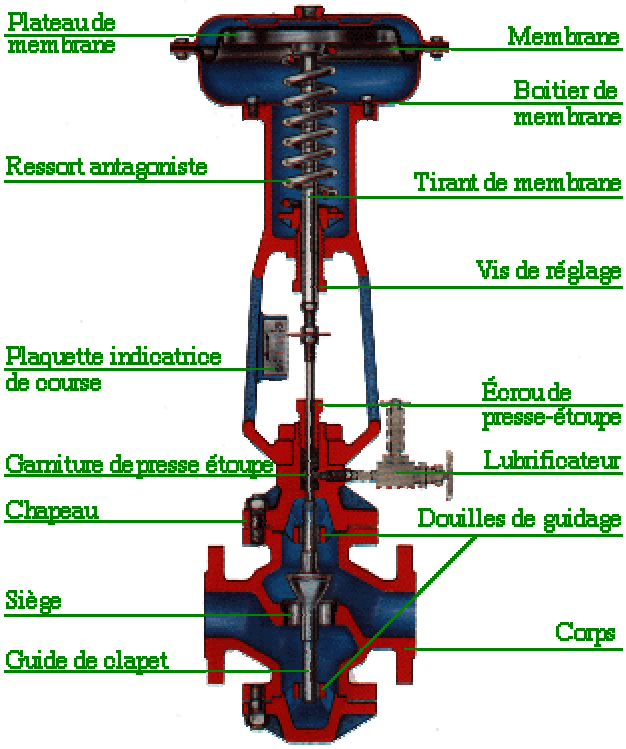


Figure 7-6

Et aussi d'un certain nombre d'éléments auxiliaires :

- Un contacteur de début et de fin de course ;
- Une recopie de la position ;
- Un filtre détendeur.
- **Un positionneur** ; il régule l'ouverture de la vanne en accord avec le signal de commande.

Un positionneur

Figure 7-7

7.4.1.6. Forme du corps de vanne

On distingue les différents corps de vannes :

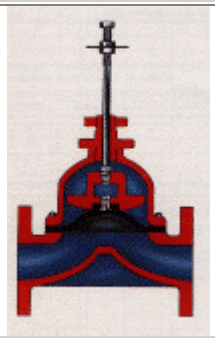
- **Le corps droit** ; l'entrée et la sortie sont dans le même axe ;
- **Le corps d'angle** ; l'entrée et la sortie sont dans deux plans perpendiculaires ;
- **Le corps mélangeur** ; il possède deux entrées et une sortie afin de permettre le mélange de deux fluides ;
- **Le corps de dérivation (répartiteur)** ; il possède une entrée et deux sorties afin de permettre la séparation du fluide suivant deux directions.

7.4.1.7. Type de corps de vanne

Tableau 7-2

Clapet simple siège	Avantage: - bonne étanchéité à la fermeture (après rodage du clapet sur le siège) - existence de clapets réversibles à double guidage permettant d'inverser le sens d'action du corps de vanne par un montage à l'envers. Inconvénients: - la poussée du liquide exerce une force importante sur le clapet ce qui nécessite un actionneur puissant d'où utilisation d'un simple siège pour une différence de pression faible. - frottements importants au niveau du presse étoupe - passage indirect donc plus grand risque de bouchage par des particules en suspension.
Clapet double siège	Constitué par deux clapets et par deux sièges vissés. Le principal avantage apporté au corps de vanne à simple siège concerne son équilibrage, c'est à dire la diminution de la force résultante due à la poussé du fluide sur le clapet donc utilisable pour des fortes différence de pression. Son principal inconvénient est une mauvaise étanchéité de la fermeture du fait de la double portée.

Clapet à cage 	Il comprend un obturateur et une cage. Le fluide arrive perpendiculairement à la cage et passe par un espace déterminé par la position de l'obturateur (sorte de piston) à l'intérieur de la cage. En position basse les trous situés à la partie inférieure de la cage sont obturés et réalise ainsi l'étanchéité de la vanne à la fermeture. Avantages : - équilibrage grâce aux trous dans l'obturateur - bonne étanchéité à]a fermeture - bonne plage de réglage - cages spécifiques possibles pour obtenir différentes caractéristiques, ou pour résoudre un problème de cavitation (cage anti-cavitation) ou de bruit (cage anti-bruit). - Le changement de cage est aisé. inconvénients : - corps droit non réversible - risque de coincement de l'obturateur dans la cage avec des fluides chargés de particules solides.
Clapet papillon 	L'obturateur est un disque dont le diamètre est égal au diamètre intérieur de la conduite. À la fermeture, ce disque a sa surface perpendiculaire au sens du passage du fluide. La variation de la section de passage se fait par inclinaison de ce disque par rapport à la verticale. La tige de l'obturateur effectue un mouvement de rotation, ce qui est nettement préférable pour le presse étoupe (meilleure étanchéité). Cette rotation est souvent limitée à un angle d'ouverture de 60° à cause de l'importance du couple exercé par le fluide. Ce type de vanne n'est réalisable que pour des grands diamètres DN > 4". Vue la surface de l'obturateur et la forme de celui-ci, il ne peut être utilisé pour des pressions très élevées. Du fait de la grande longueur de portée du papillon sur le corps (qui forme aussi le siège), l'étanchéité à la fermeture est délicate à obtenir, donc mauvaise le plus souvent. À noter aussi un frottement du à la force de poussée du liquide qui plaque la tige de obturateur contre la garniture (effort transversal).
Clapet à membrane 	Elle est utilisée dans le cas de fluides très chargés de particules solides, ou très corrosifs. La section de passage est obtenue entre une membrane déformable en caoutchouc synthétique généralement et la partie inférieure du corps de vanne. Avantages : - solution peu coûteuse ;

	- supprime les presse étoupes d'où le risque de fuites éventuelles ; - bonne étanchéité à la fermeture. inconvénients : - précision de réglage très médiocre ; - caractéristique statique mal définie ; - pression maximale supportable faible ; - température maximale d'environ 200°C.

7.4.1.8. Les servomoteurs

Le servomoteur est l'organe permettant d'actionner la tige de claper de la vanne. L'effort developpé par le servomoteur à deux buts :

- Lutter contre la pression agissant sur le clapet ;
- Assurer l'étencéité de la vanne ;

Ces deux critères conditionnent le dimentionnement des servomoteurs. Le fluide moteur peut être :

- De l'air ;
- De l'eau ;
- De l'huile ;
- De l'électricité (servomoteur électrique).

En général, le fluide est de l'air et la pression de commande varie de 0,2 bar à 1 bar. On distingue :

- Le servomoteur classique à membrane, conventionnel (à action direct ou inverse) ou réversible (on peut changer le sens d'action).
- Le servomoteur à membranes déroulante, surtout utilisé pour les vannes rotatives.
- Le servomoteur à piston, utilisé lorsque les efforts à fournir sont trés importants. La pression de commande peut être importante. Le fluide moteur peut être de l'air, de l'eau ou de l'huile.
- Le servomoteur électrique, utilisé pour les vannes rotatives. On associe à un moteur électrique un réducteur de vitesse permettant ainsi d'obtenir des couples très importants.

7.4.2. CARACTERISTIQUES DES VANNES DE REGULATION

7.4.2.1. Caractéristique intrinsèque de débit

C'est la loi entre le débit Q et le signal de vanne V, la pression différentielle Delta P aux bornes de la vanne étant maintenue constante.

On distingue essentiellement trois types de caractéristiques intrinsèques de débit :

- Linéaire ;
- Égal pourcentage ;
- Tout ou rien (ou Quick Opening).

7.4.2.2. Débit linéaire PL

Le débit évolue linéairement en fonction du signal. La caractéristique est une droite. Des accroissements égaux du signal vanne provoquent des accroissements égaux de débit.

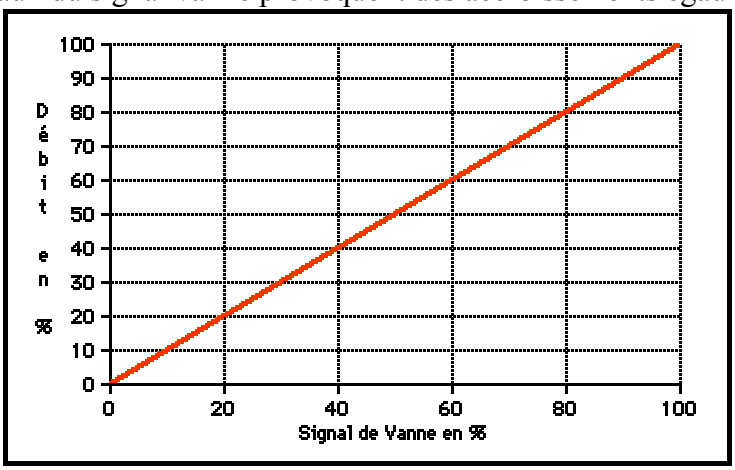
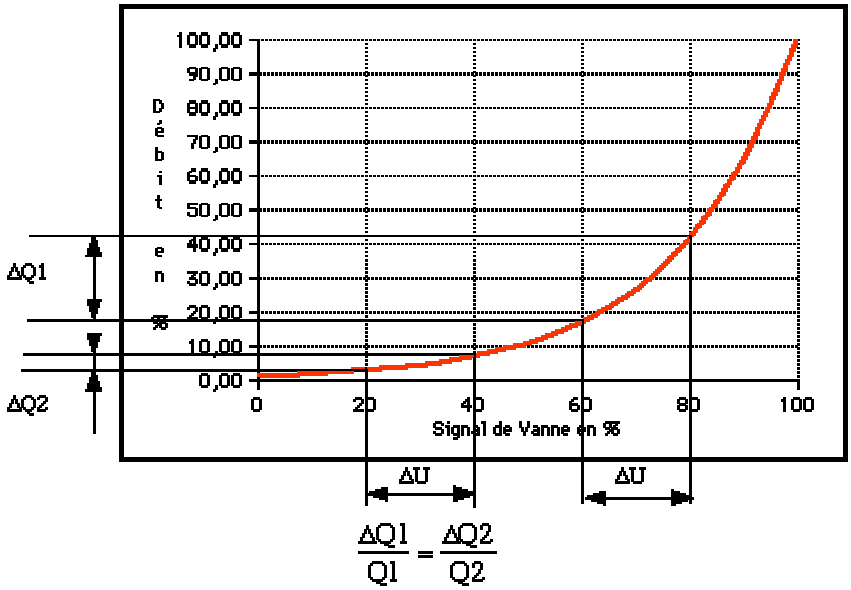


Figure 7-8

7.4.2.3. Débit égal en pourcentage EQP

La caractéristique est une exponentielle. Des accroissements égaux du signal vanne provoquent des accroissements égaux de débit relatif.



$$\frac{\Delta Q1}{Q1} = \frac{\Delta Q2}{Q2}$$

Figure 7-9

7.4.2.4. Débit tout ou rien PT

Cette caractéristique présente une augmentation rapide du débit en début de course pour atteindre alors environ 80% du débit maximum.

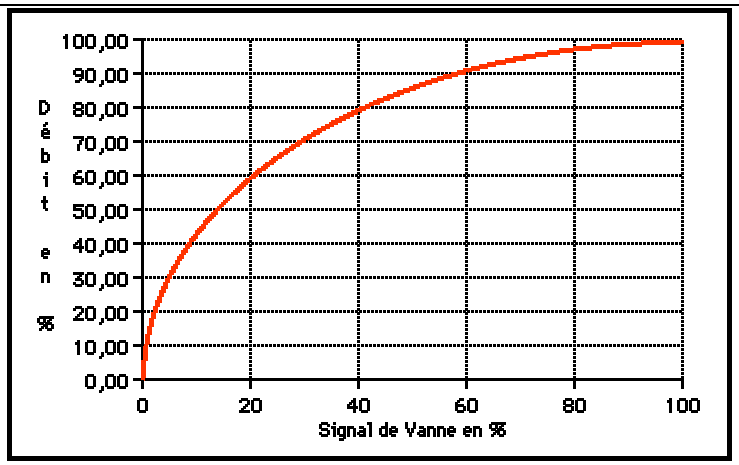


Figure 7-10

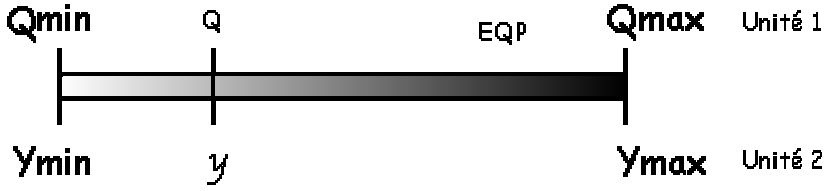
7.4.2.5. Caractéristique installée

C'est la loi de variation du débit en fonction du signal de commande. Cette caractéristique est fonction :

- De l'installation, des conditions de service ;
- De la vanne, c'est-à-dire de sa caractéristique intrinsèque de débit.

7.4.2.6. Modélisation de la relation EQP entre le débit et la commande de vanne

On complète ici ce qui à été dit dans le chapitre Métrologie, concernant la représentation des relations entre les grandeurs physique. La relation qui nous intéresse ici est celle représentée ci-après :



C'est la relation entre le débit d'une vanne et sa commande, lorsque sa caractéristique intrinsèque est de type égal pourcentage. Dans ce cas particulier, par analogie avec ce qui a été dit précédemment, on peut alors écrire :

$$\frac{y - Ymin}{Ymax - Ymin} = \frac{(Q - Qmin)/(Q + Qmin)}{(Qmax - Qmin)/(Qmax + Qmin)}$$

7.4.3. POSITION DE LA VANNE EN CAS DE MANQUE D'AIR

7.4.3.1. Un choix à effectuer

Le choix imposé de la position d'une vanne en cas de panne d'air moteur (ouverte ou fermée) est basé sur la réponse du procédé et doit être effectué afin d'assurer la sécurité du personnel et des installations.

Exemples classiques :

- Combustible vers brûleurs : FERMÉE
- Eau de refroidissement vers échangeur : OUVERTE

Ce choix doit être déterminé en collaboration avec le spécialiste du procédé et fait partie intégrante de la spécification de la vanne régulatrice.

Il appartient au constructeur de choisir un ensemble de vanne et servomoteur adapté à l'exigence formulée, et de fournir éventuellement des équipements supplémentaires permettant le respect de cette exigence.

7.4.3.2. Cas des servomoteurs à diaphragme, a piston simple effet

En cas de panne d'air, par action du ressort antagoniste, le servomoteur prend une position extrême permettant d'amener l'obturateur en position de fermeture ou d'ouverture complète. Ces types de servomoteurs ne posent donc pas de problème particulier pour le respect de la spécification (servomoteurs "directs", "inverses", réversibles.).

Servo moteur à action directe	Servo moteur à action inverse

Figure 7-11

7.4.3.3. Cas des servomoteurs à piston double effet

En cas de panne d'air, le piston prend une position quelconque selon la force exercée par le fluide sur l'obturateur de la vanne.

Afin de forcer la position de l'obturateur, il est donc nécessaire de prévoir un dispositif comprenant une réserve d'air comprimé et des éléments de commutation permettant d'amener la vanne à la position choisie en cas de panne d'air de réseau de distribution.

7.4.3.4. Maintien de la vanne régulatrice de position

Pour éviter un changement brutal dans la circulation d'un fluide dans un procédé, en cas de panne d'air moteur on peut spécifier, en plus de la position ultime fixée précédemment, un dispositif bloquant la vanne dans la position qu'elle occupait au moment où la pression d'air dans le réseau de distribution atteignait une valeur basse limite.

7.4.4. CAPACITE DE DEBIT D'UNE VANNE

7.4.4.1. Rappel

Il a été établi que la loi liant le débit Qv à la section de passage Sp et à la P est la suivante :

$$Qv = kSp\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

avec :

- Qv : Débit volumique ;
- P : Perte de charge du fluide dans la vanne ;
- Sp : Section de passage entre le siège et clapet ;
- ρ: Masse volumique du fluide ;
- k : dépendant du profil interne de la vanne.

Nous constatons que :

- Le débit varie proportionnellement à la section de passage ;
- Le débit est proportionnel à la racine carrée de la perte de charge ;
- Le débit volumique est inversement proportionnel à la racine carrée de la masse volumique.

Pour un liquide, lorsque la température ne varie que de quelques degrés, la masse volumique est à peu près constante, donc. le débit ne varie qu'en fonction de la perte de charge et de la section de passage.

7.4.4.2. Capacité du corps de vanne

Nous voyons donc que le débit maximum Qvmaxi ne dépend pas que de la section de passage Sp maxi, mais aussi de la densité du fluide, de la perte de charge, et du coefficient de forme interne du corps.

Deux corps de vanne présentant la même section de passage n'ont donc pas forcément la même capacité.

On ne peut comparer les capacités de corps de vannes différents ayant une même section de passage Sp qu'en respectant les conditions d'essais suivantes :

- Même fluide ;
- Même différence de pression.

Ainsi, le coefficient de profil interne k explique les différences de capacités entre deux corps de vannes de types différents et de Sp identiques. Nous voyons donc que la capacité à elle seule ne permet pas de comparer les possibilités de débit des corps de vanne.

7.4.4.3. Cv du corps de vanne

Le coefficient de débit Cv, utilisé pour la première fois par Masoneilan en 1944, est devenu rapidement l'étalon universel de mesure du débit de fluide qui s'écoule dans une vanne. Ce coefficient est en effet si pratique qu'il est maintenant presque toujours employé dans les calculs qui conduisent au dimensionnement des vannes ou à la détermination des débits qui les traversent.

Par définition, le coefficient Cv est le nombre de gallons U.S. d'eau à 15 °C, traversant en une minute une restriction lorsque la chute de pression au passage de cette restriction est de 1 psi. On a :

$$Qv = Cv\sqrt{\frac{\Delta P}{d}}$$

Avec :

- P en psi ;
- d : densité (par rapport à l'eau)
- Qv : en gallon/min.

Or :

- Un gallon U.S. = 3,785 litres
- Un psi = 0,069 bars

Le Cv est un repère de grandeur au moyen duquel le technicien peut déterminer rapidement et avec précision la dimension d'une restriction connaissant les conditions de débit, de pression éventuellement d'autres paramètres annexes et ceci pour n'importe quel fluide. Le Cv est proportionnel à la section de passage entre le siège et le clapet.

- Cv = 0, lorsque la vanne est fermée ;
- Cv = Cvmaxi lorsque la vanne est complètement ouverte.

Le Cv dépend aussi du profil interne de la vanne et du type d'écoulement dans la vanne.

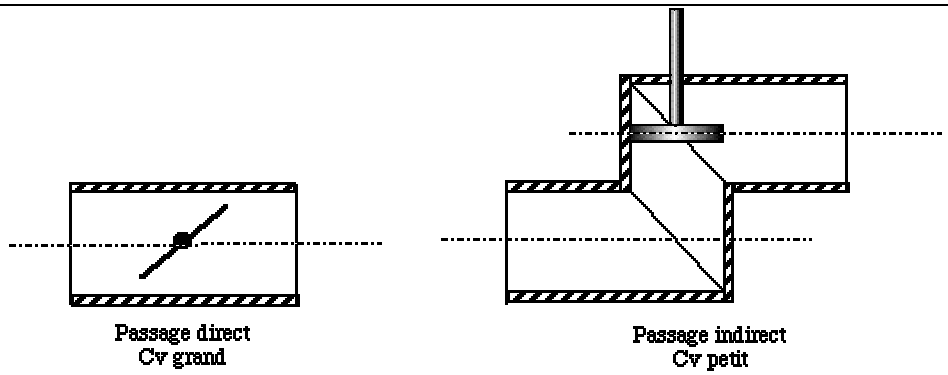


Figure 7-12

Un bon profil interne tel que celui d'une vanne à passage direct correspond à un coefficient k supérieur à celui d'une vanne à passage indirect. Donc, à section de passage identique, le Cv est différent du fait de ce profil interne et des turbulences qu'il provoque.

Quelques valeurs de Cv

Diamètre	Vanne à clapet classique		Vanne	Vanne	Vanne
en Pouce	Simple siège	Double siège	à cage	type "CAMFLEX"	Papillon
1" (2,54 cm)	9	12	20	14	
2"	36	48	72	50	90

7.4.4.4. Kv du corps de vanne

En unité du système plus classique pour nous :

$$Qv = Kv\sqrt{\frac{\Delta P}{d}}$$

Avec :

- P en bar ;
- d : densité (par rapport à l'eau)
- Qv : m^3/h.

On a alors : Cv = 1,16 Kv

10.4.4.5. Cas des liquides visqueux, écoulement laminaire

On obtient un écoulement laminaire au lieu de l'écoulement turbulent habituel quand la viscosité du liquide est élevée ou lorsque la chute de pression est petite.

Pour dimensionner la vanne, calculer le coefficient de débit Cv en écoulement turbulent puis en écoulement laminaire et utiliser la valeur obtenue la plus grande.

Cv en écoulement laminaire :

$$Cv = 0,032 \times \sqrt[3]{\left(\frac{\mu Q}{\Delta P}\right)^2}$$

avec :

- μ : Viscosité dynamique à la température de l'écoulement, en centipoises ;
- Q : Débit du liquide en m^3/h ;
- ΔP : Variation de pression en bar.

7.4.4.6. Cas des gaz

Dans le cas ou le fluide en circulation est un gaz et que son écoulement n'est pas critique on a :

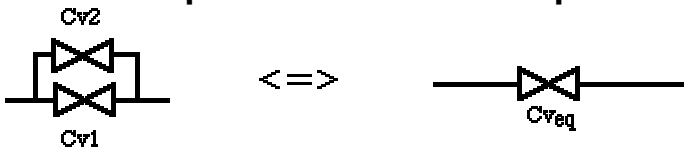
$$Cv = \frac{Q}{295}\sqrt{\frac{d \times T}{\Delta P(P2 + P1)}}$$

avec :

- Q : Débit volumique du gaz à 15,6 °c et 1013 mbar abs, en Nm^3/h ;
- ΔP : Pression différentielle en bar ;
- P2 : Pression absolue du gaz en aval de la vanne en bar ;
- P1 : Pression absolue du gaz en amont de la vanne en bar ;
- d : Densité du gaz par rapport à celle de l'air ;
- T : Température du gaz en K.

7.4.5. CALCUL DE CV

7.4.5.1. Cv équivalent de plusieurs vannes en parallèle



- Qeq = Q1 + Q2;
- Peq = P1 = P2

d'où :

Cveq = Cv1 + Cv2

7.4.5.2. Cv équivalent de plusieurs vannes en série

- P = P1 + P2 ;
- Qeq = Q1 = Q2.

d'où :

$$\frac{1}{Cv_{eq}^2} = \frac{1}{Cv_1^2} + \frac{1}{Cv_2^2}$$

7.4.5.3. Influence des convergents-divergents

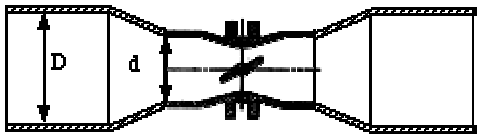


Figure 7-13

- D : diamètre de la canalisation ;
- d : diamètre nominale de la vanne.

Quand une vanne n'est pas de la même dimension que la tuyauterie, elle est installée entre un convergent et un divergent. Ceux-ci créent une chute de pression supplémentaire provoquée par la contraction et la dilatation de la veine fluide.

Le Cv calculé doit être corrigé par la relation suivante :

$$C_v^{réel} = \frac{C_v}{F_p}$$

Le coefficient de correction Fp déterminé expérimentalement est habituellement fourni par le constructeur. Il peut être aussi déterminé de manière approchée à partir des formules suivantes. Il est alors calculé en considérant que la contraction et la dilatation de la veine fluide se font d'une façon brutale. La chute de pression est donc surestimée et l'on ne risque pas de sous-dimensionner la vanne.

$$F_p = \sqrt{1 - 1{,}5\left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \left(\frac{Cv}{0{,}046d^2}\right)^2} \qquad F'_p = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \left(\frac{Cv}{0{,}046d^2}\right)^2}$$

avec :

- Fp : Facteur de correction de débit en écoulement non critique pour installation avec convergent-divergent (angle au sommet du convergent supérieur à 40) ;
- Fp' : Facteur de correction de débit en écoulement non critique pour installation avec un divergent seul ou avec convergent-divergent lorsque l'angle au sommet du convergent est inférieur à 40 ;
- Cv : Coefficient de débit ;
- d : Diamètre de la vanne en mm ;
- D : Diamètre de la tuyauterie en mm.

7.4.6. CAVITATION ET VAPORISATION

7.4.6.1. Variation de la pression statique à travers une vanne

En application du théorème de Bernoulli, la restriction de la section de passage présentée par la vanne et son opérateur provoque une augmentation de la pression dynamique.

Il en résulte une diminution de la pression statique plus ou moins importante selon :

- La géométrie interne de la vanne,
- La valeur de la pression statique en aval de la vanne

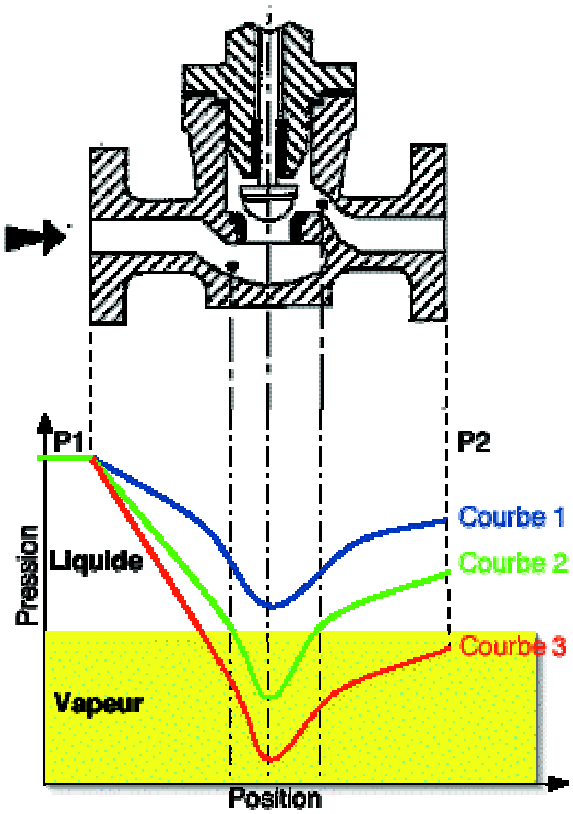


Figure 7-14

Cette diminution de la pression statique de la vanne doit être comparée à la tension de vapeur du liquide à la température d'écoulement, car il peut en résulter des phénomènes nuisibles à la qualité du contrôle et à la tenue du matériel.

7.4.6.2. Cavitation

Lorsque la pression statique dans la veine fluide décroît et atteint la valeur de la tension de vapeur du liquide à la température d'écoulement, le phénomène de cavitation apparaît (formation de petites bulles de vapeur au sein du liquide, courbe 2).

Quand la pression statique s'accroît à nouveau (diminution de la vitesse par élargissement de la veine fluide), les bulles de vapeur se condensent et implosent.

Ce phénomène de cavitation présente les inconvénients suivants :

- Bruit, d'un niveau sonore inacceptable, très caractéristique car semblable à celui que provoqueraient des cailloux circulant dans la tuyauterie ;
- Vibrations à des fréquences élevées ayant pour effet de desserrer toute la boulonnerie de la vanne et de ses accessoires ;
- Destruction rapide du clapet, du siège, du corps, par enlèvement de particules métalliques. Les surfaces soumises à la cavitation présentent une surface granuleuse ;

- Le débit traversant la vanne n'est plus proportionnel à la commande (voir courbe).

C'est généralement les vannes les plus profilées intérieurement qui on une tendance accrue à la cavitation.

Piqûres	Effets de la cavitation sur une pompe

Figure 7-15

7.4.6.3. Vaporisation

Si la pression statique en aval de la vanne est faible (forte perte de charge dans la vanne), le processus d'implosion des bulles gazeuses ne se produit pas : celles-ci restent présentes dans la veine fluide, d'où le phénomène de vaporisation (courbe 3).

Ce phénomène de vaporisation présente les inconvénients suivants :

- Bruit, d'un niveau sonore moindre que celui provoqué par la cavitation ;
- Dommages mécaniques sur le clapet, le siège et le corps, par passage à grande vitesse d'un mélange gaz-liquide.
- Les surfaces exposées à ce phénomène présentent des cavités d'un aspect poli ;
- Régime critique.

7.4.6.4. Conséquences pratiques

Pour éviter le bruit et la destruction rapide de la vanne, on doit calculer et choisir une vanne de régulation ne présentant pas de phénomène de cavitation. Tout au plus peut-on accepter une cavitation naissante.

De même, une vanne présentant un phénomène de vaporisation ne doit pas être employée.

La chute de pression maximum utilisable pour l'accroissement du débit (Pc) et en particulier les conditions de pression pour lesquelles une vanne sera complètement soumise à la cavitation peuvent être définies grâce au facteur FL, de la façon suivante :

$$F_L = \sqrt{\frac{\Delta Pc}{Pl - Pv}}$$

avec :

- P1 : Pression en amont de la vanne ;
- Pv : Pression de vapeur du liquide à la température en amont.

Pour les applications où aucune trace de cavitation ne peut être tolérée, il faut utiliser un nouveau facteur Kc au lieu de la valeur de FL. Ce même facteur Kc sera utilisé si la vanne est placée entre un convergent et un divergent. Pour trouver la chute de pression correspondant au début de cavitation, utiliser la formule suivante :

$$Kc = \frac{\Delta Pc}{P1 - Pv}$$

Des solutions techniques doivent donc être trouvées pour éviter cavitation et vaporisation dans les vannes de régulation. Si l'on se réfère aux relations précédentes, il suffit, pour éviter la cavitation, de ramener la chute de pression dans la vanne à une valeur inférieure à Pc. On peut donc :

- Augmenter la pression en amont et en aval en choisissant pour la vanne une position qui se trouve à un niveau bas dans l'installation : ceci augmente la pression statique.
- Sélectionner un type de vanne ayant un facteur FL plus important.
- Changer la direction du fluide; le facteur FL d'une vanne d'angle utilisée avec écoulement "tendant à ouvrir" au lieu de "tendant à fermer" passe de 0,48 à 0,9 ce qui signifie que la chute de pression peut être au moins triplée.
- Installer deux vannes semblables, en série, et l'on calculera le facteur FL total des deux vannes de la façon suivante : FLeq = FL d'une vanne.

100% COURS
MCours.com
Cours et mémoires gratuits
mcourscom@gmail.com

8. Contrôles de procédé

8.1. LES DIFFERENTS MODES DE COMMANDE

Considérons le système de commande manuel illustré à la Figure 0-1 dans lequel l'opérateur s'efforce de réguler la température de sortie. Pour y parvenir, il se sert de sa main droite en guise de capteur de température et juge de la correction à apporter en réglant l'ouverture de la valve.

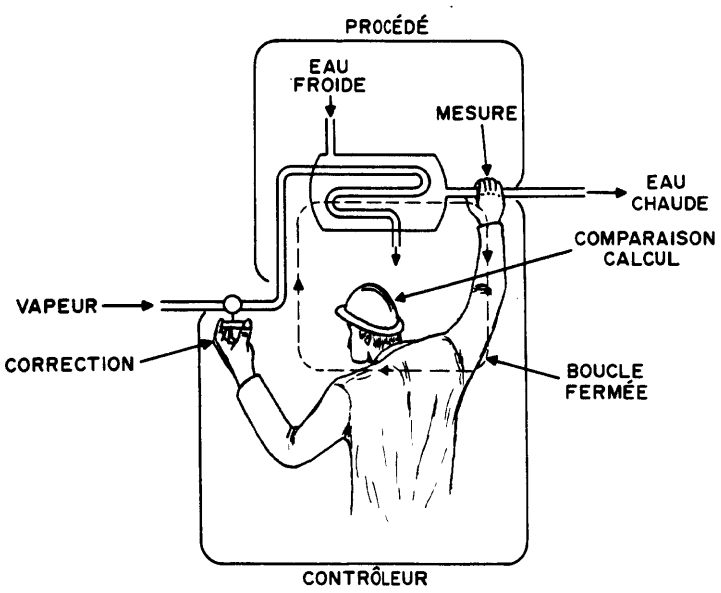


Figure 0-1 L'opérateur joue le rôle de contrôleur dans cette commande de température

Lorsque l'opérateur sent que la température de sortie dévie du point de consigne, il a le choix de réagir de différentes façons. Sa commande peut consister, par exemple, à:

- ouvrir complètement ou fermer complètement la valve;
- ouvrir ou fermer la valve proportionnellement à la déviation;
- ouvrir ou fermer la valve proportionnellement à la vitesse de déviation;
- ouvrir ou fermer la valve à une vitesse proportionnelle à la déviation;
- etc.

Le **mode de commande** détermine la façon que le contrôleur doit réagir à un signal d'erreur. La performance d'un système de commande dépend essentiellement de cette caractéristique. Les principaux modes de commande appliqués aux procédés industriels sont les suivants:

- la commande à deux positions;
- la commande proportionnelle;
- la commande à intégration;
- la commande proportionnelle à intégration;
- la commande à dérivation;
- la commande proportionnelle à dérivation;
- la commande ***p***roportionnelle à ***i***ntégration et ***d***érivation que l'on nomme PID.

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients et doit être choisie en fonction des caractéristiques du procédé contrôlé.

8.2. LA COMMANDE A DEUX POSITIONS :REGULATION TOUT OU RIEN - *TOR*

C'est la commande la plus simple et la plus économique. Le signal de commande offre deux valeurs possibles selon le signe de l'erreur. Il s'agit habituellement d'un signal de type "ON-OFF" c'est-à-dire effectuant la commutation entre puissance zéro et puissance maximale. Électroniquement, un simple comparateur effectue ce type de commande mais on emploie souvent un comparateur à hystérésis (Figure 0-2) pour éviter l'oscillation de la sortie lorsque les signaux comparés ont la même valeur

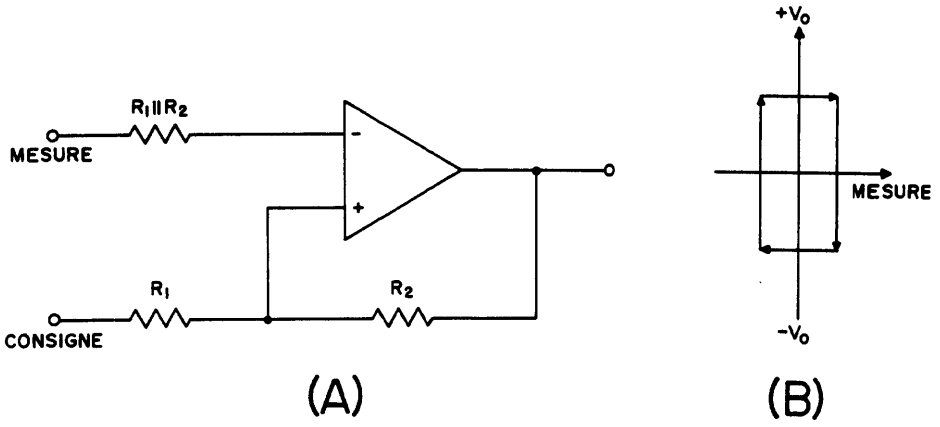


Figure 0-2 Comparateur à hystérésis pour commande à deux positions

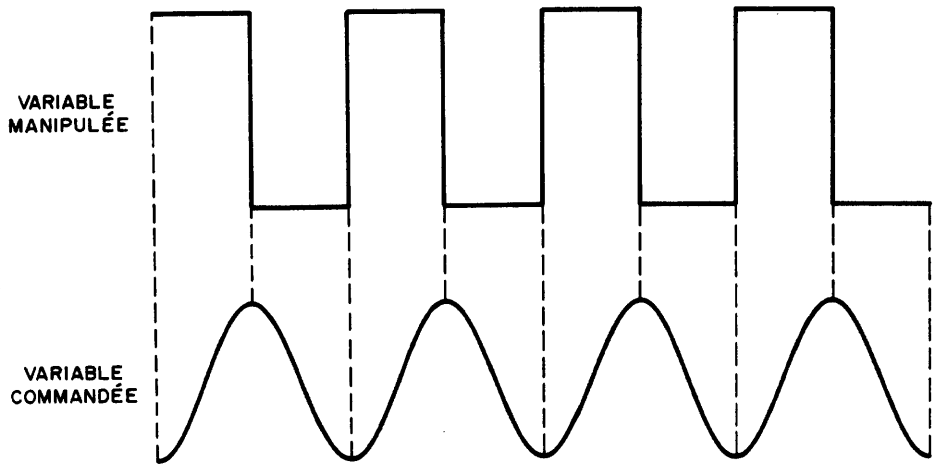


Figure 0-3 Oscillations produites par une commande à deux positions

La commande à deux positions ne parvient jamais à corriger de façon parfaite en raison évidemment de son action excessive. La variable commandée connaît par conséquent des oscillations autour du point de consigne (Figure 0-3). Ces oscillations seront toutefois réduites à une amplitude acceptable si la capacité inhérente au procédé est grande et le temps de transit

court. La capacité a pour effet de ralentir le changement et d'amortir les oscillations et un temps de transit court permet une correction sans trop de retard. D'autre part, l'amplitude des oscillations étant proportionnelle à la quantité d'énergie commutée par le contrôleur, celle-ci ne devra pas être trop élevée.

Le chauffage d'une maison est un procédé auquel la commande à deux positions convient à merveille. La capacité thermique du milieu est grande, le temps de transit relativement faible et le taux de transfert de la chaleur assez lent. La température n'oscille donc que très peu autour du point de consigne et l'extrême lenteur de ces oscillations les rend à peu près imperceptibles.

Un seuil limite la fréquence de commutation du système pour éviter une fatigue prématurée des organes de réglages. Le réglage du régulateur se fait à l'aide de deux paramètres :

- La consigne W, fournie en unité de mesure ;
- Le seuil DIFF, donné généralement en % de la consigne.

Ainsi, dans le cas d'un régulateur à action inverse on a :

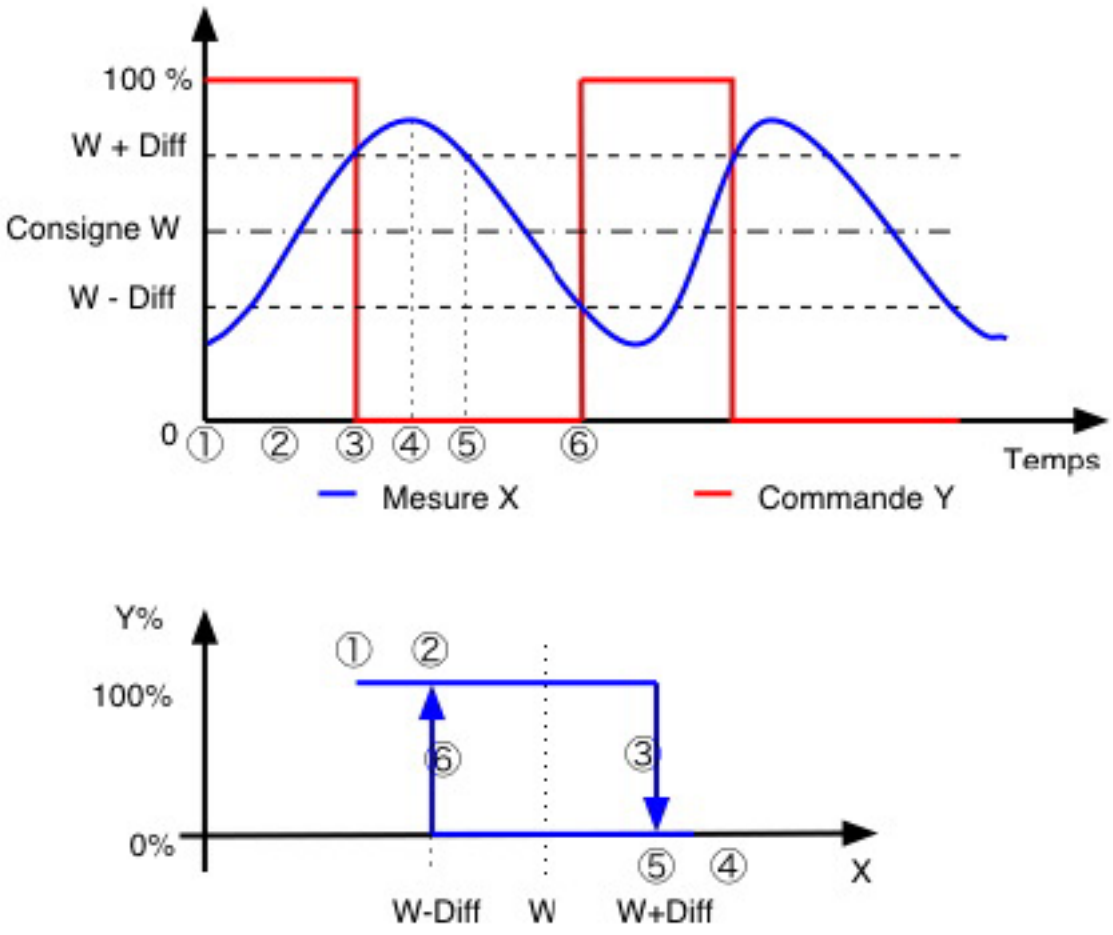


Figure 8-4

La grandeur réglée oscille autour du point de fonctionnement. À chaque dépassement des seuils de commutation, la sortie du régulateur change d'état. Compte tenu de l'inertie du système, la valeur absolue de l'erreur |W-X| dépasse Diff.

Remarques : Sauf exception, la mesure ne peut pas être constante dans ce type de régulation. Le système est en régime d'instabilité entretenu

La valeur du seuil influe sur la fréquence des permutations et l'amplitude de la variation de la grandeur mesurée. Plus le seuil est faible, plus la fréquence est élevée, moins l'amplitude est grande. Une augmentation de la fréquence réduit d'autant la durée de vie de l'organe de réglage.

8.3. ACTION PROPORTIONNELLE

8.3.1 DEFINITION

Une commande proportionnelle produit un signal de correction proportionnel au signal d'erreur. Il existe par conséquent une relation linéaire entre la variable commandée et la variable manipulée Figure 0-4. En effet, plus la variable commandée s'écarte du point de consigne, plus le signal d'erreur augmente et plus la variable manipulée change pour corriger cet écart. Considéré simplement, un contrôleur proportionnel ne fait donc qu'amplifier le signal d'erreur pour l'appliquer à l'élément final Pleine échelle :

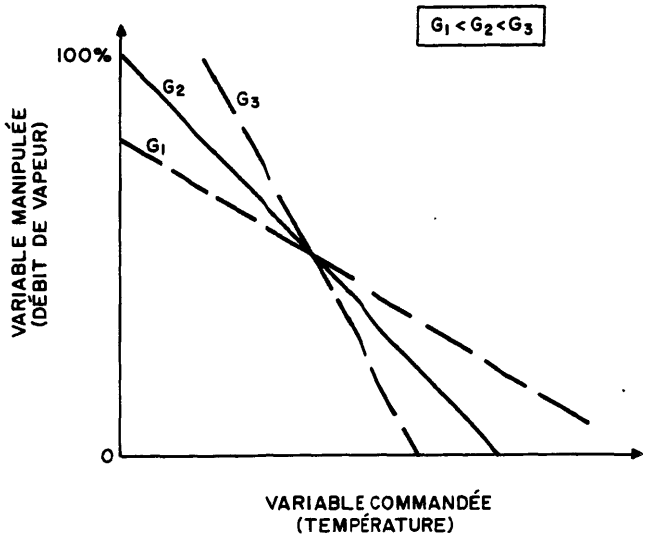


Figure 0-5 La commande proportionnelle possède une caractéristique linéaire

La commande Y du régulateur est proportionnelle à l'erreur (W-X), ceci dans la mesure du possible (Y ne peut être négatif, ou d'une valeur supérieure à 100 %).
Ainsi, dans le cas d'un régulateur à action inverse on a :

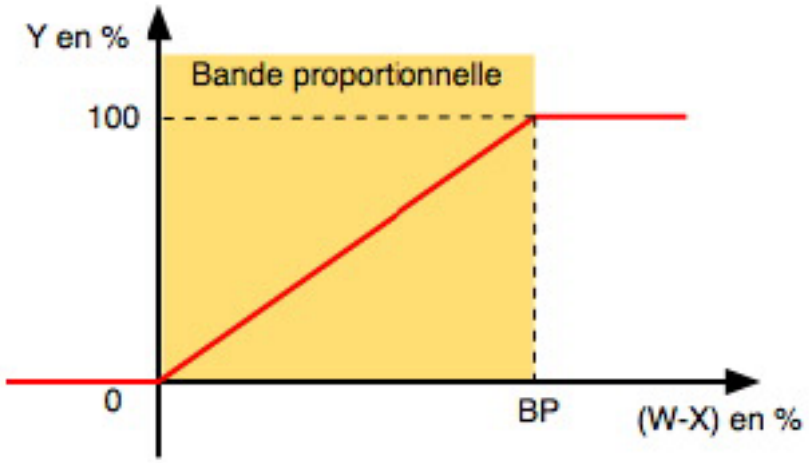


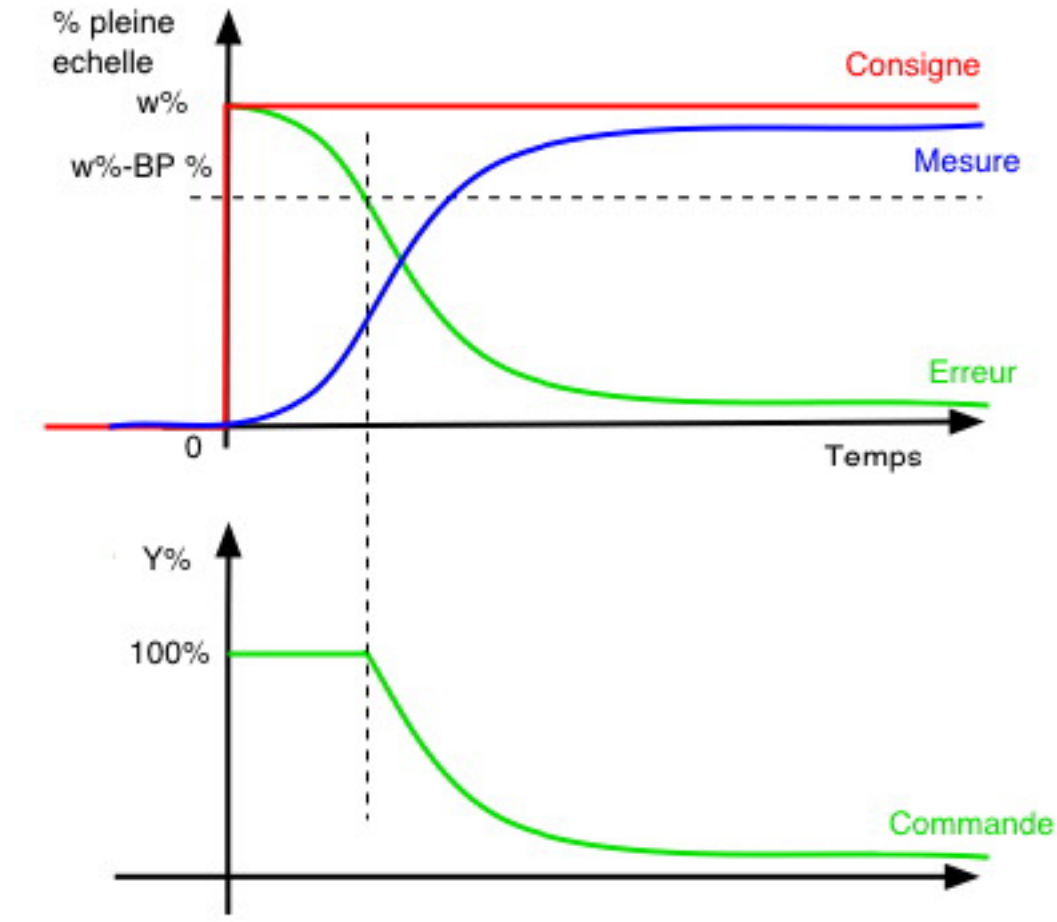
Figure 8-6

Ainsi, dans la partie proportionnelle, appelée bande proportionnelle, on a :

$$Y\% = (W\% - X\%)\frac{100}{BP\%}$$

La consigne W%, la mesure X% et la bande proportionnelle BP%, s'exprime en % de la pleine échelle.

Lors d'une variation en échelon de la consigne, on a



:

Figure 8-7

8.3.2 Influence de la bande proportionnelle

Pour comprendre l'influence de la bande proportionnelle, on s'intéressera au fonctionnement d'un process dont la sortie commande du régulateur à une action directe sur la grandeur réglée.

Comportement statique (fonctionnement en régime permanent) :

On trace la caractéristique statique du système ainsi que la commande en fonction de la mesure sur le même graphe. Le point de fonctionnement correspond à l'intersection de ces deux courbes. On s'aperçoit alors graphiquement que plus la bande proportionnelle est petite, plus l'erreur en régime permanent est petite. Dans le graphe ci-dessous, BP1 < BP

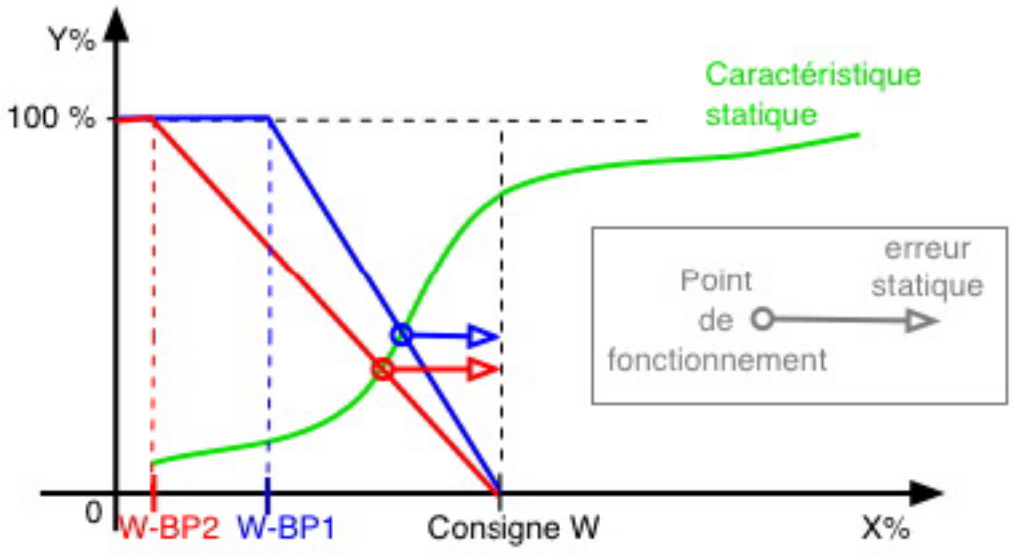
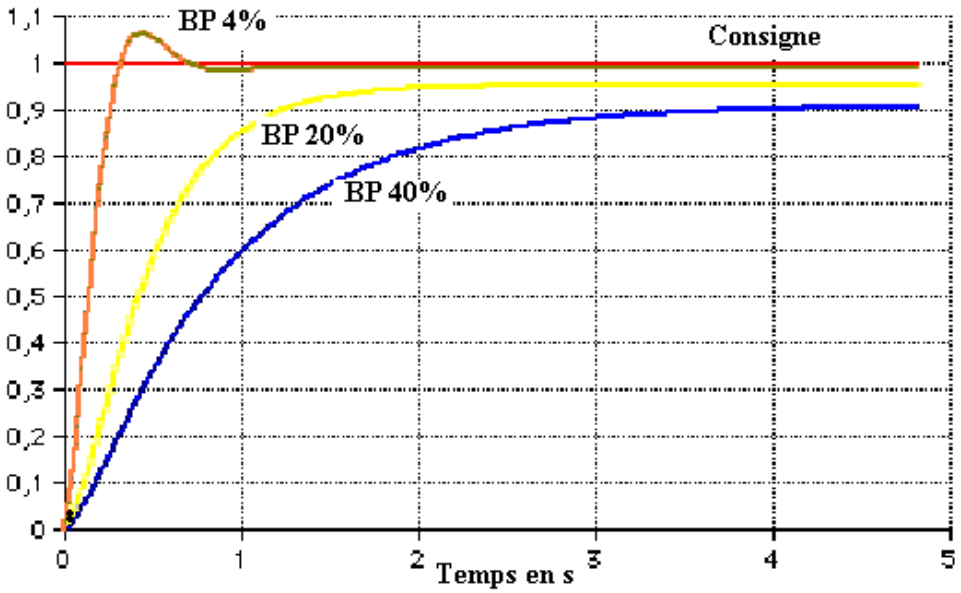


Figure 8-8

b. Comportement dynamique (fonctionnement en régime transitoire) :

Plus la bande proportionnelle est petite, plus le temps de réponse du système est petit. En effet, pour la même erreur, la puissance fournie est plus importante qu'avec une bande proportionnelle plus importante.
Si la bande proportionnelle se rapproche de 0, le système devient instable. En effet, un fonctionnement en T.O.R. correspond à une bande proportionnelle nulle.



Influence de la bande proportionnelle

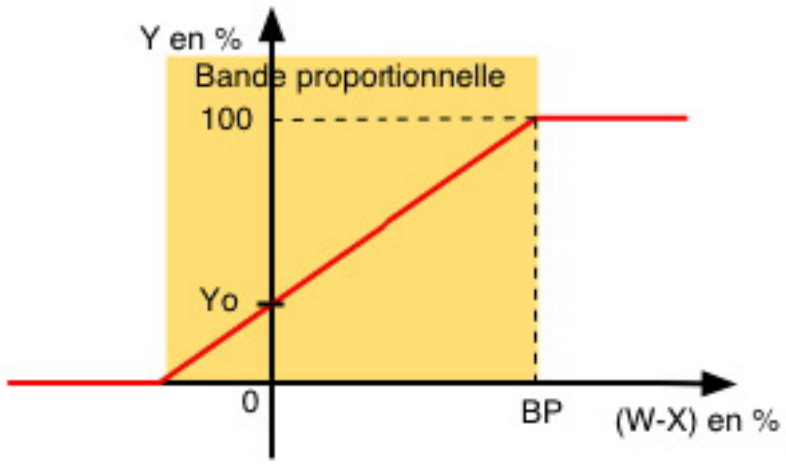
Figure 8-9

8.3.3 Décalage de bande - Talon - Intégrale manuelle

Da manière plus générale, la formule qui relie la sortie Y% du régulateur à la différence entre la mesure et le consigne est :

$$Y\% = (W\% - X\%)\frac{100}{BP\%} + Yo\%$$

Avec Yo, un paramètre à régler sur le régulateur : le décalage de bande.
Ainsi, pour un régulateur à action inverse :



8.3.4 Influence du décalage de bande

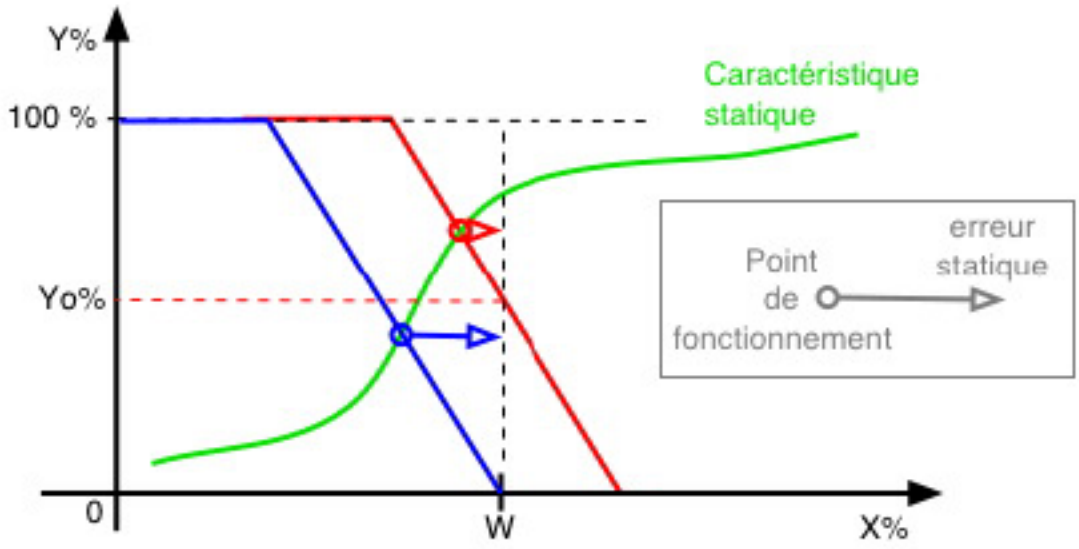


Figure 8-10

Sur la figure 8-10 on s'aperçoit qu'avec un bon choix de la valeur du décalage de bande, on réduit très fortement l'erreur statique. L'influence sur le comportement en régime transitoire est principalement fonction de la caractéristique statique.

8.3.5 Représentation fonctionnelle d'une régulation proportionnelle

Dans le cas d'une régulation à action inverse, on peut représenter le régulateur dans un schéma fonctionnel de la manière suivante :

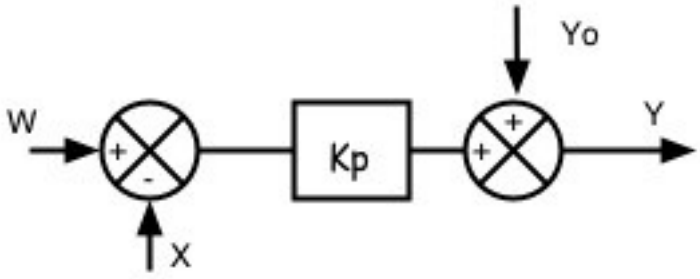


Figure 8-11

Kp = Gain du système. Kp = 100/BP, si le système fonctionne dans la bande proportionnelle.
Yo = Décalage de bande.

Comparaison avec intégrale manuelle

On a vu dans le paragraphe précédant l'utilité de l'intégrale manuelle. Pourquoi ne pas choisir le point d'intersection entre la caractéristique statique et celle du régulateur, comme valeur de talon ? Le système fonctionnerait alors avec une erreur statique nulle.

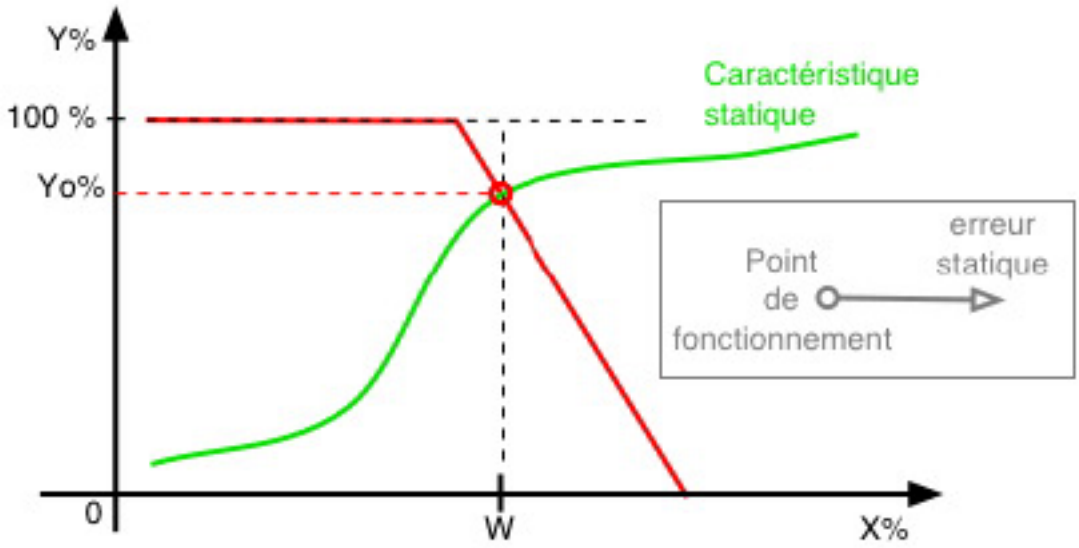


Figure 8-12

Parce que :

- Si la valeur de la consigne change, l'erreur statique ne sera plus nulle.

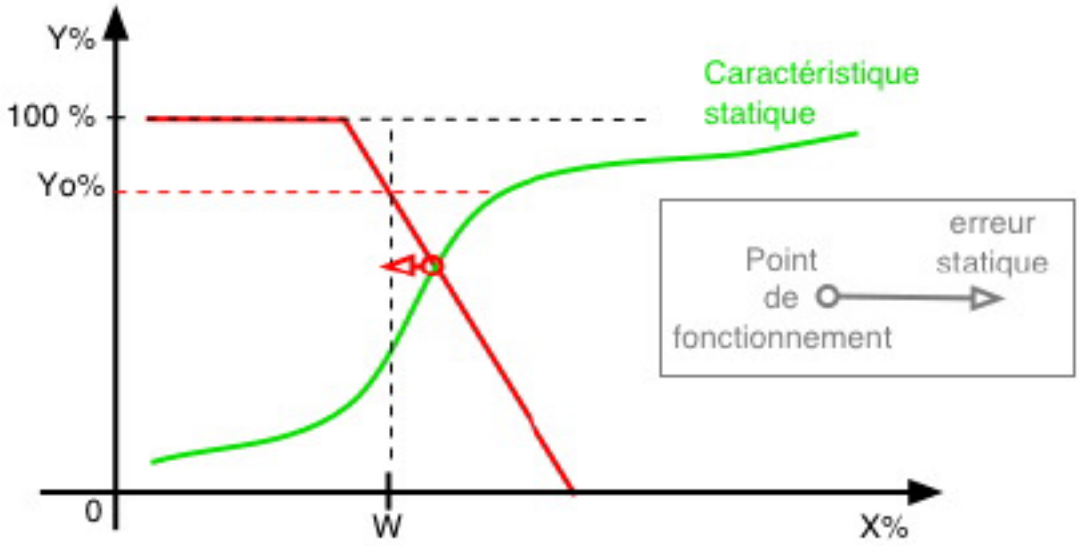


Figure 8-13

- La caractéristique statique peut se déplacer sous l'effet d'une grandeur perturbatrice.

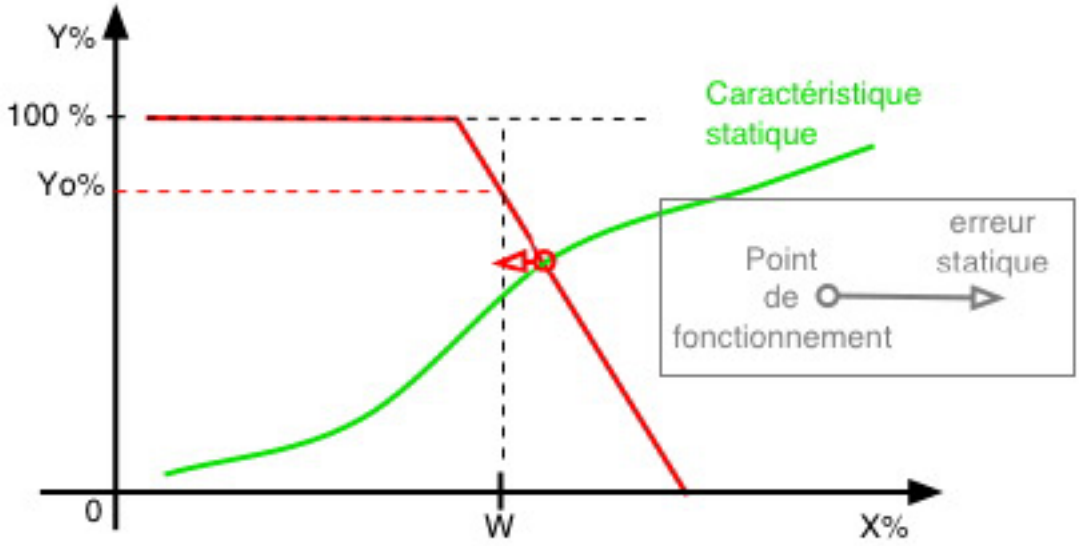


Figure 8-14

On s'aperçoit alors qu'il serait bien d'avoir une action de type décalage qui évolue dans le temps ; c'est l'action intégrale.

8.4. QU'EST-CE QU'UNE ACTION INTEGRALE ?

L'**action intégrale** fait augmenter ou diminuer la variable manipulée à une vitesse proportionnelle au signal d'erreur. Par conséquent, si l'erreur est faible, le débit de vapeur (Figure 0-1) varie lentement dans la bonne direction pour la réduire à zéro;
On veut :

- Une action qui évolue dans le temps ;
- Une action qui tend à annuler l'erreur statique ;

Cette fonction est remplie par l'opérateur mathématique : 'intégral par rapport au temps'. Ainsi, dans un régulateur, on définie l'action intégrale à partir d'un des deux paramètres Ti ou Ki avec :

$$s(t) = Ki \int_{to}^{t} e(u)du = \frac{1}{Ti} \int_{to}^{t} e(u)du$$

Ti est le temps intégral, définie en unité de temps. Ki le gain intégral, définie en coup par unité de temps.

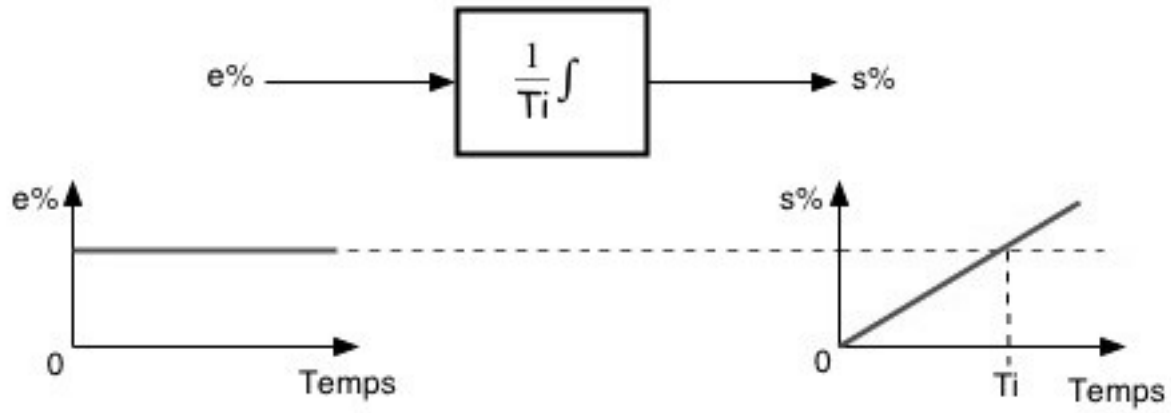
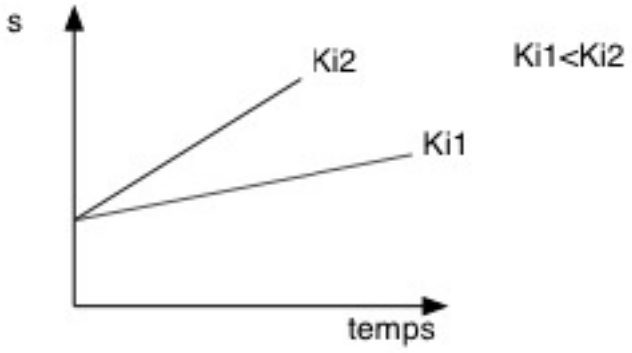


Figure 8-15

s et e sont exprimés en %. Si e est constant, le temps intégral Ti correspond au temps nécessaire pour que la variation s = e.

Fonctionnement

Pour étudier l'influence de l'action intégrale, on s'intéressera à la réponse du module intégral à un échelon. Plus Ki est grand (Ti petit), plus la valeur de décalage augmente rapidement.



L'avantage majeur offert par la commande à intégration réside dans le fait qu'une correction s'effectue aussi longtemps que l'erreur existe. Cette propriété a pour effet de réduire l'erreur résiduelle à zéro. Ainsi, la variable commandée revient exactement à la valeur de consigne lorsque l'action corrective cesse.

Annuler l'action intégrale

Pour annuler l'action intégrale, il existe plusieurs solutions en fonction du régulateur. Si, on règle l'action intégrale à l'aide du gain Ki, il suffit de mettre Ki à zéro. Dans le cas où le réglage du gain intégral se fait à l'aide du temps Ti, il y a deux solutions :

- Mettre Ti à zéro, si c'est possible ;
- Sinon mettre Ti à sa valeur maximale. Si le correcteur est coopératif, il indiquera supp.

Action conjuguée P + I

La commande à intégration est rarement employée seule mais plutôt en association avec la commande proportionnelle. Cette association permet de bénéficier de la rapidité d'action de la commande proportionnelle et de l'absence d'erreur résiduelle de la commande à intégration. La meilleure façon d'en comprendre le mécanisme consiste à visualiser séparément les effets de chaque composante dans un système en boucle ouverte (voir la Figure 0-16).

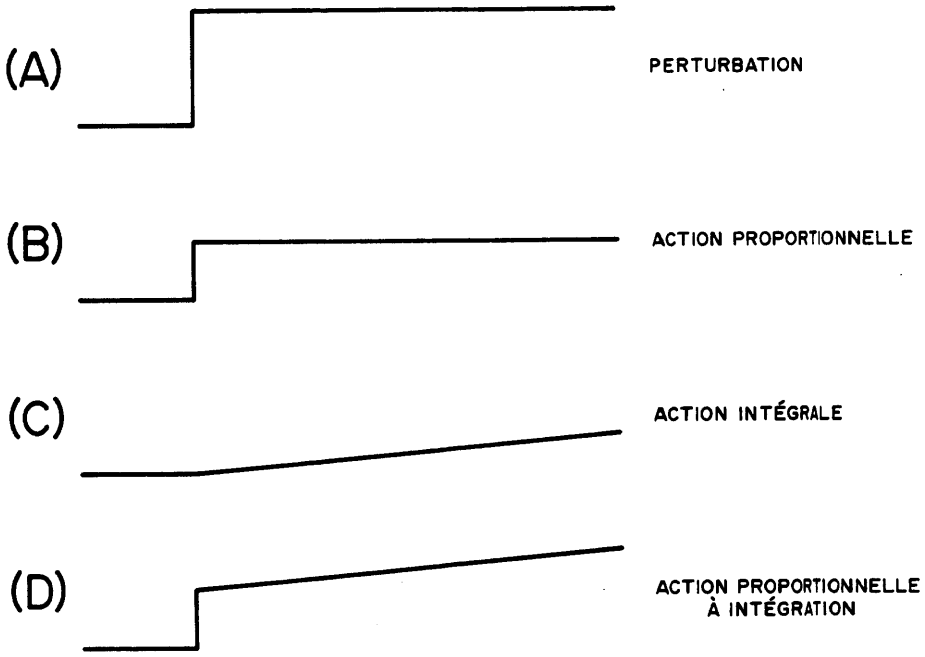


Figure 0-16 Réponse d'une commande proportionelle à intégration

La courbe B montre la réaction instantanée de la composante proportionnelle à la suite d'une perturbation (courbe A). La courbe C montre le taux constant de correction effectué par la partie intégrale face à la même perturbation. La courbe D, qui représente la somme des composantes, illustre un changement rapide de la variable manipulée se poursuivant ensuite à taux constant.

La Figure 0-17 illustre maintenant l'effet réel obtenu dans un système qui s'auto-corrige. La courbe B illustre la correction proportionnelle qui suit fidèlement la déviation de la variable commandée (courbe E). Enployée seule, la commande proportionnelle laisserait une erreur résiduelle. Cependant, on observe ici que la variable commandée revient exactement à la valeur de consigne à la fin de la correction. Cela est dû à la composante intégrale (courbe C) qui continue d'agir tant que l'erreur persiste. La courbe D montre l'effet résultant sur la variable manipulée: une correction rapide imputable à la partie proportionnelle complétée d'une correction additionnelle due à la partie intégrale et qui finalise le travail.

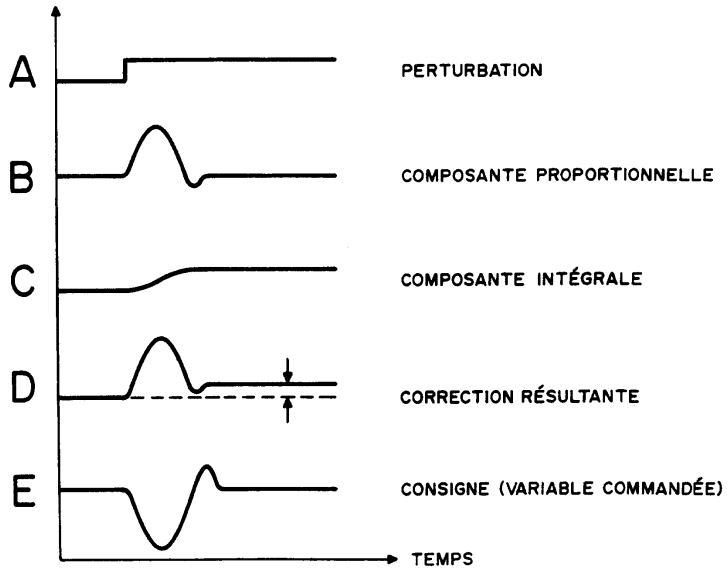


Figure 0-17 Résultat d'une correction par une commande proportionnelle à intégration

La partie intégrale produit en quelque sorte une recalage automatique (reset) similaire au recalage manuel que l'on devrait faire pour annuler l'erreur résiduelle dans une commande proportionnelle (C'est pourquoi la commande à intégration porte également le nom "reset control" en anglais.

Un signal de commande proportionnel à intégration peut être réalisé, à partir du signal d'erreur, à l'aide du montage illustré à la Figure 0-18. La boucle de feedback de cet amplificateur combine un élément résistif R_i pour la partie proportionnelle à un élément capacitif (C_i) pour la partie intégrale. Puisque ces éléments forment un circuit série, leurs effets individuels sur la caractéristique du montage s'additionnent tout simplement..

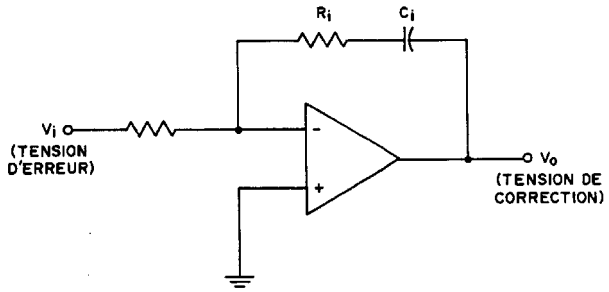


Figure 0-18 Contrôleur électronique pour commande proportionnelle à intégration

La commande à intégration a tendance à produire des oscillations de la variable commandée. En effet, si le temps de transit est le moindrement long, le contrôleur corrige avec beaucoup d'excès étant donné que la variable manipulée évolue à vitesse croissante ou décroissante. Cet inconvénient se reflète dans les performances de la commande proportionnelle à intégration, ce qui oblige à une réduction du gain de la composante proportionnelle. Cette réduction affecte évidemment la réponse aux perturbations rapides. Cependant on choisit ce type de commande lorsque toute erreur résiduelle est inacceptable. Le couple, Bande Proportionnelle - Temps Intégral, définit deux types de fonctionnement :

- Fonctionnement série ; Les deux corrections sont branchées en série :

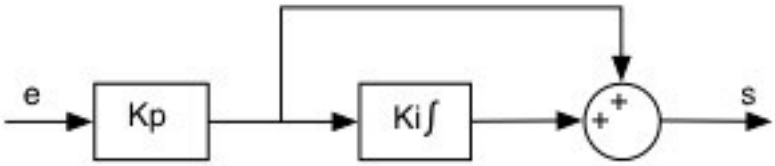


Figure 8-19

- Fonctionnement parallèle ; Les deux corrections sont branchées en parallèles :

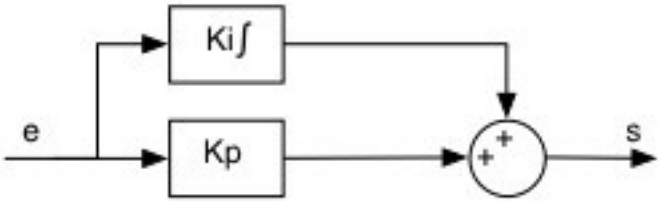


Figure 8-20

Conséquences : Dans un régulateur série, la modification de la bande proportionnelle, entraîne la modification de l'influence du gain intégral. Avant de procéder au réglage du régulateur, il est nécessaire de connaître sa structure interne.

Influence du paramètre temps intégral

Comportement statique : Comme prévu, en statique, quelle que soit la valeur de l'action intégrale, l'erreur statique est nulle (si le système est stable).

Comportement dynamique :

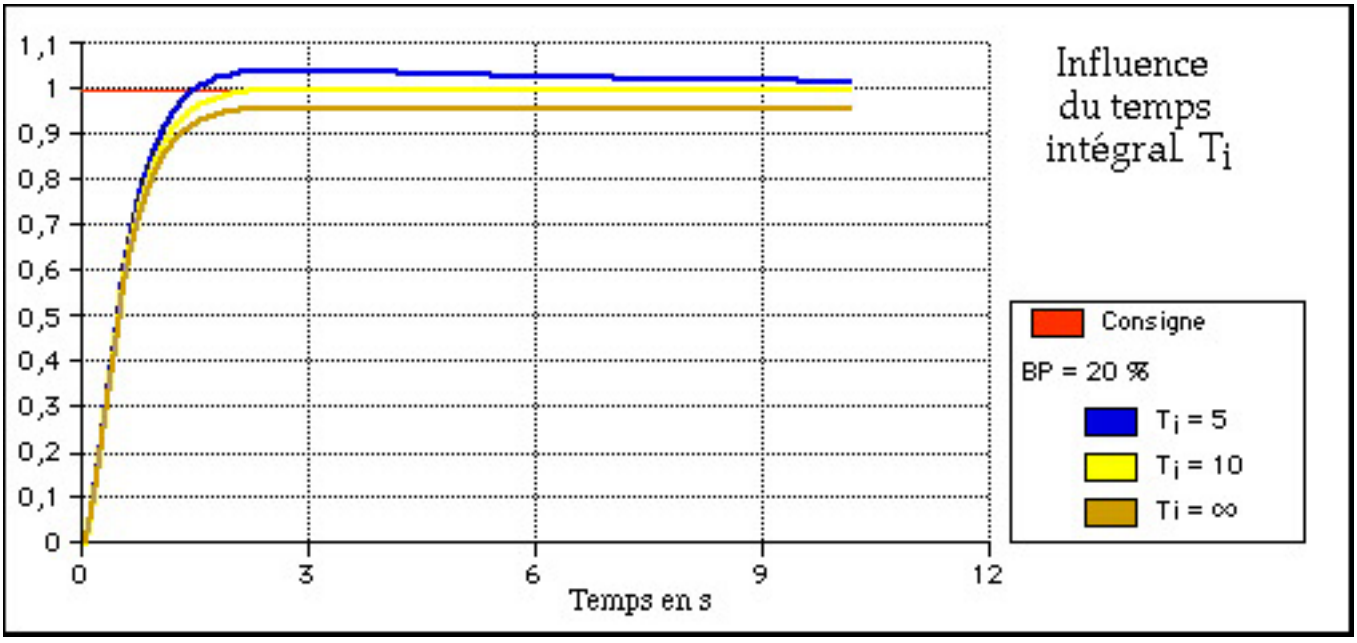


Figure 8-21

Si le temps intégral se rapproche de zéro, le système devient instable.

8.5. ACTION DERIVEE

L'action à dérivée ("pre-act", en anglais) génère un signal de correction dont la valeur est proportionnelle à la vitesse de changement du signal d'erreur. L'erreur doit varier pour donner lieu à une correction. Une erreur qui demeure fixe n'engendre pas de correction même si sa valeur est considérable. Pour cette raison, la commande à dérivation n'est jamais employée seule.

La réponse de cette commande apparaît à la Figure 0-2222. On voit que la valeur du signal de correction est proportionnelle à la pente du signal d'erreur, théoriquement infinie pour une variation instantanée. En outre, sa polarité dépend du sens de la variation.

Le circuit qui effectue ce traitement apparaît à la Figure 0-.

Dans ce circuit, une tension V_i progressant à taux constant, donne naissance à un courant fixe dans le condensateur, en vertu de la loi :

$$i = \frac{c * \Delta V}{\Delta t}$$

Equation 0-1

Ce courant passe par la résistance et y établit une chute de tension qui forme le signal de sortie. Une tension d'entrée fixe n'affecte pas la charge du condensateur et se traduit par une absence de courant et de tension à la sortie.

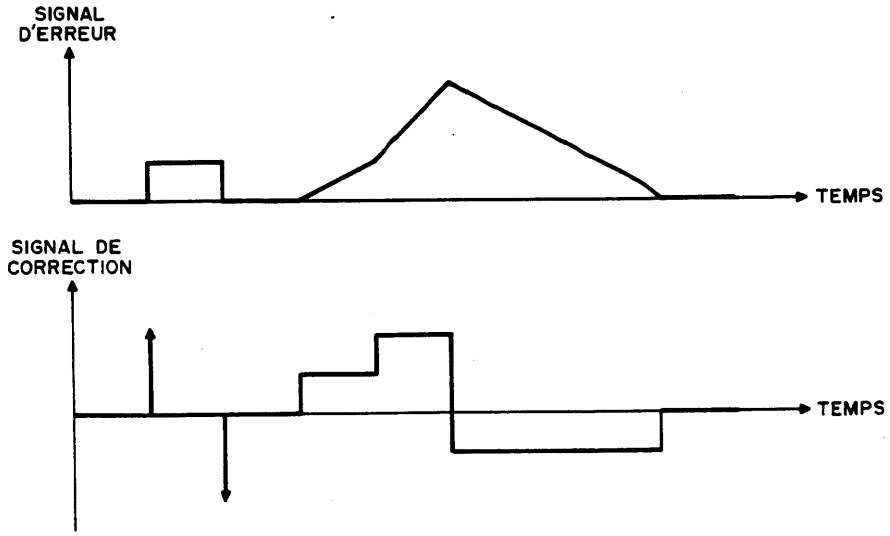


Figure 0-22 Réponse d'un différentiateur

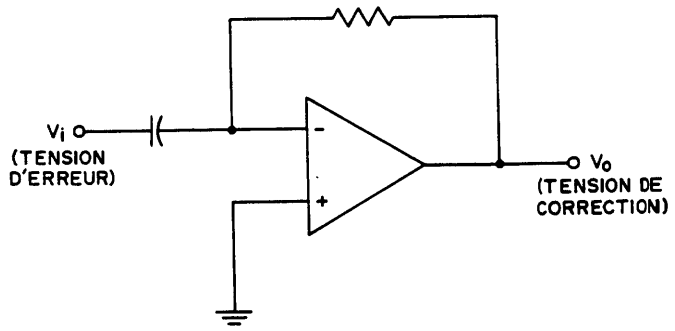


Figure 0-23 Circuit différentiateur

Pour comprendre l'utilité d'une commande à dérivation, il faut voir son action comme une anticipation de la valeur future du signal d'erreur. La Figure 0-24 explique cette idée. Puisque la valeur du signal correctif est proportionnelle à la vitesse de changement du signal d'erreur plutôt qu'à son amplitude, une correction proportionnelle est générée bien avant que la déviation correspondante ne soit atteinte. Ainsi, en t_o apparaît déjà une correction visant à éliminer la déviation anticipée pour l'instant t_1. Cette anticipation fait reprendre au système le retard causé par le temps de transit. Aussi, un système à boucle fermée qui possède cette caracté- ristique est excellent pour enrayer les changements soudains de la variable commandée ainsi que les oscillations.

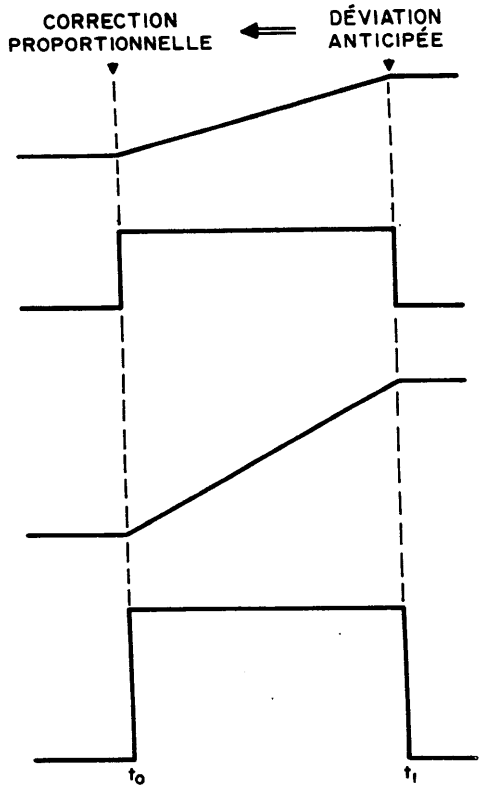


Figure 0-24 La commande à dérivation anticipe une déviation

C'est une action qui amplifie les variations brusques de la consigne. Elle a une action opposée à l'action intégrale.
Cette fonction est remplie par l'opérateur mathématique : 'dériver par rapport au temps'. Ainsi, dans un régulateur, on définie l'action dérivé à partir du temps dérivé Td avec :

$$s(t) = Td \frac{de}{dt}(t)$$

Le temps dérivé Td est définie en unité de temps.

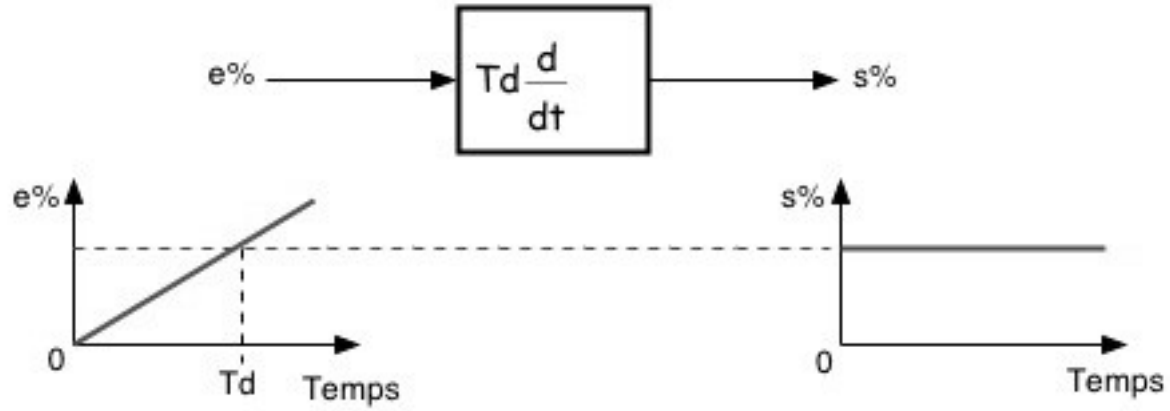


Figure 8-25

Td est le temps pour que e = s si s est constant

Fonctionnement

Pour étudier l'influence de l'action dérivée, on s'intéressera à la réponse du module dérivé à une rampe. Plus Td est grand, plus la valeur de la sortie est importante.

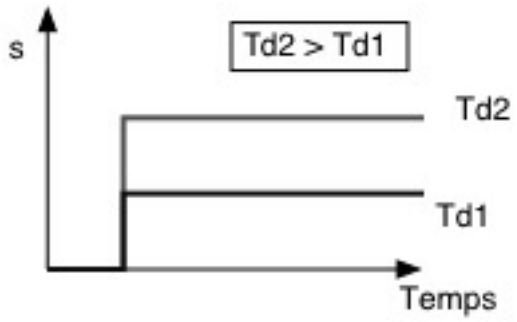


Figure 8-26

Annuler l'action dérivée

Pour annuler l'action dérivé, il suffit de mettre Td à zéro

Actions conjuguées P + I + D

Le régulateur ne fonctionne pas en action dérivé pure (trop instable). Il fonctionne en correcteur Proportionnel Intégral Dérivé (PID). Le triplet, Bande Proportionnelle - Temps Intégral - Gain dérivé, définit trois types de fonctionnement :

- Fonctionnement série ; Les trois corrections sont branchées en série :

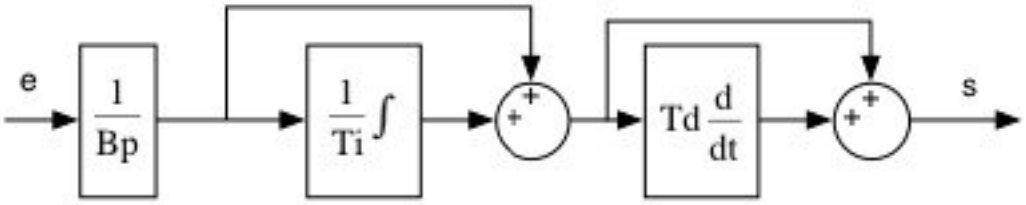


Figure 8-27

- Fonctionnement parallèle ; Les deux corrections sont branchées en parallèles :

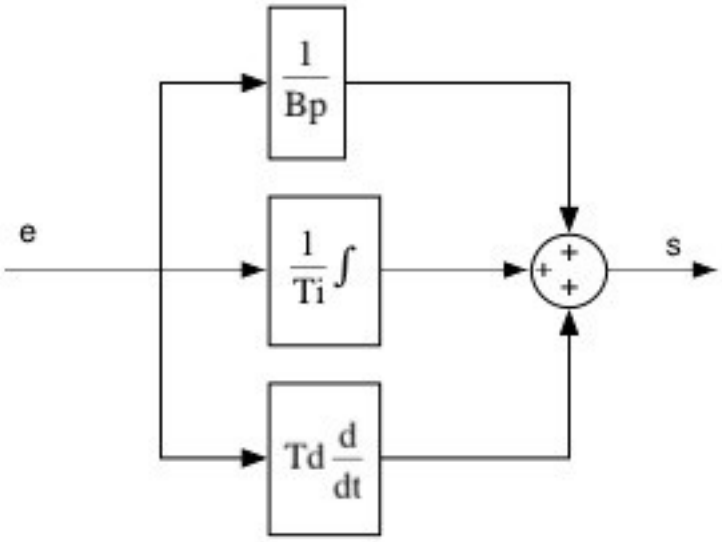


Figure 8-28

- Fonctionnement mixte ;

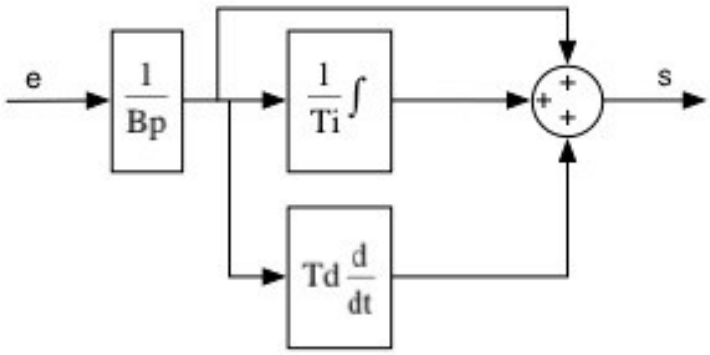


Figure 8-29

Influence du paramètre temps dérivé

Comportement statique : Aucune influence.

Comportement dynamique :

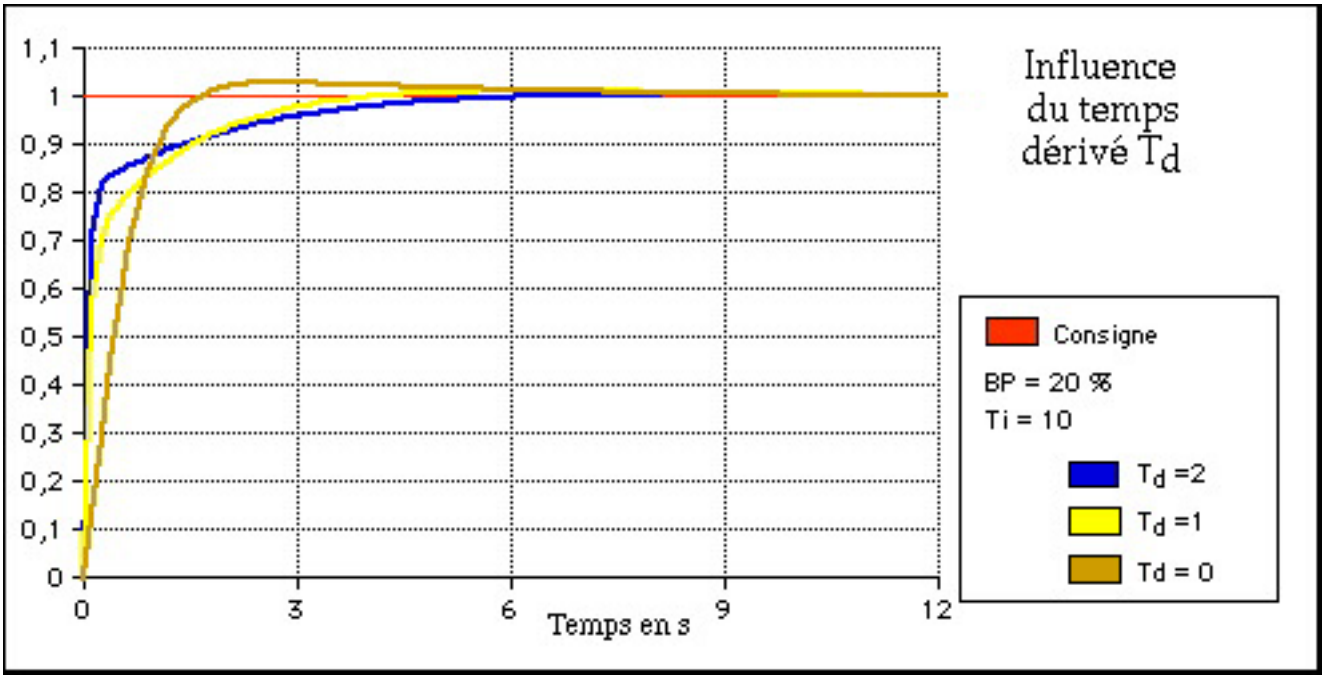


Figure 8-30

8.6. RESUME DES ACTIONS DES CORRECTIONS P, I ET D

Correcteur	Paramètres	Unité	Influence (si décroît)	Système instable si
Proportionnel	Bp	% de l'étendue de mesure	Diminue erreur statique Diminue temps de réponse Augmente dépassement Diminue stabilité	Trop faible
Intégral	Ti	Temps : s, min	Annule erreur statique Augmente stabilité	Trop faible
Dérivé	Td	Temps	Augmente temps de réponse	Trop élevé

8.7. METHODES SIMPLES DE DETERMINATION DES ACTIONS PID

8.7.1. Principes fondamentaux

Dans le cas général, le réglage d'une boucle de régulation se fait en trois étapes.

- Étape 1 :Relevé de caractéristiques du système. Ces relevés se font soit en boucle ouverte soit en boucle fermée.
- Étape 2 : Détermination des paramètres représentants le système dans le modèle choisi.
- Étape 3 : À l'aide des paramètres, calcul du correcteur PID.

8.7.2. La commande proportionnelle à dérivation

La caractéristique de dérivation est ajoutée à une commande proportionnelle lorsque celle-ci doit contrer des perturbations importantes et soudaines. Elle a pour effet de limiter la déviation maximale ainsi que les oscillations. Etant donné son pouvoir stabilisateur, on peut augmenter le gain de la composante proportionnelle et donc réduire le décalage résiduel.

La réaction du procédé à une augmentation soudaine de la charge est décrite à la Figure 0-319. La courbe B montre la composante proportionnelle, la courbe C, la composante de dérivation. Lorsque la variable commandée (courbe E) commence à diminuer, son taux de changement rapide donne lieu à une action dérivée importante, qui baisse par la suite lorsque la diminution se fait de moins en moins rapide. Durant cette phase, l'action dérivée travaille dans le même sens que l'action proportionnelle, contre la diminution de la variable commandée. Cependant, lorsque celle-ci commence à revenir vers la consigne, l'inversion du taux de changement inverse le sens de l'action dérivée, celle-ci s'opposant alors à l'augmentation. L'action dérivée limite alors l'action proportionnelle à un degré juste suffisant pour prévenir le dépassement de la consigne et l'oscillation qui pourrait en résulter (courbe D).

Le contrôleur proportionnel à dérivation est illustré à la Figure 0-3210. Dans ce circuit, les résistances R_1 et R_2 établissent un gain pour la composante proportionnelle. La présence du condensateur C_d ajoute une composante de dérivation dans la jonction de transfert. La résistance R_3 a pour rôle de limiter la pente théoriquement infinie qui se produirait en régime de signaux rapides. Cette limitation rend le système moins sensible aux impulsions parasites qui se produisent fréquemment et qui seraient très nuisibles dans le cas d'une commande à dérivation.

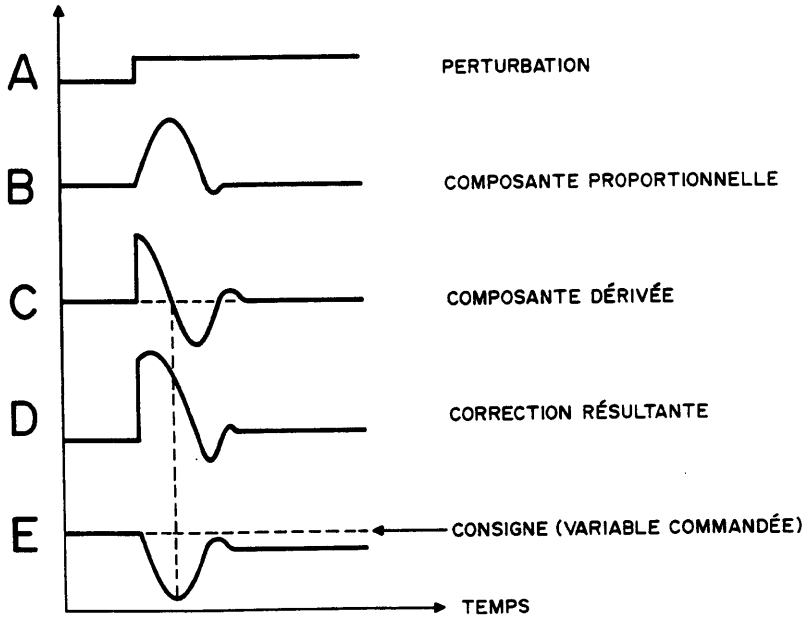


Figure 0-319 Résultat d'une correction par une commande proportionnelle à dérivation

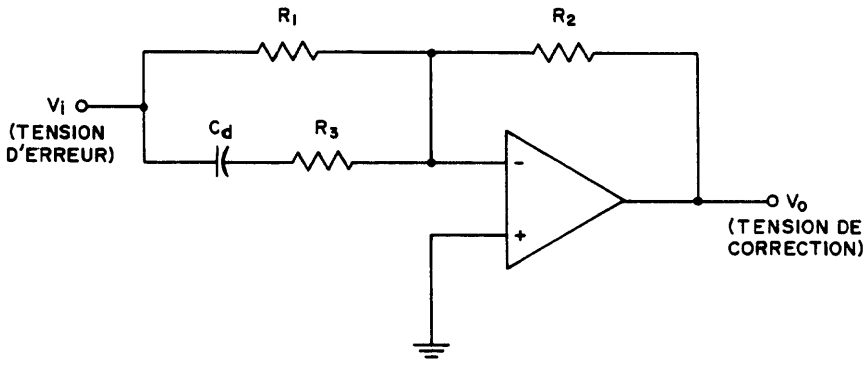


Figure 0-3210 Contrôleur électronique pour commande proportionnelle à dérivation

Dans ce circuit (Figure 0-32102), le courant de R_2, qui détermine la tension de sortie, est donc la somme du courant de R_1, proportionnel à la tension d'entrée, et du courant de C_d, proportionnel au taux de changement de la tension d'entrée.

8.7.3. La commande proportionnelle à intégration et dérivation (PID)

Il ne reste qu'à ajouter la caractéristique d'intégration au mode de commande précédent pour obtenir un système capable de corriger les perturbations fortes et soudaines tout en éliminant l'erreur résiduelle. Autrement dit, ce système combine tous les types de commandes et profite de leurs avantages respectifs. L'analyse d'une perturbation, illustrée à la Figure 0-11, montre la composante intégrale et son effet sur l'action résultante c'est-à-dire l'élimination du décalage résiduel. La Figure 0-12 illustre le contrôleur électronique correspondant.

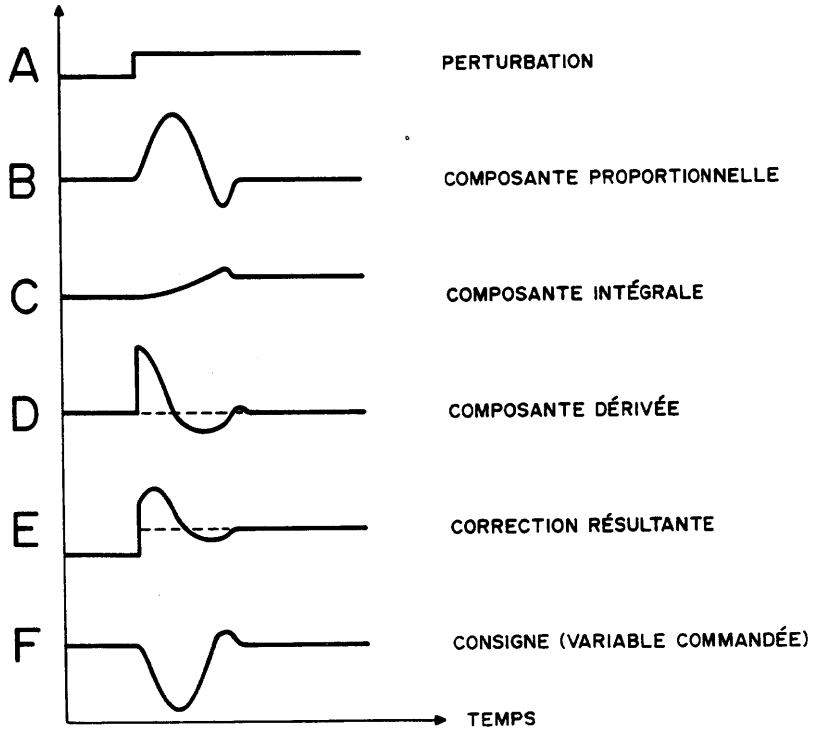


Figure 0-11 Résultat d'une correction par une commande proportionnelle à intégration et dérivation

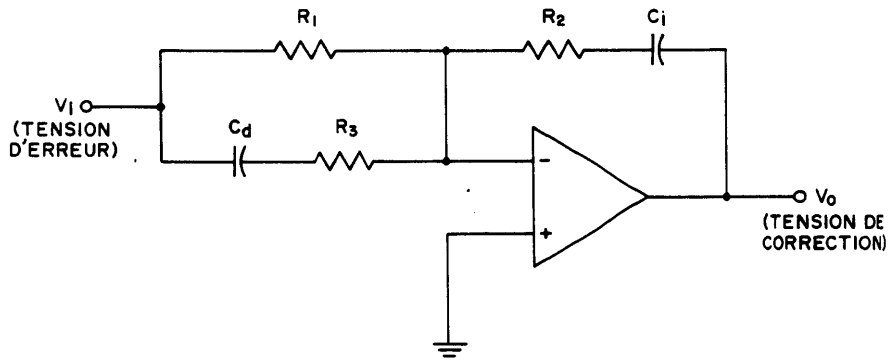


Figure 0-12 Contrôleur électronique pour commande proportionnelle à intégration et dérivation

8.8 TABLEAU RECAPITULATIF

Les descriptions précédentes n'ont pas comme but de vous rendre capable de choisir un mode de commande en fonction de conditions données. Par contre, nous aimerions que vous soyez en mesure de les reconnaître si jamais l'occasion de travailler sur des systèmes de commande vous est offerte. Il ne faut pas perdre de vue que chaque mode de commande peut s'appliquer à toutes sortes de procédés: commande de température, de vitesse, de position, etc. D'une façon très générale et très approximative, nous présentons le Tableau 0-3 qui situe chaque mode de commande en fonction des conditions à supporter.

Tableau 0-3 Les modes de commande en fonction des conditions à supporter

Mode de commande	Constante RC		Temps de transit	Variations de charges	
	Ordre	Grandeur		Ampleur	Vitesse
Deux positions	1	Modérée-élevée	Court	Toutes	Toutes
Flottante	1	Basse	Court	Toutes	Lente
À intégration	1	Basse	Court	Toutes	Modérée
Proportionnel	2 ou plus	Modérée	Court	Faible	Modérée
Proportionnel à dérivation	2 ou plus	Basse-élevée	Court	Faible	Toutes
Proportionnel à intégration	2 ou plus	Basse-élevée	Court-moyen	Forte	Lente-modérée
Proportionnel à intégration et à dérivation	2 ou plus	Basse-élevée	Court	Forte	Rapide
Proportionnel large bande avec intégration rapide	Tous	Basse	Court-moyen	Toutes	Toutes

9 Les techniques de mise au point du régulateur

La mise au point d'un contrôleur consiste à faire des compromis afin d'obtenir la réponse désirée selon un critère de qualité choisi. Donc, il s'agit de trouver le point d'équilibre entre les caractéristiques qui influencent le régime transitoire du procédé:

- la stabilité du procédé;
- l'erreur maximale;
- le temps de rétablissement désiré.

Bien qu'il existe plusieurs méthodes de réglage des paramètres d'un contrôleur, il est possible de rencontrer un critère de performance donné en effectuant:

- la mise au point du régulateur avec le test de la réponse à l'échelon (méthode conseillée pour les procédés lents);
- la mise au point du régulateur à l'aide de la fréquence naturelle d'oscillation (méthode conseillée pour les procédés rapides).

9.1. METHODES SIMPLES DE DETERMINATION DES ACTIONS PID

9.1.1. PRINCIPES FONDAMENTAUX

Dans le cas général, le réglage d'une boucle de régulation se fait en trois étapes.

- Étape 1 :Relevé de caractéristiques du système. Ces relevés se font soit en boucle ouverte soit en boucle fermée.
- Étape 2 : Détermination des paramètres représentants le système dans le modèle choisi.
- Étape 3 : À l'aide des paramètres, calcul du correcteur PID.

9.2. LA MISE AU POINT AVEC LE TEST DE LA REPONSE A L'ECHELON

Afin d'extraire les caractéristiques du procédé, qui sont nécessaires à la mise au point du contrôleur, il est possible d'effectuer le test de la réponse à l'échelon.

Ce test, qui doit être réalisé en boucle ouverte, consiste à imposer une variation instantanée au signal qui pilote l'élément final de commande et d'observer ensuite le comportement de la variable commandée. Après la stabilisation du système, il faut imposer une seconde variation au signal de l'élément final mais, cette fois, le saut doit être de signe contraire (on revient ainsi à l'état initial). Pour que le test soit valide, il est nécessaire que le saut imposé modifie le procédé d'un état stable à un second état stable. Afin d'analyser les résultats ultérieurement, il est judicieux de posséder un enregistreur graphique qui inscrit sur papier tous les détails du test.

Le schéma de principe d'un système asservi en boucle ouverte est présenté à la Figure 6-16 et la méthodologie de la réponse à l'échelon est détaillé à la Figure 6-17.

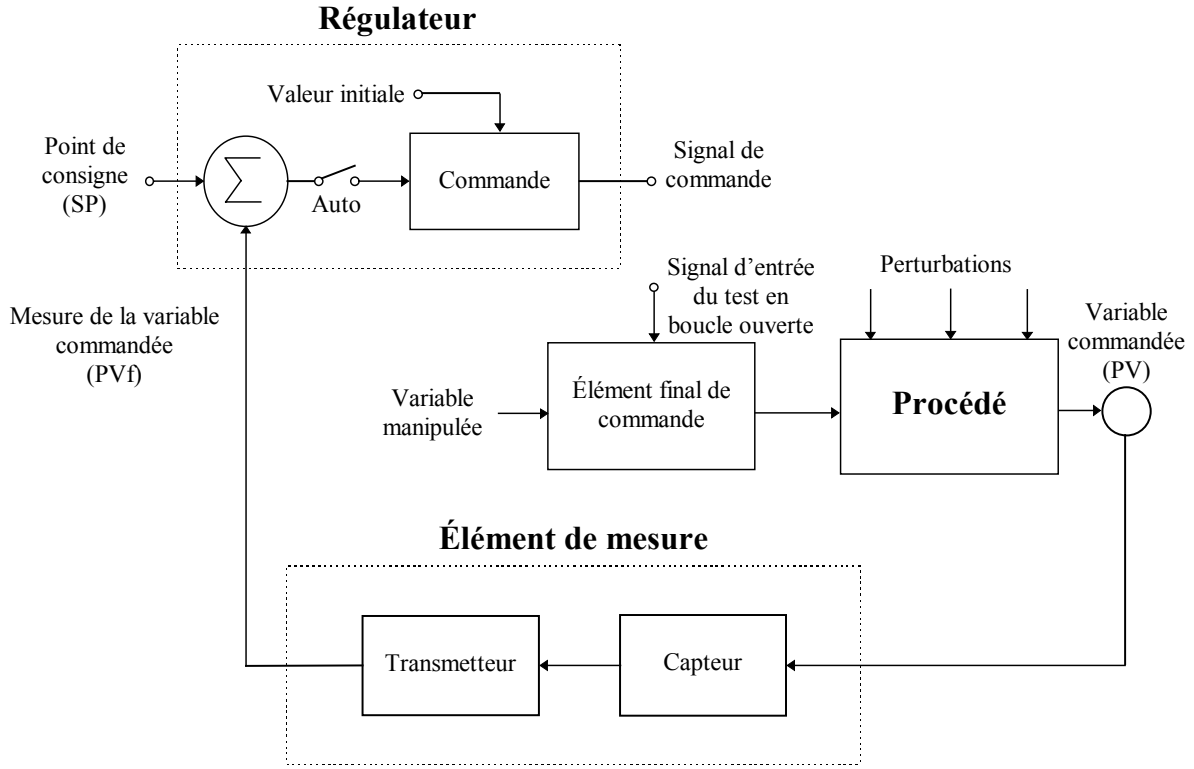


Figure 0-1 Système asservi industriel en boucle ouverte

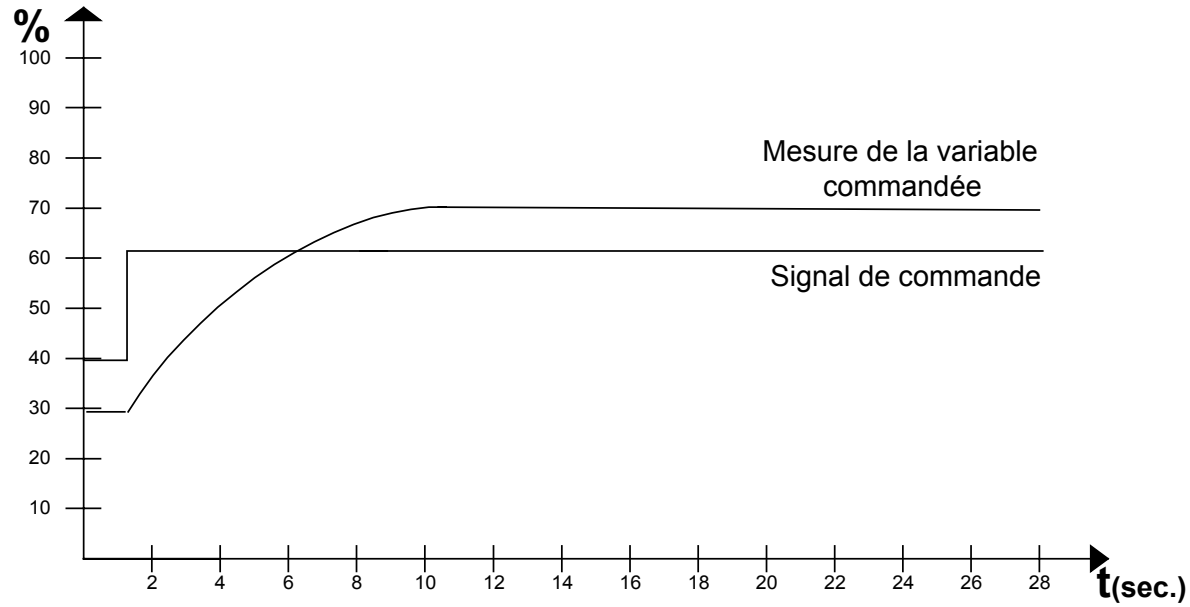


Figure 0-2 Réponse à l'échelon

La réponse à l'échelon nous renseigne sur les informations suivantes:

- le gain du procédé;
- la constante de temps;
- le temps de délai.

Ces valeurs sont importantes puisqu'elles permettent de prédire le comportement du procédé et de procéder à la mise au point du contrôleur.

9.2.1. Le gain de procédé

Le gain du procédé est le rapport entre la variation de la grandeur mesurée et la variation du signal de commande.

$$Gp = \frac{\text{variation du signal mesuré (\% Pvf)}}{\text{variation du signal de commande (\%)}}$$

Equation 0-2

Le gain de procédé est une information très importante car il permet de déterminer la sensibilité du système asservi en réponse au signal de commande.

Dans un procédé de régulation de niveau, le gain de procédé est influencé par la densité des liquides en présence. En effet, la hauteur de la colonne de liquide, qui est nécessaire pour assurer un débit de sortie équivalent au débit d'entrée, sera très différente selon que le liquide est léger ou lourd.

Donc, le gain de procédé nous renseigne sur la valeur avec laquelle le procédé réagit à une perturbation.

9.2.2. La constante de temps

La constante de temps (τ ou *tau*) du procédé permet de déterminer la rapidité avec laquelle le système aurait atteint le prochain état stable (la valeur finale pour une variation du signal de commande donné) et ce, en conservant la vitesse initial.

En réalité, le temps nécessaire pour atteindre la valeur finale est plus élevé puisque le rythme n'est pas maintenu mais il est plutôt réduit graduellement.

Le tau est un paramètre important lorsque le système réagit à une perturbation. En effet, la vitesse de réaction du système est d'abord dicté par la constante de temps. Si des perturbations continuelles sont présentes, le procédé débute sans cesse un nouveau régime transitoire dont la pente est proportionnelle au tau.

Dans un procédé de régulation de niveau, la modification du diamètre du réservoir influence directement la constante de temps et ce, sans changer le gain de procédé. Le gain est inchangé car il est fonction de la hauteur de la colonne de liquide (ou de sa densité). Par contre, la constante de temps est grandement affecté car la quantité de liquide nécessaire varie en fonction de la capacité du réservoir.

Sommes toutes, il est plus usuel de définir la constante de temps comme étant le temps nécessaire pour atteindre 63,2% du changement total (voir Figure 6-18).

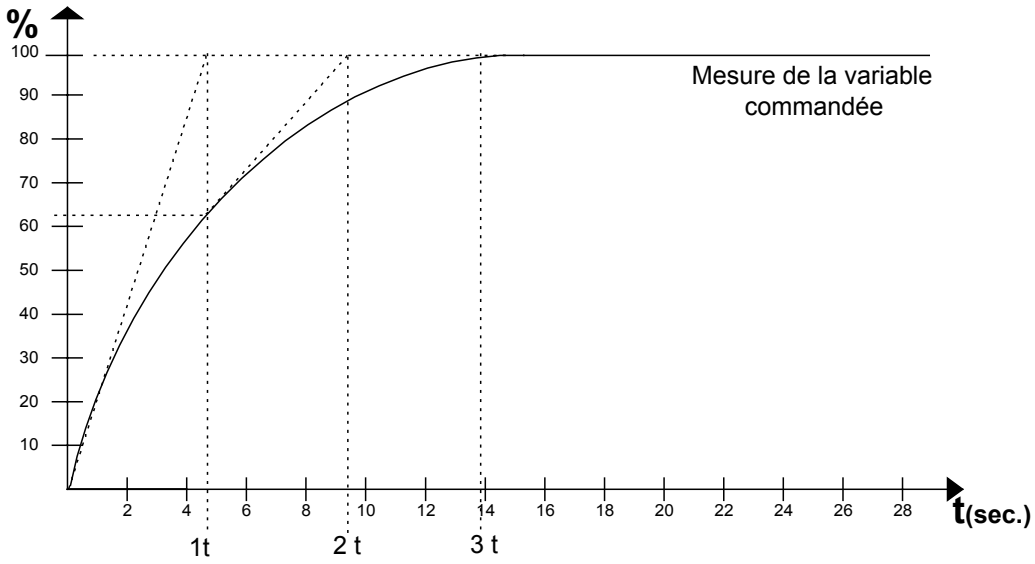


Figure 0-3 La constante de temps τ *(tau)*

9.2.3. Le temps de délai

Le temps de délai est le retard que l'on observe entre le moment où un signal est appliqué au procédé (soit une variation du signal de commande ou une perturbation) et le moment où on observe une réaction sur la variable mesurée. Un temps de délai pur ne fait que retarder le signal et ce, sans l'altérer.

Le temps de délai est la conséquence directe du retard relié au transport de matériel ou d'énergie. Par contre, ce type de délai est très nuisible car il retarde l'information et qu'il est alors impossible d'anticiper les réactions du procédé.

9.2.4. Le réglage des paramètres (pour un contrôleur standard)

Les informations extraites du test de la réponse à l'échelon permettent de procéder à la mise au point du contrôleur. En effet, il suffit de consulter le Tableau 0-1 afin de connaître les formules à utiliser selon le mode de régulation préconisé.

Tableau 0-1 Les formules de réglage des paramètres d'un contrôleur standard

Mode de régulation	Formule
P	$K_p = \frac{\tau}{t_d} * \frac{1}{G_p}$
P + I	$K_p = 0,9 * \frac{\tau}{t_d} * \frac{1}{G_p}$
	$T_i = 3,33 * t_d$
P + I + D	$K_p = 1,2 * \frac{\tau}{t_d} * \frac{1}{G_p}$
	$T_i = 2,0 * t_d$
	$T_d = 0,5 * t_d$

9.3. LA MISE AU POINT A L'AIDE DE LA FREQUENCE NATURELLE D'OSCILLATION

Cette méthode consiste à déterminer la valeur du gain ultime qui fait osciller la boucle à sa fréquence naturelle. Le procédé doit être relativement rapide afin de permettre une oscillation intéressante et facilement observable.

Il est à noter qu'il n'est pas nécessaire que l'amplitude des oscillations soit très grande. En effet, les oscillations ultimes sont atteintes si la sortie du contrôleur oscille sans amortissement et qu'elle ne sature pas à 0% ou à 100%.

La réalisation de ce test comporte quelques étapes:

1. S'assurer que le contrôleur fonctionne en mode proportionnel.
2. Régler le gain proportionnel à 1.
3. Effectuer ensuite de petites variations de la consigne (ou de la charge).
4. Si la sortie du contrôleur est amortie, il suffit de doubler le gain proportionnel. Dans le cas contraire, diviser le gain par deux.
5. Remettre le procédé dans un état stable et répéter les étapes 3 et 4 jusqu'à l'obtention d'oscillations sans amortissement. Si l'oscillation est maintenue, noter la période ultime (P_u) et le gain proportionnel ultime (K_{pu}).

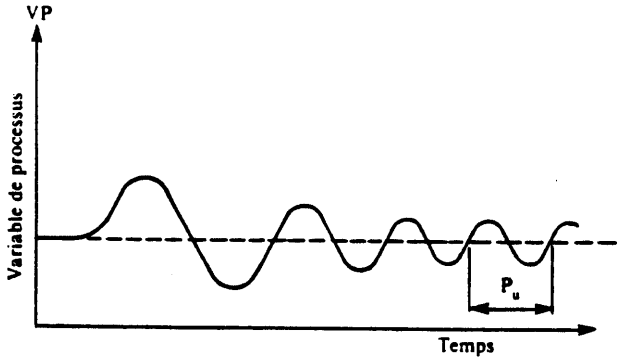


Figure 0-4 Exemple d'oscillation sans amortissement

9.3.1. Le réglage des paramètres (pour un contrôleur standard)

Les informations extraites du test de la fréquence naturelle du procédé permettent de procéder à la mise au point du contrôleur. En effet, il suffit de consulter le Tableau 0-2 afin de connaître les formules à utiliser selon le mode de régulation préconisé.

Tableau 0-2 Les formules de réglage des paramètres d'un contrôleur standard

Mode de régulation	Formule
P	$K_p = 0,5 * K_{pu}$
P + I	$K_p = 0,45 * K_{pu}$
	$T_i = P_u / 1,2$
P + I + D	$K_p = 0,6 * K_{pu}$
	$T_i = P_u / 2$
	$T_d = P_u / 8$

9.4. LES CRITERES DE PERFORMANCE

Pour déterminer la qualité de la mise au point d'un procédé, il est nécessaire d'avoir des critères de performance. D'ailleurs, voici les principaux facteurs de performance rencontrés en régulation de procédés industriels:

- le décroissement 4 à 1;
- minimiser l'erreur accumulée;
- minimiser l'intégrale de l'erreu absolue;
- le dépassement maximal;
- l'amortissement critique;
- etc.

Puisque le décroissement 4 à 1 est probablement le plus utilisé en industrie, notre étude des critères de performance se limitera à celui-ci.

9.4.1. Le décroissement 4 à 1

Ce critère de performance consiste à régler les paramètre du contrôleur dans le but d'obtenir un bon compromis entre un temps de stabilisation court et une stabilité acceptable.

Ainsi, les paramètres du contrôleur sont réglés de façon à obtenir une erreur qui décroisse avec un facteur de quatre à un lors des premiers dépassement de la consigne par la mesure (voir la Figure 0-5).

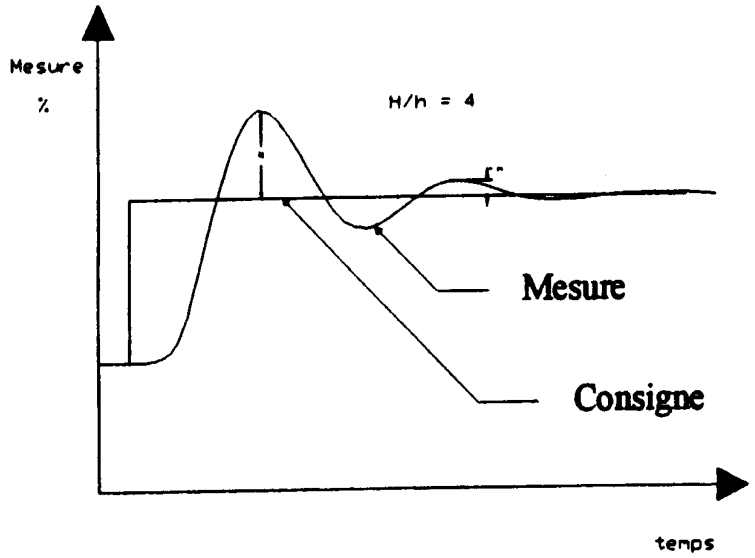


Figure 0-5 Exemple d'un décroissement 4 à 1