



Office de la Formation Professionnelle
et de la Promotion du Travail

Technicien Spécialisé

Génie Electrique

Tronc commun

Manuel de cours

Module 14

Maintenance des systèmes d'instrumentation
et régulation industrielle



VERSION AOUT 2022



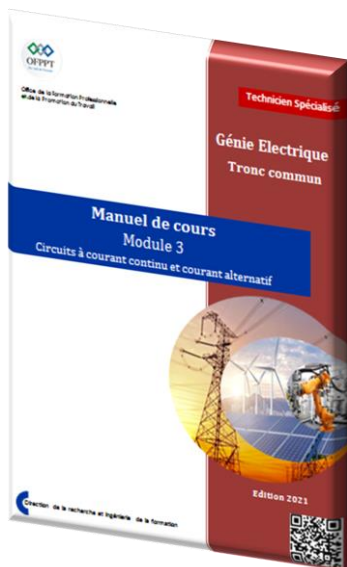
Direction de la Recherche et Ingénierie de la Formation



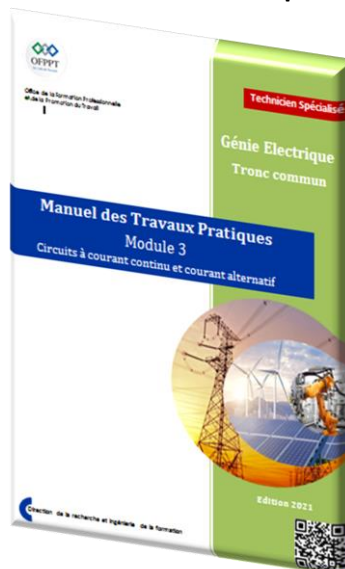
Avant-propos

Les manuels de cours, de travaux pratiques et le guide e-learning sont téléchargeables à partir de la plateforme e-learning moyennant les codes QR suivants :

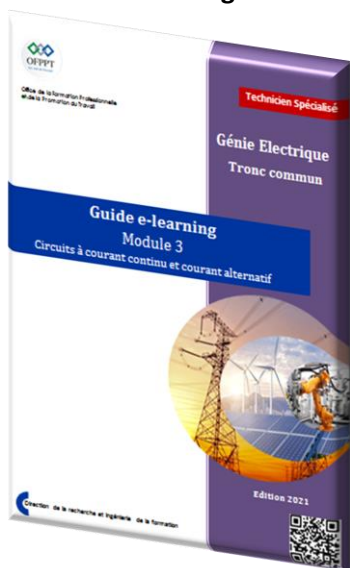
Manuel de cours



Manuel des travaux pratiques



Guide e-learning



SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	2
SOMMAIRE.....	3
COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS	6
CHAPITRE I.....	8
1. INTRODUCTION À LA RÉGULATION.....	9
1.1 Principaux constituants d'une boucle de régulation.....	9
1.2 Différents types de signaux.....	11
2. SYMBOLISATION	12
2.1 Symbolisation fonctionnelle.....	12
2.2 Symboles d'instrumentation	13
3. BOUCLES PNEUMATIQUES.....	16
4. BOUCLES ÉLECTRIQUES.....	21
5. BOUCLES NUMÉRIQUES.....	24
6. BOUCLES TOUT OU RIEN.....	34
CHAPITRE II.....	36
1 INTRODUCTION.....	37
2 CONSTITUTION D'UN CAPTEUR	38
3 TRANSMETTEUR UNIVERSEL.....	40
3.1 Schéma fonctionnel d'un transmetteur.....	40
3.2 Structure interne d'un transmetteur intelligent	43
3.3 Raccordement électrique des transmetteurs	44
3.4 Protocole de communication Hart	45
3.5 Caractéristiques météorologiques des instruments de mesure	48
4 ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL DE L'INSTRUMENTATION.....	51
4.1 Environnement industriel	51
4.2 Degrés de protection	51
4.3 Atmosphères explosibles ATEX	53
4.4 Compatibilité électromagnétique	55
4.5 Exercice d'application	56
5 TECHNIQUES DE MESURE INDUSTRIELLE.....	57
5.1 Mesure de pression.....	57
a- Les manomètres Hydrostatiques.....	59
b- Les manomètres à déformation de solide	60
Les manomètres pour pression différentielle.....	62
Les manomètres pour pression absolue.....	62

5.2	Mesure de température	65
CHAPITRE III.....		76
1 GÉNÉRALITÉS		77
1.1	Définitions	77
1.2	Principe de fonctionnement.....	77
1.3	Influence de la régulation	78
1.4	Régulation ou Asservissement	79
1.5	Les servomécanismes	79
1.6	Fonctionnement en boucle ouverte (Manuel)	79
1.7	Fonctionnement en boucle fermée (Automatique)	79
2 SCHÉMAS DE REPRÉSENTATION.....		80
2.1	Schéma TI.....	80
2.2	Schéma fonctionnel	81
3 CAUSES DE MODIFICATION DE L'ÉQUILIBRE DU PROCÉDÉ		82
3.1	Les délais.....	82
3.2	La variation de la consigne	84
3.3	La variation de la charge	85
3.4	Les perturbations et le bruit.....	85
4 RÉPONSE DES SYSTÈMES ASSERVIS.....		87
4.1	Réponse en boucle ouverte.....	87
4.2	Réponse en boucle fermée.....	88
5 OBJECTIFS DE LA RÉGULATION D'UN PROCÉDÉ		91
5.1	Erreur maximale	91
5.2	Temps de rétablissement.....	92
5.3	Erreur résiduelle	92
6 MODÉLISATION D'UN PROCÉDÉ.....		94
6.1	Les types de procédés	94
6.2	Les caractéristiques du procédé	95
6.3	Méthode d'identification d'un procédé en boucle ouverte	96
7 LES RÉGULATEURS.....		100
7.1	Structure de principe d'un régulateur	100
7.2	Choix du sens de l'action d'un régulateur.....	100
7.3	Raccordement électrique	101
7.4	Action continue et action discontinue.....	103
8 RÉGULATION TOUT OU RIEN - TOR		104
8.1	Présentation	104
8.2	Fonctionnement.....	104
8.3	Influence du paramètre seuil	105

9	RÉGULATION PROPORTIONNELLE INTÉGRALE DÉRIVÉE - PID	106
9.1	Action proportionnelle.....	106
9.2	Action intégrale	110
9.3	Action dérivée.....	114
9.4	Résumé des actions des corrections P, I et D.....	117
10	MÉTHODES SIMPLES DE DÉTERMINATION DES ACTIONS PID.....	118
10.1	Principes fondamentaux	118
10.2	Les modèles de base	118
10.3	Réglage en boucle ouverte.....	119
10.4	Réglages en boucle fermée	121
11	MAINTENANCE, DIAGNOSTIC ET RÉPARATION RÉGULATEURS NUMÉRIQUES.....	124
11.1	Introduction	124
11.2	Étapes de diagnostic et de maintenance	124
11.3	Maintenance diagnostic & dépannage des boucles de régulation	130
11.4	Maintenance préventive	133
CHAPITRE IV		135
1-	AUTOÉVALUATION.....	136

COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS

Module 14 :

Maintenance des systèmes d'instrumentation et régulation industrielle

Code : GETC – 14

Durée : 45 heures

ENONCE DE LA COMPETENCE

Installer et dépanner les systèmes d'instrumentation et de régulation industrielle.

CONTEXTE DE REALISATION

- Individuellement
- À partir :
 - Des Instruments industriels
 - De montages sur bancs didactiques
 - De systèmes industriels
 - Des boucles régulation industrielle
 - Etudes des cas
 - D'une approche théorique et mise en situation professionnelles
 - De schémas, de plans et de la documentation technique
- À l'aide :
 - Instruments industriels (Capteur de pression, capteur de température, transmetteurs, etc.)
 - D'un logiciel de simulation
 - D'outillage de base

CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE

- Interprétation du fonctionnement des différents types d'instruments de mesure et de vannes de régulation
- Détermination des principales causes de dysfonctionnement
- Connaître les principaux facteurs d'influences des mesures.
- Connaître les différentes architectures de régulation P.I.D., leurs conditions d'application, leurs avantages et leurs inconvénients.
- Savoir distinguer procédés stables et procédés instables, et savoir identifier leur paramètre.
- Savoir régler une boucle de régulation
- Connaître et savoir utiliser les différents outils disponibles dans un régulateur pour améliorer les performances de la régulation.
- Consignation les informations

ÉLEMENTS DE LA COMPETENCE	CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. S'informer sur la régulation industrielle	- Analyse des activités dans la chaine régulation - Informations sur les éléments constitutifs d'une boucle de régulation - Identification des symboles et schémas - Détermination des types de la régulation industrielle
B. Initiation à l'instrumentation industrielle	- Définition des mesures - Identification des chaines de mesure - Raccordement et montage des capteurs - Identification des méthodes de choix des capteurs
C. Savoir contrôler les procédés industriels	- Définition du procédé - Modélisation des procédés - Analyse fonctionnelle des procédés - Détermination de temps de réponse des procédés
D. Effectuer le dépannage des boucles de régulation	- Identification des règles de sécurité relative au dépannage d'une boucle de régulation - Détermination des composants de remplacement - Explication de la procédure de dépannage d'une boucle de régulation - Réalisation d'une analyse dysfonctionnement d'une boucle de régulation

1. Introduction à la régulation

La régulation des procédés industriels regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée appelée consigne.

Le rôle de l'instrumentation est d'abord de fournir des informations concernant les conditions de fonctionnement des installations de fabrication. Il s'agit le plus souvent de grandeurs physiques simples comme les pressions, débits, niveaux, températures, mais aussi de variables élaborées comme des compositions chimiques ou des caractéristiques diverses de qualité : densité, viscosité, pH,

Des alarmes (visuelles ou sonores) avertissent l'opérateur lorsqu'une grandeur opératoire s'écarte de sa valeur habituelle.

La régulation a pour but de réaliser le contrôle continu des principaux paramètres de marche du procédé. Elle se traduit essentiellement par la présence de nombreuses boucles de régulation qui ont deux objectifs principaux :

- Elles permettent au procédé de réagir à différentes perturbations en gardant constants les paramètres régulés.
- Les boucles de régulation constituent pour l'opérateur, qui est informé par l'instrumentation des conditions de marche, le moyen d'action sur les conditions de fonctionnement d'une installation. Il peut ainsi parfaire les réglages, les modifier en fonction des consignes de fabrication, ou faire évoluer les conditions de marche dans les phases transitoires ou perturbées.

1.1 Principaux constituants d'une boucle de régulation

Pour mettre en œuvre une boucle de régulation, les éléments constitutifs suivants sont nécessaires :

- La mesure qui est assurée par le **capteur** et dirigée vers le **transmetteur**. Celui-ci transforme la **mesure** en un **signal normalisé** et le transmet au **régulateur** qui, par ailleurs, a reçu une **consigne**.
- Le **régulateur** compare la mesure à la consigne et, s'il existe un écart, agit sur le servo moteur de la vanne de régulation par un signal de commande dans le sens voulu pour ramener la grandeur réglée à la valeur de consigne.
- Un **positionneur** généralement installé sur la vanne automatique, **vérifie** en permanence que la position réelle de la vanne correspond bien à la position théorique correspondant au signal régulateur.
- Dans le cas contraire, il **modifie la pression** d'air sur le servo moteur jusqu'à concordance de ces deux positions.
- **La mesure est visualisée** en continu sur un indicateur ou un enregistreur.

- La présence supplémentaire **d'alarmes haut et bas** permet de prévenir l'opérateur en cas de fonctionnement anormal.
- Dans d'autres cas de boucles de régulation, la vanne automatique peut être remplacée par un **organe de réglage** ou **actionneur** tel que **ventelles**, **servomoteur** pour orienter les pales d'un ventilateur, etc.

Exemple 1 : Boucle de régulation de niveau de la phase liquide d'un ballon

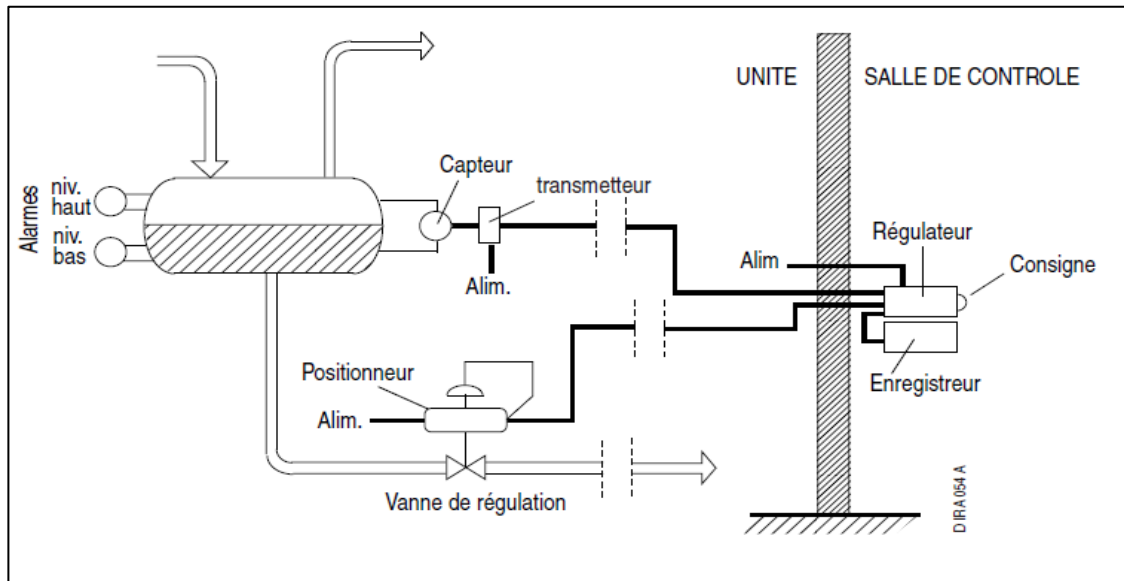


Figure 1-1 : Régulation de niveau de la phase liquide d'un ballon

Exemple 2 : Boucle de régulation de température

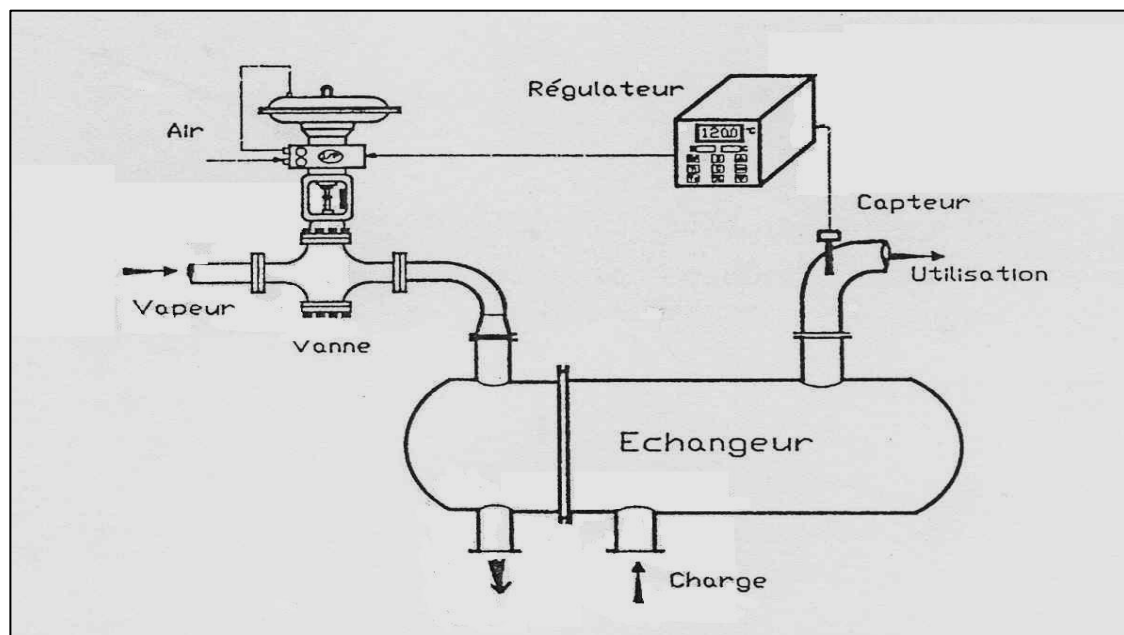


Figure 1-2 : Boucle de régulation de température d'un échangeur thermique

1.2 Différents types de signaux

Dans une boucle de régulation ou d'automatisme, les différents appareils sont reliés entre eux et les informations circulent le plus souvent :

- soit sous forme de **pression d'air**,
- soit sous forme de **courant électrique continu**
- soit sous forme d'**information numérique**

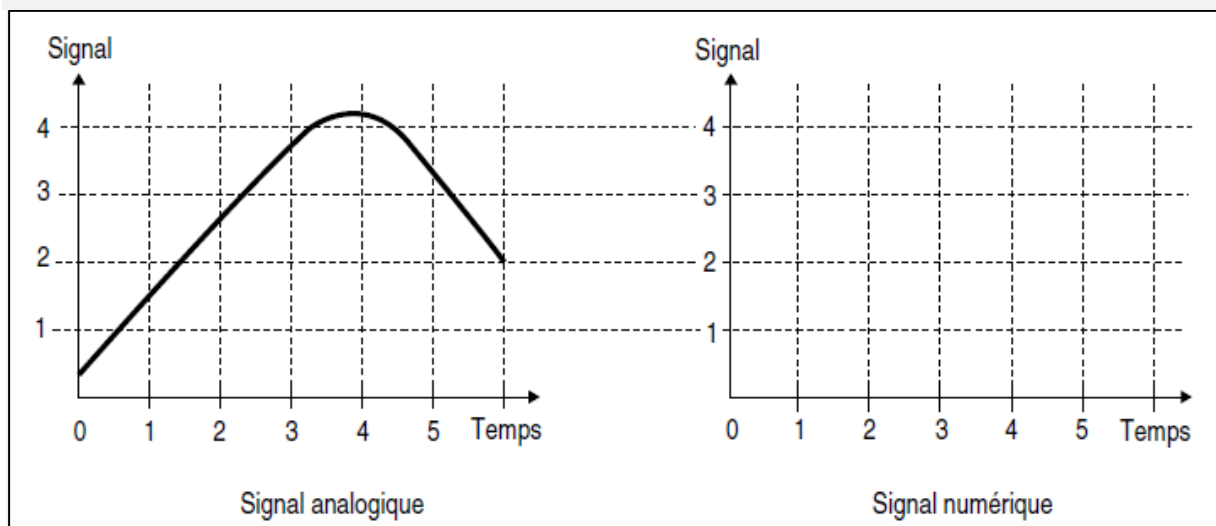
Les signaux sont alors appelés respectivement signaux **pneumatiques**, **électriques** et **numériques**.

Les signaux pneumatiques et électriques, qui sont des signaux continus, sont dits **analogiques**.

En numérique, les signaux sont émis à intervalles de temps réguliers (seconde ou fraction de seconde correspondant à la période de scrutation).

Exemple d'application :

Donner la correspondance "numérique" du signal analogique représenté



Dans certaines applications la transmission de **signaux optiques** analogiques ou numériques se fait par l'intermédiaire d'une fibre optique, principe de transmission qui présente plusieurs avantages techniques (en particulier au point de vue de l'atténuation des signaux).

Les boucles dont les paramètres n'ont que **deux états possibles** sont appelées boucles **Tout Ou Rien (TOR)**, **Logiques** ou **Digitales**. Cela concerne entre autres :

- les contacteurs d'alarme (exemple : alarmes de niveau haut et bas sur le ballon précédent),
- les contacteurs de fin de course sur les vannes,
- les électrovannes,
- les actionneurs TOR (vannes, moteurs, ...), commandés par automatismes ou non

2. Symbolisation

Divers symboles normalisés sont utilisés pour repérer et identifier les éléments d'une boucle de régulation. Ils sont généralement conformes à la **Norme ISA** (Instrument Society of America) ; toutefois, chaque société utilise un certain nombre de symboles non normalisés

2.1 Symbolisation fonctionnelle

La symbolisation d'une boucle de régulation peut s'effectuer de deux façons :

- soit appareil par appareil,
- soit globalement.

Ainsi, pour la boucle de régulation précédente (boucle de régulation de niveau de la phase liquide d'un ballon), ces deux possibilités sont schématisées par les figures ci-après :

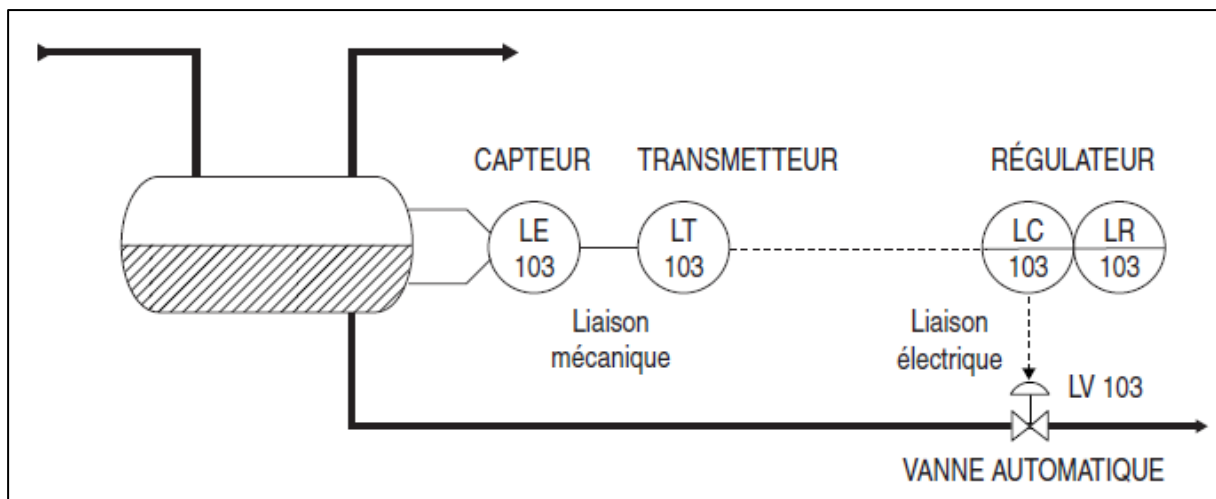


Figure 1-3 : Exemple de symbolisation instrument par instrument d'une boucle de régulation

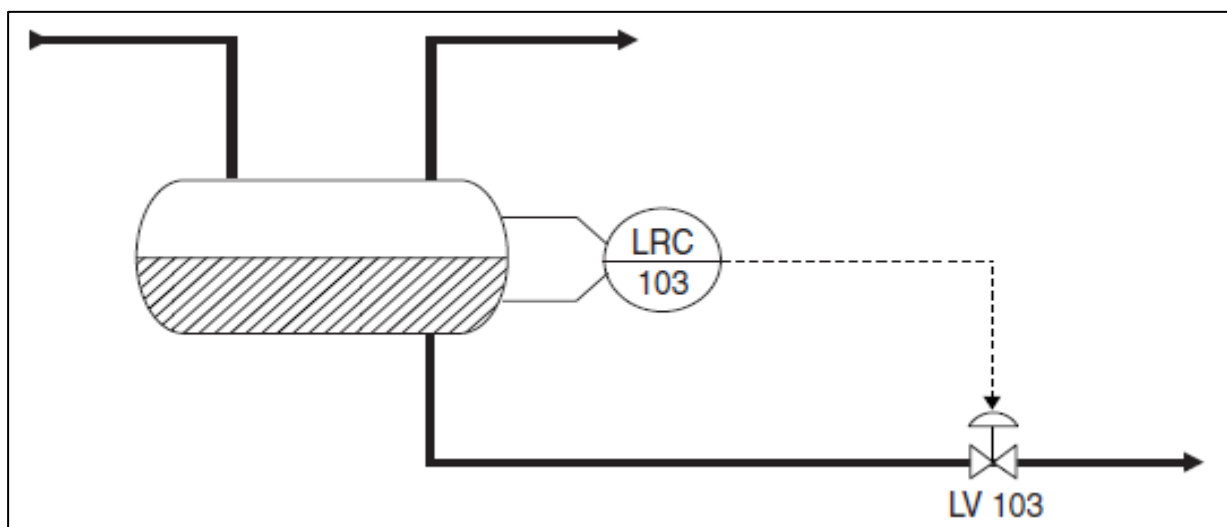
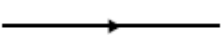
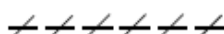
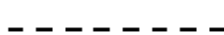
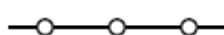


Figure 1-4 : Exemple de symbolisation globale d'une boucle de régulation

2.2 Symboles d'instrumentation

Lignes de tuyauterie et d'instrumentation

	Tuyauterie process principale / sens du fluide		Alimentation d'instrument ou connexion au process
	Tuyauterie process secondaire / sens du fluide		Signal pneumatique
	Tuyauterie tracée		Signal électrique TOR
	Tuyauterie chemisée		Signal électrique analogique
	Ligne du catalyseur ou process special		Signal numérique
			Tube capillaire

Code des lettres - Repères pour instruments

	PREMIÈRE LETTRE		LETTRES SUIVANTES		
	VARIABLE MESURÉE OU INITIANTE	MODIFICATEUR	LECTURE OU FONCTION PASSIVE	FONCTION ACTIVE	MODIFICATEUR
A	Analyse		Alarme		
B	Brûleur, combustion				
C				Régulateur	
D		Différentiel			
E	Tension		Élément primaire		
F	Débit	Proportion			
G			Visibilité		
H	Manuel				Haut
I	Intensité		Indicateur		
J	Puissance	Scrutation			
K	Temps ou programme	Vitesse de variation, rampe		Station de commande	
L	Niveau		Voyant lumineux		Bas
M		Momentané			Moyen intermédiaire
N					
O			Orifice, restriction		
P	Pression, vide		Connexion pour prise de test		
Q	Quantité, nombre	Intégration, totalisateur			
R	Radioactivité		Enregistrement		
S	Vitesse, fréquence			Contacteur commutateur	
T	Température			Transmetteur	
U	Multi variable		Multifonctions	Multifonctions	Multifonction

					s
V	Vibration, analyse mécanique			Vanne	
W	Poids, force		Puits		
X	Non classé	Axe	Non classé	Non classé	Non classé
Y	Présence, état, résultat	Axe		Relais ou calcul	
Z	Position, dimension	Axe		Élément de contrôle final non identifié	

Localisation

	INSTRUMENT LOCAL		APPLICATION CALCULATEUR : SYMBOLE GÉNÉRAL
	INSTRUMENT EN LOCAL TECHNIQUE		APPLICATION CALCULATEUR INACCESSIBLE À L'OPÉRATEUR
	INSTRUMENT EN SALLE DE CONTRÔLE		APPLICATION CALCULATEUR ACCESSIBLE À L'OPÉRATEUR
	INSTRUMENT AU TABLEAU LOCAL		APPLICATION CALCULATEUR AUXILIAIRE EN STATION LOCALE
	INSTRUMENT DANS SNCC		SYMBOLE GÉNÉRAL POUR FONCTION LOGIQUE OU CONTRÔLE SÉQUENTIEL
	INSTRUMENT DANS SNCC NORMALEMENT INACCESSIBLE À L'OPÉRATEUR		TRAITEMENT PAR AUTOMATE PROGRAMMABLE
	INSTRUMENT DANS SNCC ACCESSIBLE À L'OPÉRATEUR EN SALLE DE CONTRÔLE		TRAITEMENT PAR AUTOMATE PROGRAMMABLE EN LOCAL TECHNIQUE NORMALEMENT INACCESSIBLE À L'OPÉRATEUR
	ÉLÉMENT DE SYSTÈME DISTRIBUÉ AUXILIAIRE EN STATION LOCALE ACCESSIBLE À L'OPÉRATEUR		TRAITEMENT PAR AUTOMATE PROGRAMMABLE AUXILIAIRE EN LOCAL TECHNIQUE ACCESSIBLE À L'OPÉRATEUR
	INSTRUMENT ASSURANT DEUX FONCTIONS		AUTOMATE PROGRAMMABLE AUXILIAIRE EN STATION LOCALE ACCESSIBLE À L'OPÉRATEUR
	BLOCS DE FONCTION		

Corps de vannes

	SYMBOLE GÉNÉRAL		À TROIS VOIES		ANGLE
	TOURNANT SPHÉRIQUE		À SOUPAPE		PAPILLON
	VANNE SPÉCIALE		VANNE SUR CATALYSEUR		À MEMBRANE

Actionneurs de vannes

	MANUEL		VANNE DE RÉGULATION SYMBOLE GÉNÉRAL		À MEMBRANE AVEC COMMANDE MANUELLE
	À VERIN SIMPLE OU DOUBLE EFFET		À MOTEUR		VANNE TOR SYMBOLE GÉNÉRAL

Exemple d'application :

Donner la signification des symboles suivants :

FT :
PI :
LT :
PIT :
TT :
FIC :
LIC :

3. Boucles pneumatiques

3.1 Alimentation d'une boucle pneumatique et transmission des signaux

a - Caractéristiques d'une boucle pneumatique

Le schéma de principe ci-dessous rappelle les éléments constitutifs d'une boucle de régulation pneumatique.

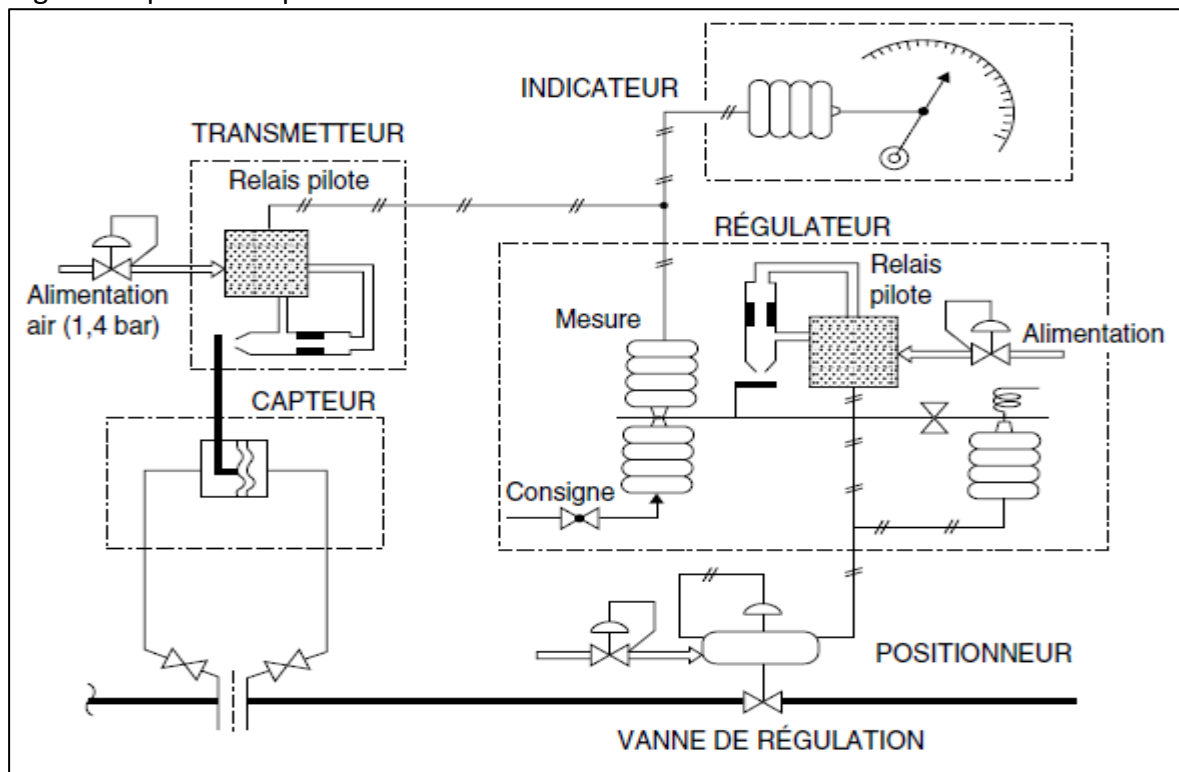


Figure 1-5 : Schéma de principe des éléments constitutifs d'une boucle de régulation pneumatique. Pour que les différents appareils pneumatiques tels que (Transmetteur, Régulateur, Positionneur pneumatique) puissent fonctionner, il est nécessaire de leur fournir de l'énergie sous forme de pression d'air.

A partir du réseau Air-Instrument, l'alimentation en air d'un appareil pneumatique est assurée par un **filtre détendeur** dont le rôle est de maintenir une pression constante quelle que soit la consommation de l'appareil en question.

Le **fonctionnement** d'un appareil pneumatique revient toujours à générer un **déplacement** ou une force.

L'**émission du signal pneumatique** consiste à les transformer en une pression d'air variable ou **signal de sortie**. Ceci est généralement réalisé par un système **buse-palette** ou par un montage s'en rapprochant.

Le signal émis **circule dans un tube métallique** (acier, cuivre, inox) dans l'atelier et en **tube plastique** souple en salle de contrôle.

La **réception d'un signal pneumatique** dans les **appareils** tels que (indicateur et enregistreur, régulateur, positionneur) s'effectue dans un soufflet.

b - Alimentation d'une boucle pneumatique : le filtre détendeur

La vue extérieure et le principe de fonctionnement de filtres détendeurs sont représentés ci-dessous.

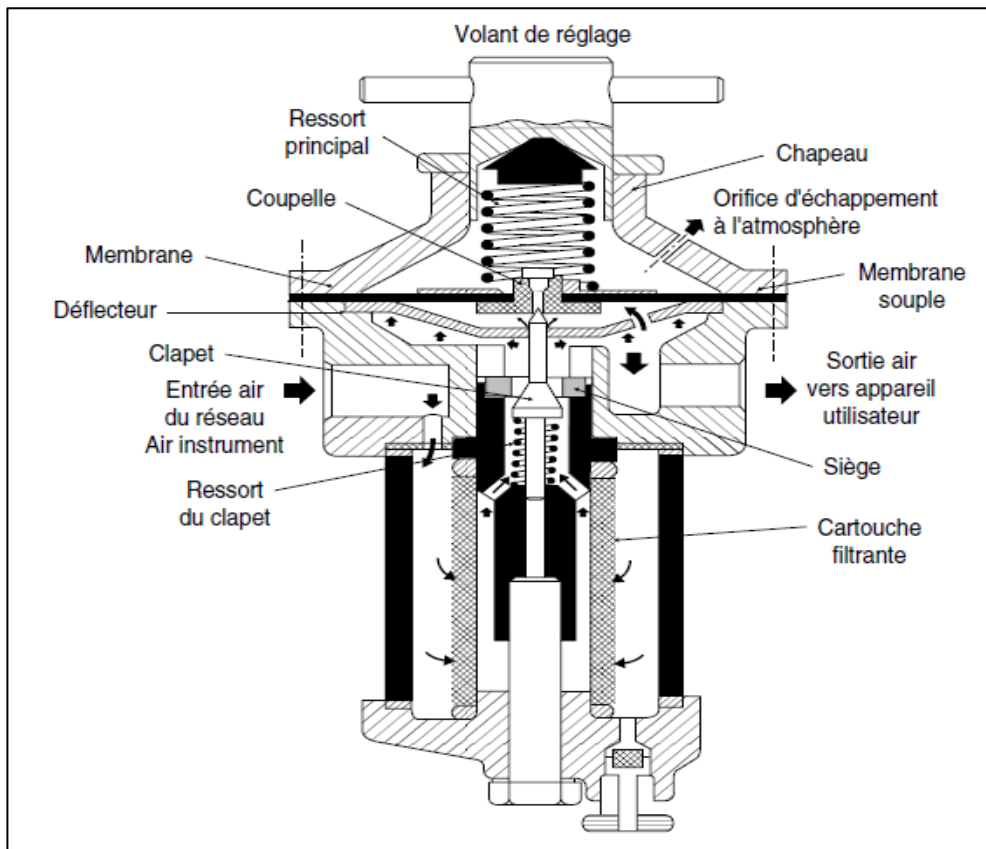


Figure 1-6 : Schéma de principe d'un filtre détendeur

Un filtre détendeur est constitué :

- **D'une partie filtre et purge d'eau :**
 - Le réseau Air-Instrument délivre de l'air normalement sec et dépoussiéré à une pression de l'ordre de 7 bar relatifs sortie compresseurs d'air. Celui-ci alimente le détendeur à travers une cartouche cylindrique creuse en bronze fritté ou en pierre poreuse et dont le rôle est de retenir l'eau et les impuretés qui n'auraient pas été éliminées précédemment
- **D'une partie détendeur**
 - Au travers d'un orifice dont l'ouverture est commandée par un clapet, l'air vient agir sur l'une des faces d'une membrane déformable dont l'autre face est soumise à l'action d'un ressort. La tension de ce ressort est réglable à l'aide d'une vis et va déterminer la pression de sortie de l'air vers l'utilisateur. Excepté certains positionneurs de vanne automatique, tout appareil pneumatique est alimenté en air **1,4 bar relatif**

c - Émission d'un signal pneumatique : le système buse-palette

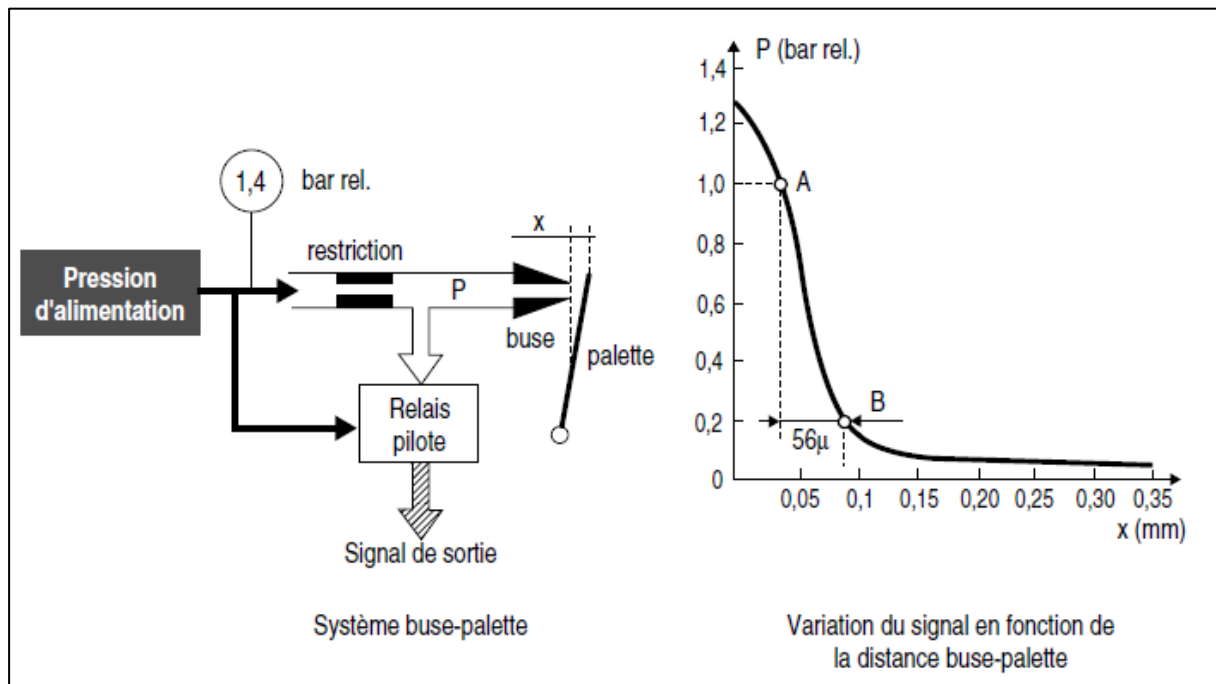


Figure 1-7 : Schéma de principe du système buse-palette

Une **palette** dont le déplacement représente l'information de sortie de l'appareil est placée devant une buse alimentée en air 1,4 bar à travers une restriction.

Quand la **palette est éloignée de la buse, le signal est pratiquement nul** ; il augmente jusqu'à une valeur maximale voisine de la pression d'alimentation quand la palette se rapproche de la buse.

Sur la courbe précédente qui donne la variation de la pression de sortie de la buse en fonction de la distance buse-palette, on remarque que **seule la zone AB est utilisable** car pratiquement linéaire ; elle correspond à une variation de pression de 800 mbar pour un déplacement de la palette de 50 à 80 mm suivant les constructeurs.

D'où **le choix de l'échelle de pression des signaux pneumatiques : 0,2 bar - 1 bar**, soit 3-15 PSI en Unités anglo-saxonnes (0,208 bar - 1,030 bar)

La buse, dont le diamètre peut varier de 0,3 à 1,2 mm, laisse passer un débit d'air de 30 à 60 l/h. La restriction a un diamètre plus petit que celui de la buse (0,2 à 0,5 fois son diamètre) afin que le débit d'alimentation du système ne puisse compenser la fuite.

Un amplificateur de débit appelé **relais-pilote** est placé sur le circuit de sortie pour diminuer le temps de réponse vers les appareils placés à distance. Son signal de sortie, identique en pression à celui délivré par le système buse-palette mais de débit plus important, est appelé souvent **air modulé**.

Exemple d'application

Quelle est la pression du signal émis par un transmetteur pneumatique correspondant aux valeurs suivantes :

Mesure	Signal transmetteur
0 %	bar
25 %	bar
50 %	bar
75 %	bar
100 %	bar

d - Réception d'un signal pneumatique

Le signal pneumatique est reçu dans un **soufflet** pour être **transformé en une force utilisable**.

A titre d'exemple le schéma ci-dessous illustre le fonctionnement d'un indicateur pneumatique.

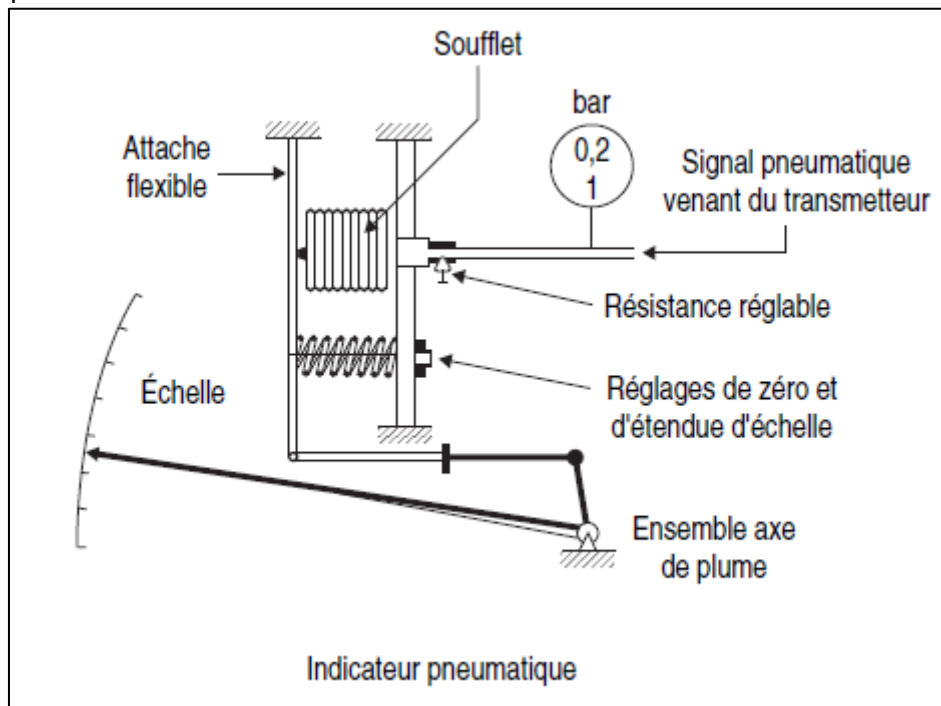


Figure 1-8 : Schéma de principe d'un indicateur pneumatique

Le signal est transformé par un système soufflet-embellage en un déplacement d'une aiguille devant un cadran.

Le cadran de ce type d'appareil est généralement gradué de 0 % à 100 % :

- le 0 % correspondant à un signal de 0,2 bar
- le 100 % correspondant à un signal de 1 bar

3.2 Avantages - inconvénients des boucles pneumatiques

a- Avantages :

- insensibilité aux parasites industriels (inductions parasites, champs magnétiques)
- pression d'air directement utilisable sur une membrane ou un piston
- conviennent bien à la sécurité incendie (pas de génération d'étincelles, bonne tenue au feu)

b- Inconvénients :

- lenteur de transmission
- portée limitée (quelques centaines de mètres en tube 4//6 ou 6/8)
- coût d'installation élevé
- sensibilité à l'humidité et aux poussières
- nombreuses pièces mécaniques en mouvement
- difficulté d'effectuer sans conversion des calculs élaborés

Néanmoins, il existe encore de nombreuses boucles pneumatiques et il s'en installe de nos jours pour des applications simples (ex : régulation locale de pression ou de niveau, sécurité locale, ...).

4. Boucles électriques

4.1 Alimentation d'une boucle électrique et transmission des signaux

Un bloc d'alimentation, situé en salle de contrôle, relie par 2 fils un circuit où l'on trouve en **série le transmetteur** et **une résistance fixe de 250Ω** et en parallèle de la résistance le régulateur.

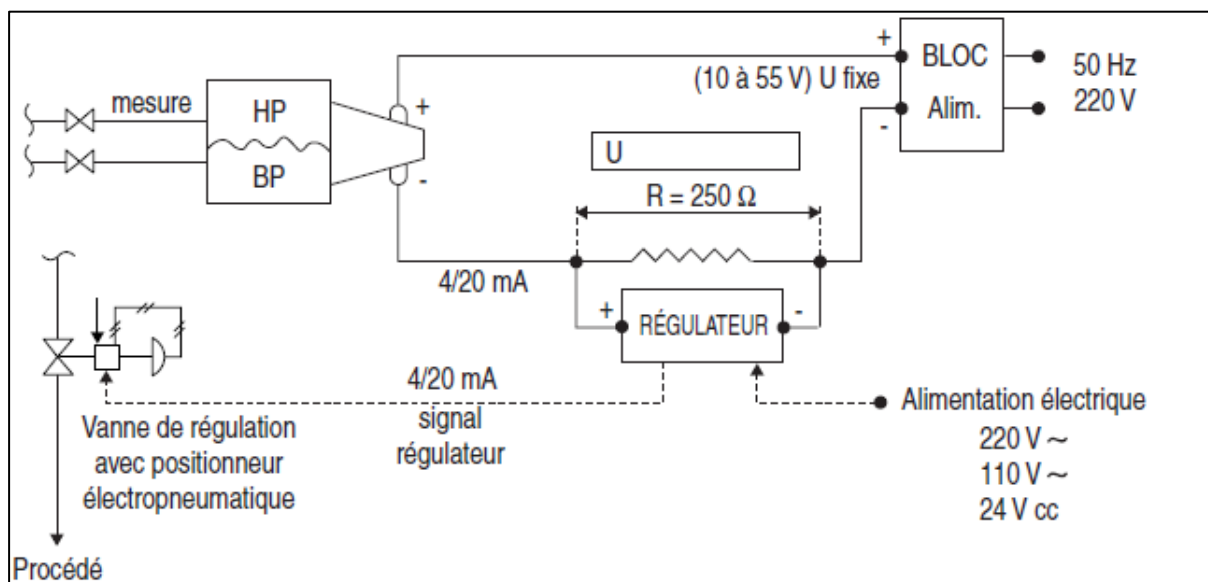


Figure 1-9 : Schéma de principe d'une boucle de régulation électrique

Ce montage est parfois appelé montage en parallèle. La **tension continue fixe** délivrée par le bloc d'alimentation est de 10 V à 55 V suivant les constructeurs de matériel. Le 24 V est toutefois le plus utilisé, c'est cette tension fixe qui est utilisée comme vecteur électrique de la mesure.

Le transmetteur peut être assimilé à une **résistance variable** R_i placée dans le circuit électrique.

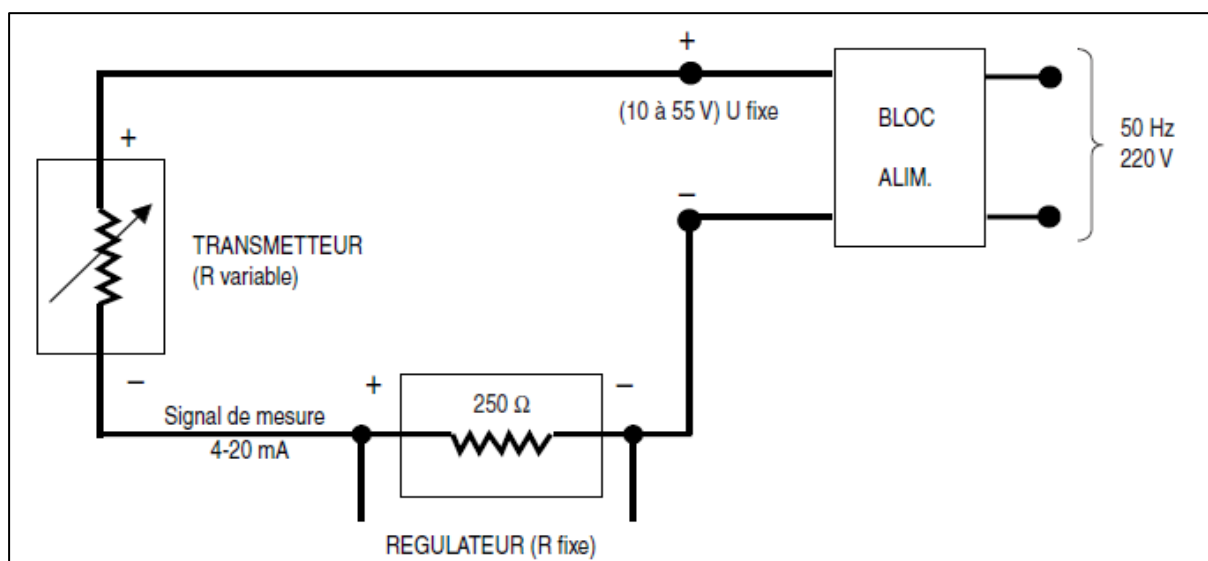


Figure 1-10 : Schéma électrique de la voie de mesure d'une boucle de régulation électrique

Les variations de mesure se traduisent par des variations de la résistance interne du transmetteur et donc de la résistance totale R_t du circuit. L'intensité i du courant de mesure varie en sens inverse de cette résistance R_t selon la loi d'Ohm.

$$U = R_t \cdot I \text{ ou } I = \frac{U}{R_t} \text{ Avec } R_t = R_i + 250$$

Le transmetteur est étalonné pour que l'intensité du courant passant dans le circuit varie de **4 à 20 mA en général, quand la mesure fluctue de 0 à 100 % de l'échelle.**

Le signal minimal de 0 mA n'est pas utilisé pour éviter la confusion avec une rupture du circuit.

Exemple d'application

Quelle est la tension aux bornes de la résistance fixe de 250 W et donc aux bornes du régulateur, correspondant aux valeurs suivantes de la mesure ?

MESURE	SIGNAL TRANSMETTEUR	TENSION AUX BORNES DES APPAREILS ($U = RI$)
0 %	mA	$U = x$
50 %	mA	$U = x$
100 %	mA	$U = x$

Une tension variable de **1 à 5 V**, et représentative de la mesure, peut alors être présentée à un nombre quelconque d'appareils sans aucune gêne et la mise hors service de l'un d'entre eux ne perturbe en rien le fonctionnement des autres.

4.2 Avantages - inconvénients des boucles électriques

a- Avantages :

- Temps de réponse instantané,
- Très bonne précision,
- Signaux facilement utilisables par un calculateur (supervision, optimisation, etc.) ou dans un Système Numérique de Contrôle Commande (SNCC) après conversion en numérique.

b- Inconvénients :

- Risque de perturbations des signaux par l'environnement (champs électromagnétique,...)
- Boucle agréée pour atmosphère explosive (boîtier antidéflagrant, sécurité intrinsèque, etc),
- Mauvaise tenue des câbles au feu.

4.3 Exemple de boucle électrique

L'exemple ci-dessous montre le schéma de montage d'une boucle **électrique** de régulation de débit.

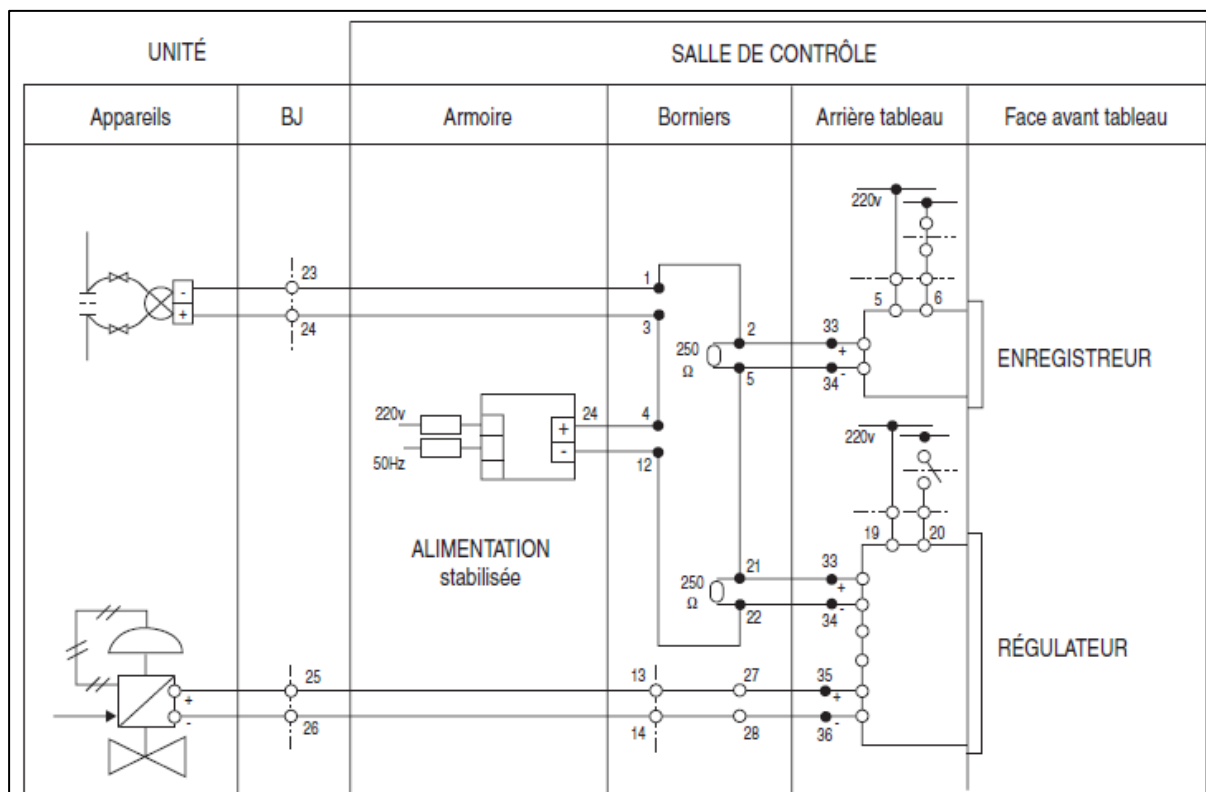


Figure 1-11 : Schéma de montage d'une boucle électrique de régulation de débit.

5. Boucles numériques

5.1 Principe de fonctionnement d'une boucle numérique

Actuellement la **plupart des transmetteurs**, (à l'exception, partiellement, de ceux dits "intelligents") et la majorité des **organes de réglages fonctionnent avec des signaux analogiques**.

Seuls quelques systèmes d'acquisition de données sur des capacités de stockage (niveaux, températures, densité, etc.) fonctionnent entièrement en numérique.

Les boucles numériques concernent donc essentiellement le fonctionnement interne des régulateurs numériques autonomes et les signaux émis à l'intérieur d'un Système Numérique de Contrôle Commande (SNCC).

Des **interfaces** ou **convertisseurs analogique/numérique A/N** sont alors nécessaires entre les différents éléments de la boucle.

Le schéma ci-dessous illustre un exemple de boucle de régulation "numérique" de niveau.

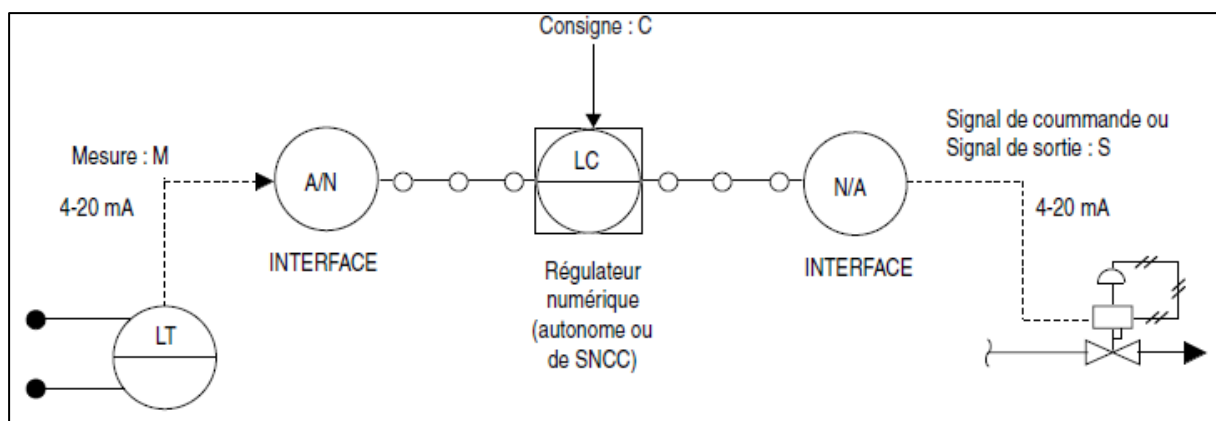


Figure 1-12 : Exemple de boucle de régulation numérique de niveau.

Les signaux d'entrée analogiques (ou mesures) sont **scrutés à intervalles de temps réguliers T_s** pour donner une suite de **valeurs discontinues dites discrètes**.

Chaque valeur discrète est transformée suivant un code déterminé en un **signal numérique dans un convertisseur analogique/numérique**.

Cette information numérique se présente sous l'aspect d'une **succession d'états électriques** qui traduisent des **états binaires** appelés **bits** (contraction de "binary digit"). L'ensemble de l'information constitue un **mot**.

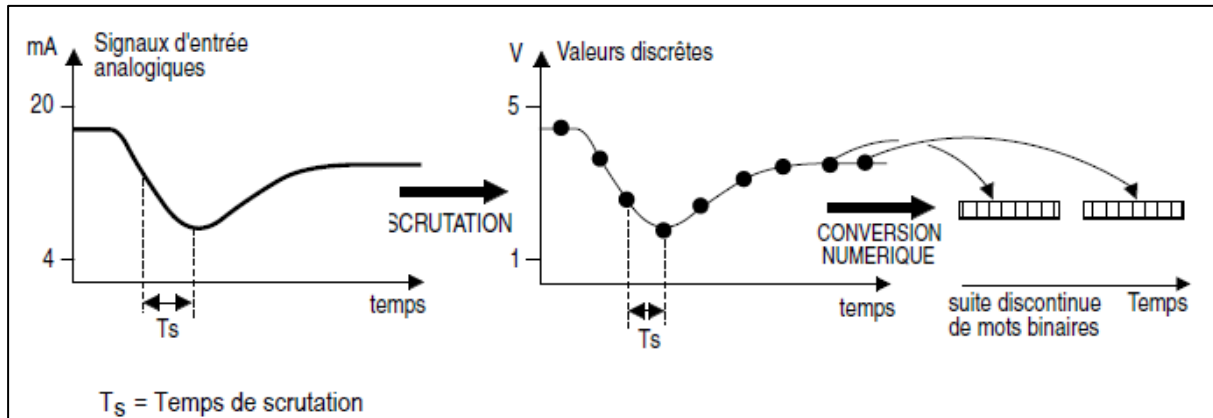


Figure 1-13 : Exemple de traitement de la mesure.

Dans le cas d'un régulateur numérique, la mesure, traduite en **mots binaires** grâce à des codes, sert au calcul périodique du signal de sortie (fonction de l'écart M-C et du réglage des actions PID). Celui-ci est une suite de valeurs discrètes.

Après transformation dans un **convertisseur numérique/analogique** et traitement dans une mémoire analogique, qui bloque la valeur entre deux réactualisations, il en résulte un signal de sortie analogique en escalier.

Le temps de réactualisation T_R peut être égal ou supérieur au temps de scrutation T_s suivant le comportement de la boucle dans le procédé.

Plus les temps de scrutation et de réactualisation sont courts (en général de l'ordre de 1 à quelques dixièmes de secondes), plus le signal de sortie en escalier du régulateur numérique est assimilable au signal de sortie du régulateur analogique.

Le développement actuel des transmetteurs numériques et celui, futur, des organes de réglages (ex : positionneur numérique - pneumatique d'une vanne automatique) permettent d'envisager dans un proche avenir la réalisation de boucles de régulation entièrement numériques.

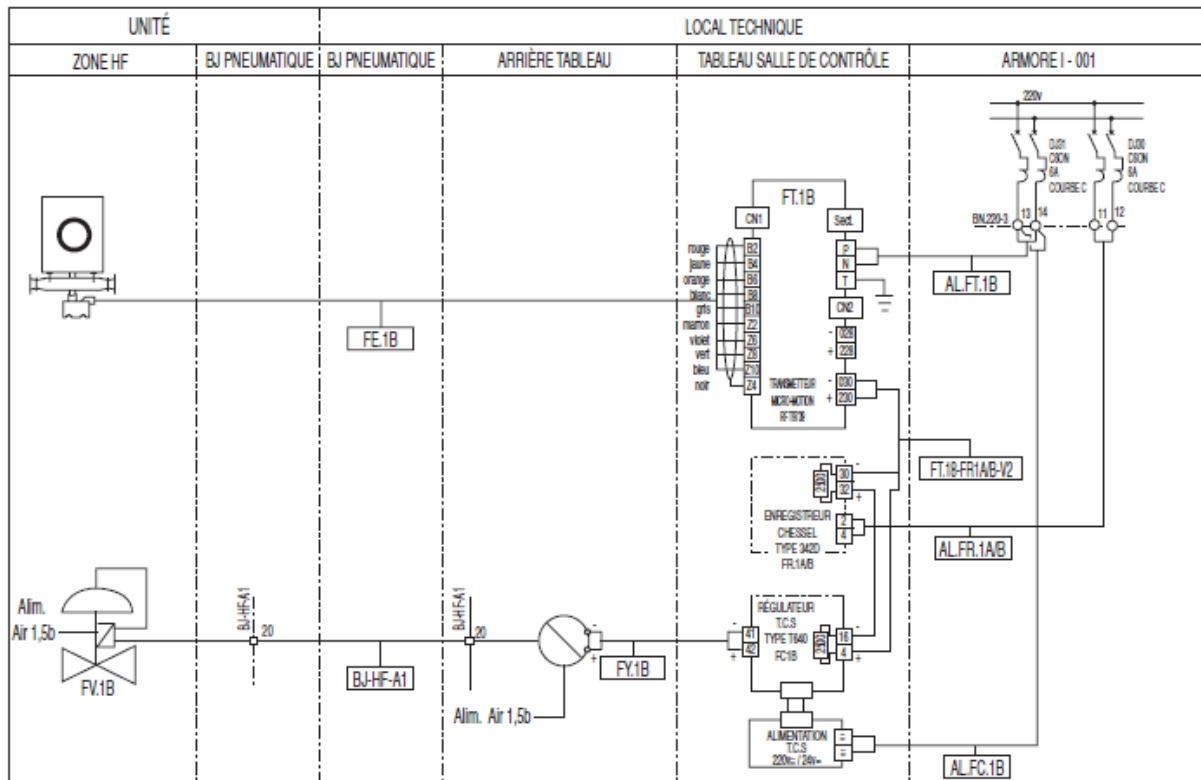


Figure 1-14 : Exemple de boucle mixte numérique analogique.

Exemple du boucle mixte numérique analogique avec :

- capteur numérique
- liaison numérique capteur-transmetteur
- transmetteur numérique
- liaison 4-20 mA transmetteur régulateur
- régulateur numérique
- liaison 4-20 mA puis 0,2 - 1 bar régulateur-vanne

5.2 Communication numérique

a - Conversion A/N

Les systèmes numériques actuels utilisent toujours des signaux analogiques. Ceci nécessite l'échantillonnage de ces signaux à intervalle de temps régulier afin d'obtenir une suite de valeurs discrètes.

Chaque valeur discrète va pouvoir ainsi être convertie en une valeur numérique suivant un code bien défini. Ce code se présente sous la forme d'une succession d'états binaire (0 ou 1). Cet état binaire est défini comme étant l'élément de base de l'information numérique, le bit. Chaque bit peut prendre deux états logiques le "0" ou le "1".

Le signal numérique traduisant la valeur de la variable analogique comprend plusieurs bits. Les bits sont groupés 8 par 8 pour former les **octets**

$$1 \text{ octet} = 8 \text{ bits et } 1 \text{ kilo octet} = 1 \text{ ko} = 2^{10} \text{ octets} = 1024 \text{ octets}$$

Les octets sont ensuite groupés pour former les **mots**. La **taille des mots** habituellement utilisés

pour les signaux numériques varie de 8 bits (1 octet) à 32 bits (4 octets).

La **conversion d'un signal variable analogique** en un signal numérique est bien entendu d'autant plus précise que la taille des mots est importante.

Cheminement de la conversion du signal analogique en signal numérique

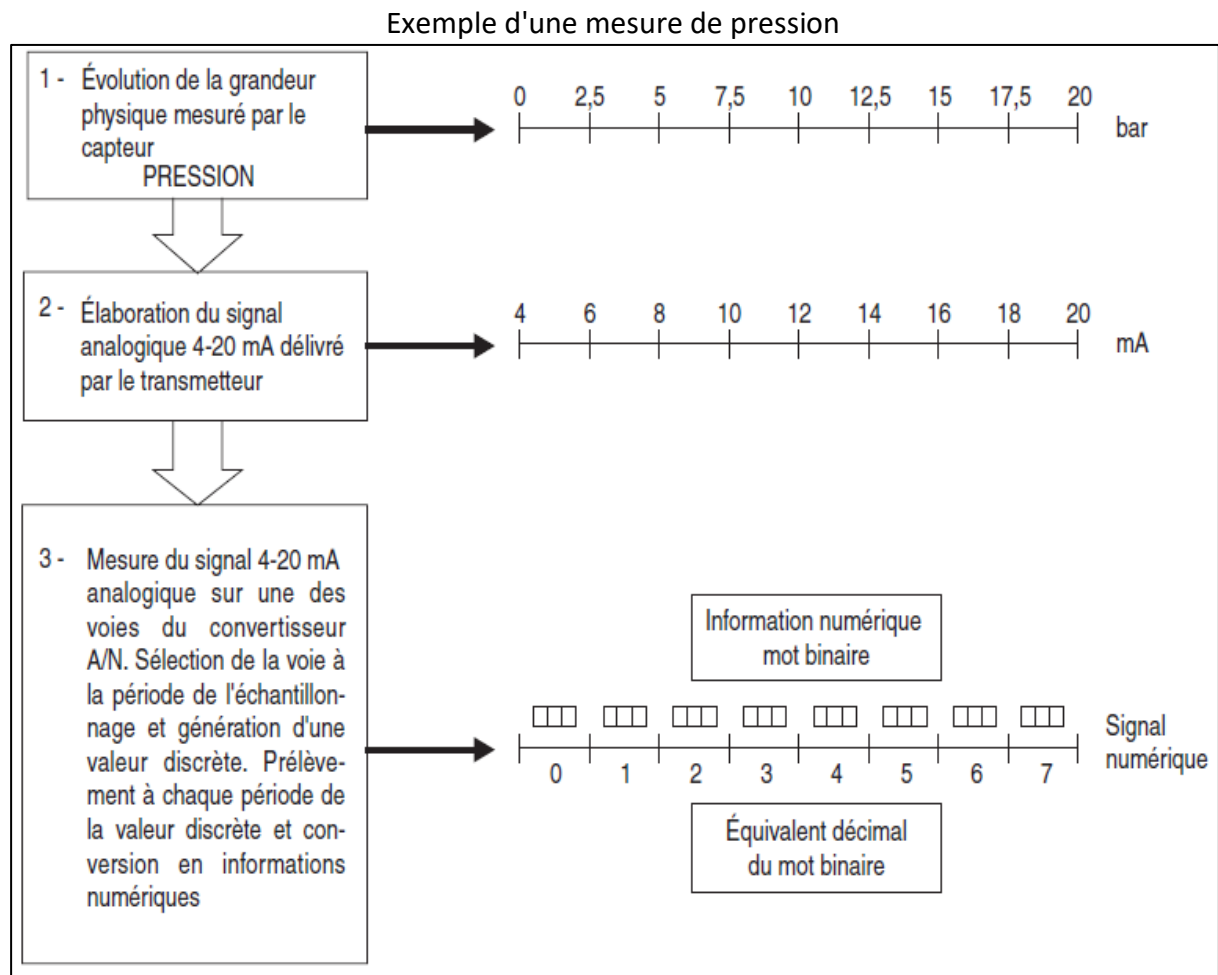


Figure 1-15 : Exemple de conversion d'un signal analogique de pression.

b - Résolution de la conversion

Exemple d'Application : conversion d'une mesure de pression 0-20 bar en mot de 3 bits

- Compléter le tableau ci-dessous

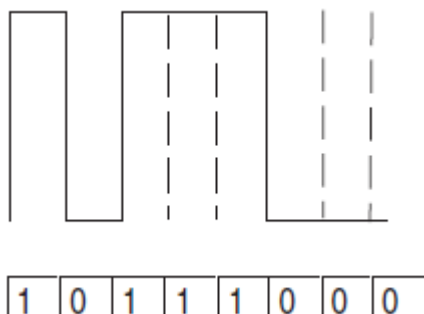
Signal analogique			Signal Numérique		
			Numérotation des intervalles en décimal	Numérotation des intervalles en binaire	
bar	%	mA		$2^2=4$	$2^1=2$
0	0	4			

20	100	20				

- Quel est le mot binaire de 3 bits qui représente une pression de 11,3 bar dans la capacité ?
- En déduire la résolution (précision sur la conversion) du signal obtenu avec un mot de 3 bits en % et en bar.
- La résolution est d'autant meilleure que le mot binaire comporte un nombre de bits important. Si le mot est de 12 bits, le nombre d'intervalles correspondant est de :
- Déduire la résolution du signal en bar et en %.

c - Structure d'un élément binaire

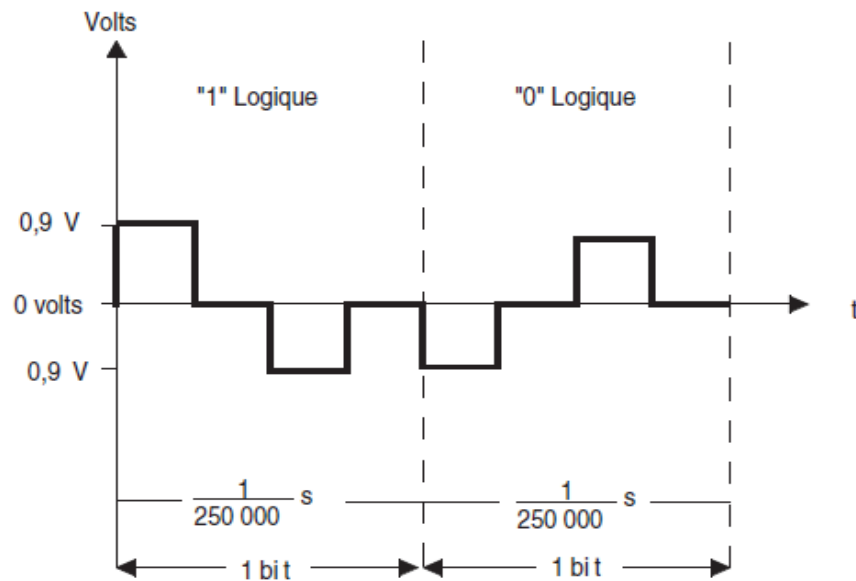
Classiquement on représente un élément binaire par un état de présence ("1 logique") ou d'absence ("0 logique") de signal électrique (courant ou tension). L'exemple ci-dessous, d'un mot de 8 bits, illustre cette représentation :



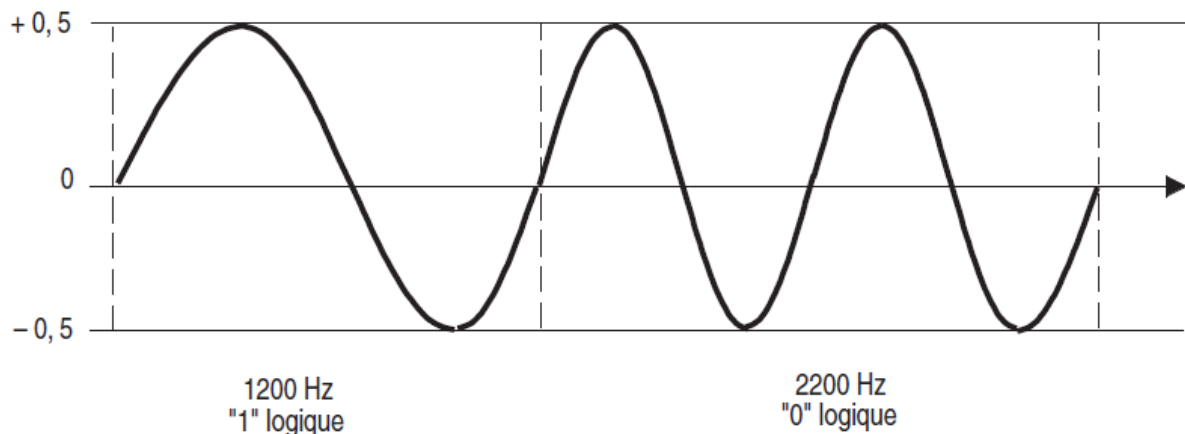
La structure d'un élément binaire dépend des fabricants de matériel et peut être plus complexe.

Exemples

Dans le système Honeywell TDC le "1 logique" et le "0 logique" ont la structure suivante :



Le protocole BELL 202 utilisé chez Rosemount donne un signal codé par changement de fréquence émis à 1 200 Baud.



d - Messages binaires

En réalité un message binaire (appelé parfois "Paquet" ou "Bloc") comporte **3 types d'information** :

- des **informations numériques** vues précédemment et caractérisant la valeur de la mesure ou du signal de commande exprimés en mots binaires de 1 à 4 octets, (8 à 32 bits)
- des **informations assurant la validité du message** : bits de début et de fin de message, bits de parité pour détecter une erreur de transmission,
- des informations codées relatives au message :
 - adresses du message : origine et destinataire,
 - longueur du message,
 - données spécifiques (ex : codage utilisé)

Par exemple, le message émis par un transmetteur numérique de pression peut comporter les données suivantes :

. repère du transmetteur,

- . descripteur,
- . unités (bar, Pascal, mm/Hg, etc.),
- . zéro et échelle,
- . limites du capteur,
- . référence constructeur,
- . matériaux utilisés,
- . etc.

Ces informations sont nécessairement codées car elles utilisent des caractères alphanumériques et des symboles qui doivent être traduits en numérique pour être utilisables.

Le code le plus répandu est le code ASCII (American Standard Code for Information Interchange) normalisé à 7 bits (8 bits avec le bit de parité).

5.3 Liaisons numériques

a - Bus et protocole de communication

Les liaisons numériques s'appuient sur un support matériel appelé **bus** qui permet aux appareils de communiquer ensemble et sur un **protocole** qui définit un ensemble de règles pour les échanges entre les différents appareils.

- ✓ **Bus** : Dans le bus, les communications peuvent s'effectuer en parallèle ou en série

Dans la liaison parallèle, chaque bit d'un mot circule dans un câble différent ce qui permet des vitesses d'échange élevées mais nécessite autant de câbles (jusqu'à 32) en parallèle que de bits constituant un mot.

C'est un type de liaison utilisé très couramment pour les **liaisons courtes** internes (bus interne) ou externes (vers écran vidéo ou imprimante).

Dans la liaison série, le mot entier circule sur un même câble. Cette liaison minimise le nombre de câbles et est utilisée pour de grandes distances. Le bus est alors un câble électrique coaxial, téléphonique ou bifilaire parallèle ou une fibre optique.

De par le principe du numérique, les liaisons parallèle ou série **autorisent le passage simultané de plusieurs messages différents dans le même bus**, en particulier grâce aux différentes informations contenues dans un message.

- ✓ **Protocole** : Le **protocole de transmission** est un ensemble de règles qui définissent les échanges entre éléments. Cela concerne :
 - la **vitesse d'échange** exprimée en Baud (1 Baud = 1 bit par seconde). Elle varie de 1 200 Bauds à quelques Méga Bauds suivant les systèmes et les fabricants),
 - les **modes de transmission** : bits de début et de fin de message, bit de parité, structure des bits de données, etc.,
 - les **codes de transmission** (ex : Code ASCII).

b - Bus pour signaux électriques

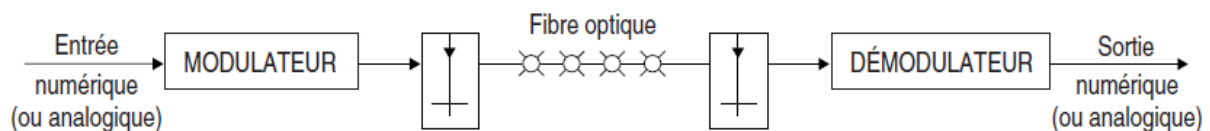
Ce sont des câbles électriques de technologie connue. Ils présentent les caractères spécifiques suivants :

- **le câble téléphonique** formé de paires téléphoniques a une assez grande sensibilité aux perturbations électromagnétiques et une vitesse d'échange peu élevée (2 Mega Bauds),
- **le câble coaxial** a une bonne immunité aux perturbations électromagnétiques et permet une grande vitesse d'échange (jusqu'à 300 Mega Bauds).

c - Bus pour signaux optiques : fibres optiques

Principe

Les signaux électriques sont transformés en faisceaux lumineux, véhiculés dans un guide, la fibre optique, puis transformés de nouveau en signaux électriques. L'information circulant dans la fibre optique est généralement numérique (cas d'un bus) mais peut être analogique.



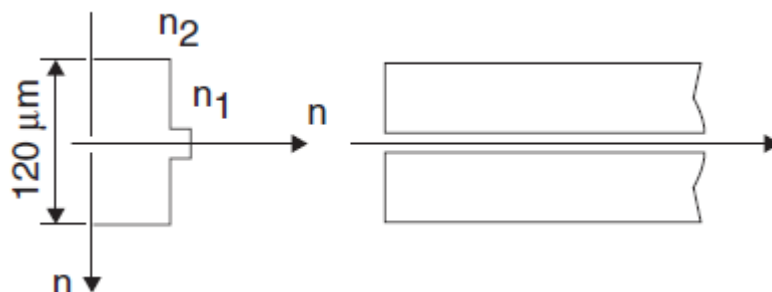
Constitution des fibres optiques

Les fibres optiques sont constituées :

- d'un **cœur** d'indice de réfraction n_1 **placé dans une gaine optique** d'indice de réfraction n_2 plus faible,
- d'une **enveloppe extérieure** de protection.

Les rayons lumineux sont guidés par le cœur si leur angle d'incidence est supérieur à un angle limite dépendant de n_1 et n_2 .

Les couples de matériaux les plus fréquemment utilisés sont : verre/verre, silice/silicone.



Industriellement les fibres optiques sont regroupées et incorporées dans un câble optique assurant la rigidité mécanique et la protection contre l'humidité et la lumière.

Émission-Réception

La transformation des signaux électriques en faisceaux lumineux est réalisée, après

modulation, par une source lumineuse.

Les fibres optiques présentant des minima d'atténuation à certaines longueurs d'ondes, l'**émission lumineuse** s'effectue par un émetteur optique émettant à ces longueurs d'ondes.

On utilise généralement les **diodes Laser** présentant un rayonnement très directif (6 à 8°)

Longueurs d'onde : $\lambda = 1,3$ à $1,6 \mu\text{m}$

Débit : jusqu'à 5 G.Baud (5×10^9 Bauds)

A la réception, on utilise des **photos diodes** qui délivrent un signal électrique dépendant de la quantité de lumière reçue.

Avantages-Inconvénients

Par rapport aux bus pour signaux électriques, les fibres optiques présentent les avantages et les inconvénients suivants :

- réduction de taille et de poids,
- insensibilité aux parasites électriques et électromagnétiques sauf aux rayons ionisants,
- parfaite sécurité en zone explosive,
- impossibilité de transmission de puissance,
- technologie élaborée des systèmes de raccordement aux émetteurs-récepteurs et de connexion bout à bout entre fibres.

d - Liaisons par ondes radio

Principe

Les messages binaires, après conversion dans un **modem**, sont transmis par ondes hertziennes entre un émetteur et un récepteur distants parfois de plusieurs dizaines de kilomètres.

Exemples

- plate-forme en mer et salle de contrôle à terre
- capteurs et actionneurs répartis dans la nature et salle de contrôle unique très éloignée

Dans ce système, la transmission du message est basée sur un codage binaire porté par un signal hertzien à modulation d'amplitude ou de fréquence.

Le 0 logique correspond à une impulsion étroite et le 1 logique correspond à une impulsion large. Un intervalle de durée toujours égale sépare chaque message binaire de ses voisins.

Avantages - Inconvénients

Les ondes hertziennes sont à propagation multidirectionnelle et donc capables de franchir les obstacles non métalliques.

Toutefois cet avantage peut créer des interférences et entraîner des anomalies de fonctionnement.

On y remédie en limitant généralement la portée de l'émetteur ce qui nécessite d'installer des stations de répétition intermédiaires pour la transmission sur longue.

5.4 Avantages-inconvénients des boucles "numériques"

Avantages

- Signaux peu sensibles aux perturbations et dont la précision ne se dégrade pas lors d'une communication.
Le bit représenté par une suite d'impulsions ne dépend pas de la dimension de ces impulsions. Même affaibli, le bit transmis reste le même.
- Signaux directement utilisables dans un calculateur ou un SNCC,
- Très grandes possibilités de configuration (échelle, zéro, unités, etc.) et facilité de dialogue avec les instruments numériques tels que transmetteurs,
- Nouvelles fonctions (ex : PID auto-adaptatif) irréalisables en analogique,
- Possibilité de connecter plusieurs appareils sur la même liaison numérique, ce qui permet de réduire les coûts de câblage et d'installation.

Inconvénients

- Normalisation des liaisons (bus, protocole) en cours et donc très imparfaite, ce qui pose des problèmes de compatibilité entre appareils de constructeurs différents,
- Actuellement, boucles en général hybrides (analogique - numérique),
- Nécessite des compétences nouvelles pour l'utilisateur.

6. Boucles tout ou rien

Les **boucles Tout Ou Rien** concernent les capteurs TOR (contacteurs de niveau, de pression, etc.) et les actionneurs TOR (électrovannes, relais, etc.).

Deux types de boucles sont utilisés :

- les boucles à manque d'énergie ou à sécurité positive,
- les boucles à émission d'énergie ou à sécurité passive.

6.1 Les boucles a manque d'énergie

La boucle TOR à manque est en permanence parcourue par un courant quand il n'y a pas défaut.

En cas d'anomalie il y a ouverture d'un contact.

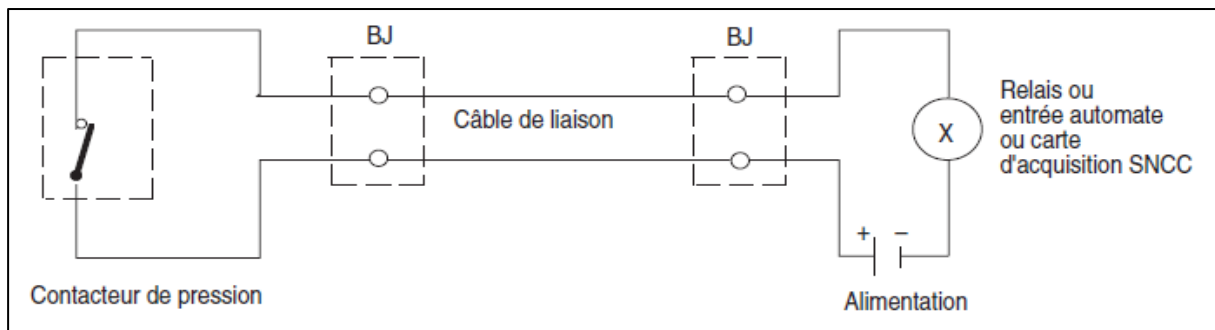


Figure 1-16 : Exemple de boucle TOR à manque, sans défaut du capteur.

La cause de l'anomalie peut être :

- un déclenchement du contacteur dû à un problème procédé ou à une défaillance de l'appareil,
- une rupture du câble de liaison,
- un défaut de connexion dans une boîte de jonction.

Ce montage signale toute anomalie due à une coupure de la boucle ce qui peut donc entraîner des déclenchements intempestifs (rupture de liaison, mauvais contacts, ...), mais n'en laisse passer aucune.

6.2 Les boucles à émission d'énergie

La boucle TOR à émission d'énergie est hors tension quand il n'y a pas défaut.

En cas d'anomalie il y a fermeture d'un contact.

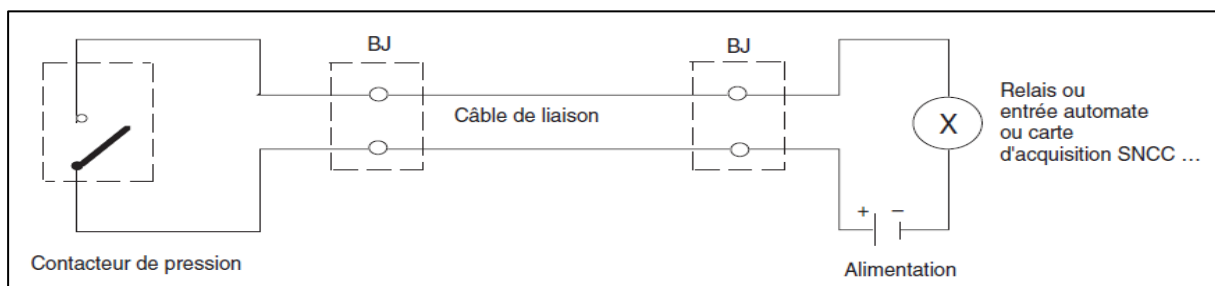


Figure 1-17 : Exemple de boucle TOR à émission, sans défaut du capteur

La cause de l'anomalie peut être :

- la fermeture du circuit suite à un problème procédé
- un court -circuit sur la boucle (assez rare)

Ce montage est inopérant en cas de coupure sur la boucle (fusible, bornier, câble de liaison, etc.), aucune information ou action n'est transmise ou exécutée.

Les boucles TOR à manque d'énergie sont donc préférées dans la plupart des cas.

6.3 Exemple de boucle tout ou rien

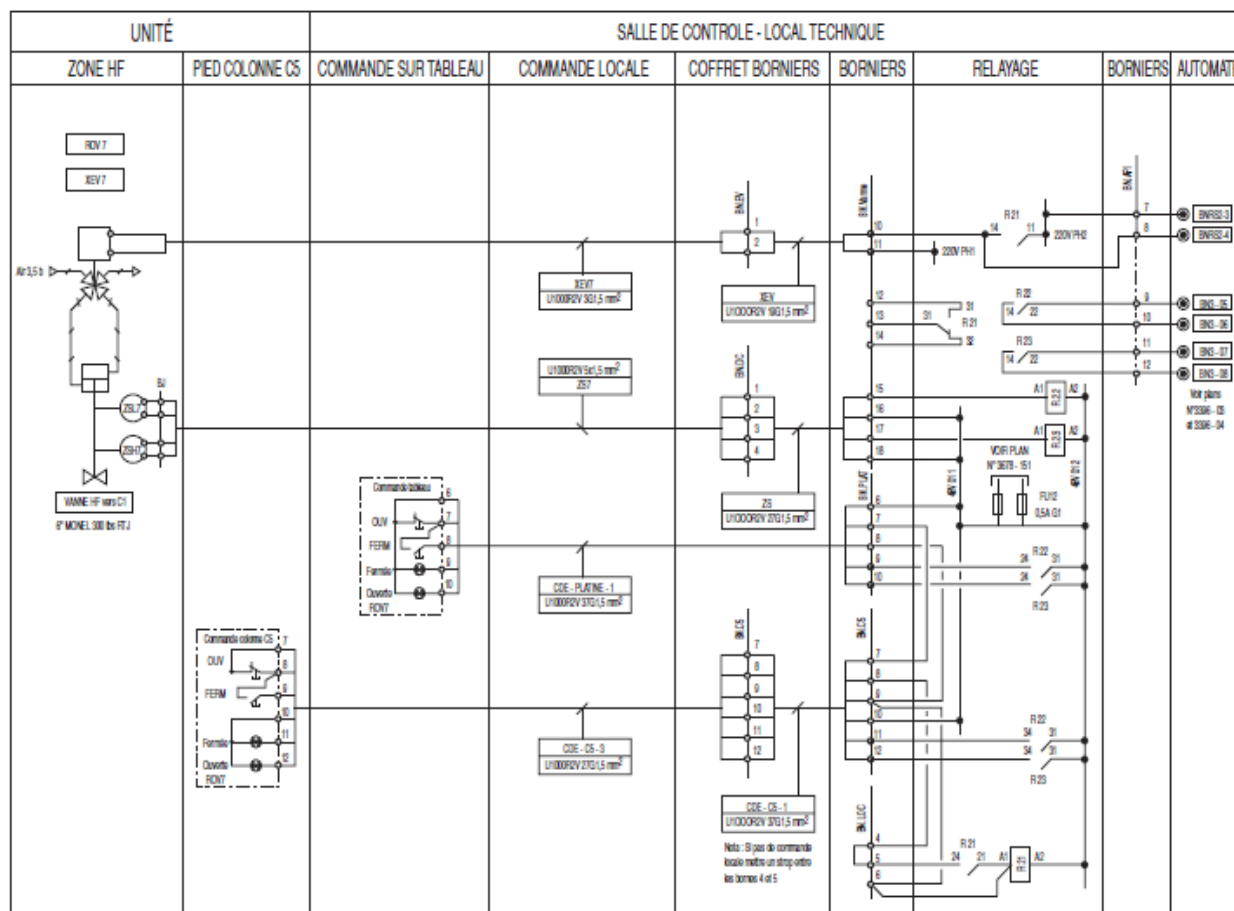


Figure 1-18 : Exemple de boucle TOR

1 Introduction

Afin d'assurer le suivi et le contrôle des installations les principaux paramètres opératoires sont mesurés et contrôlés dans les unités de fabrication industrielles (raffinerie, usine chimiques, pétrochimiques, ...).

Les principaux paramètres suivis sont généralement :

- ✓ les pressions
- ✓ les températures
- ✓ les niveaux
- ✓ les débits

On procède également à des mesures en continu de grandeurs liées à la qualité des produits finis ou au cours du processus de fabrication (pH, composition, taux d'humidité d'un gaz, etc).

La mesure de ces paramètres permet de répondre aux différentes exigences en termes de contrôle et de sécurité du procédé à savoir :

Chacune de ces exigences passent par l'acquisition, le suivi et la surveillance de ces paramètres de fonctionnement de l'installation. L'ensemble capteur – transmetteur permet d'assurer la prise de mesure et sa transformation en un signal exploitable par un régulateur de tableau (analogique ou numérique) ou un système de conduite type SNCC (Système numérique de contrôle commande) par exemple

Le schéma fonctionnel d'un tel ensemble peut être représenté de la façon suivante :

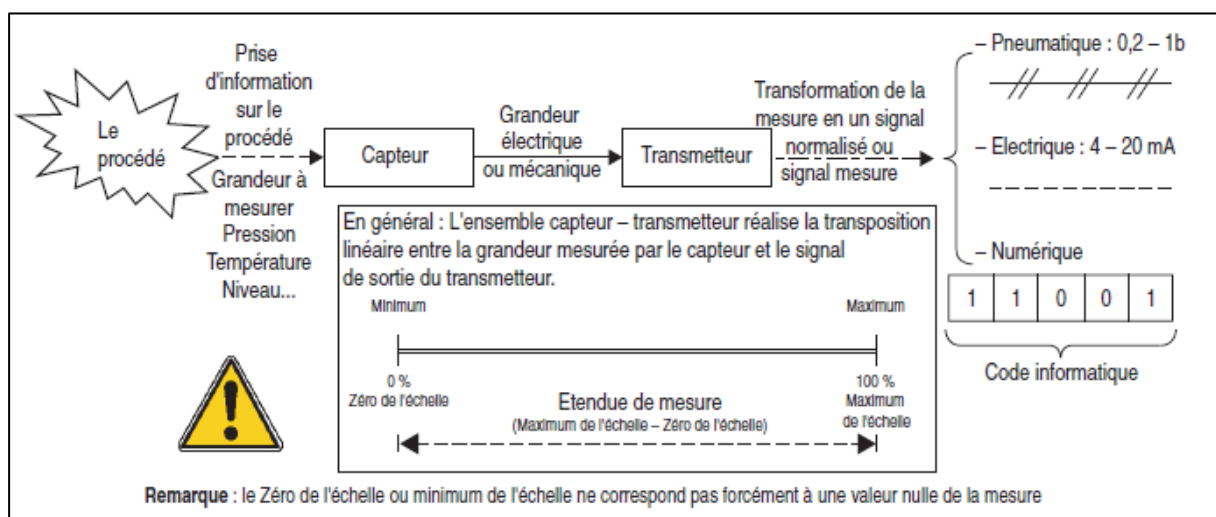


Figure 2-1 : Schéma fonctionnel d'une chaîne de mesure

Remarque : le Zéro de l'échelle ou minimum de l'échelle ne correspond pas forcément à une valeur nulle de la mesure.

Le capteur est l'élément d'acquisition de l'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (le plus souvent électrique ou mécanique). Cette seconde grandeur est alors représentative de la grandeur prélevée et peut être utilisable à des fins de mesure ou de commande.

Suivant la nature du capteur et son principe de fonctionnement, l'appareil de mesure peut assurer lui-même la conversion en énergie électrique, énergie thermique, mécanique, ou sous forme de rayonnement de la grandeur physique à prélever.

On peut citer par exemple, les mesures de températures

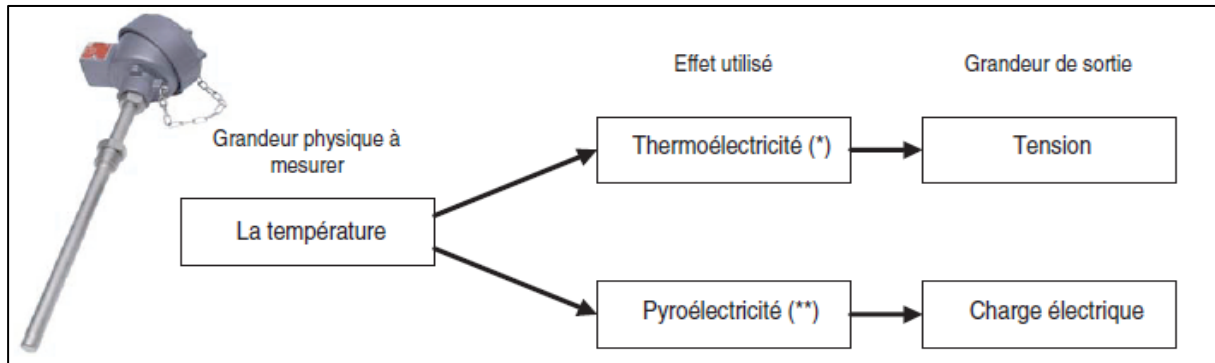


Figure 2-2 : Exemple de chaîne de mesure de températures

Pour la majorité des autres capteurs la conversion directe n'étant pas possible, le passage par une grandeur intermédiaire, le plus souvent une résistance ou une impédance, est nécessaire. Ce type d'appareil fonctionne donc

- ✓ soit par variation de dimension du capteur, c'est le cas d'un grand nombre de capteurs de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile (très employés dans les appareils de mesures de pression),...
- ✓ soit par déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression, accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge de contrainte liée à une structure déformable)

Pour des raisons de coût ou de facilité de mise en œuvre, certains capteurs ne sont pas sensibles directement à la grandeur mesurée mais à l'un de ses effets. C'est le cas, par exemple, lors de la mesure d'un niveau suivant la loi de l'hydrostatique.

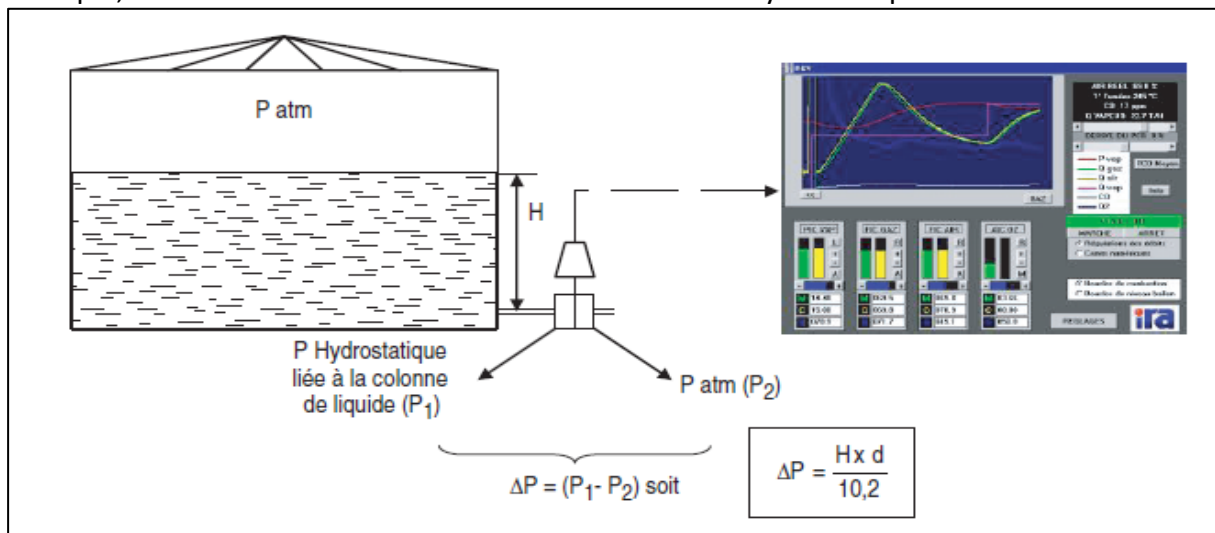


Figure 2-3 : Exemple de mesure de niveau suivant la loi de l'hydrostatique

Pour cet exemple, la mesure de la pression est le reflet de l'évolution de la hauteur de liquide dans le bac de stockage.

2 Constitution d'un capteur

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur quantitative exploitable (directement mesurable), telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité, une indication numérique ou la déviation d'une aiguille.

En général, l'appareil de mesure est un ensemble compact (capteur intégré) qui comprend le corps d'épreuve, le capteur proprement dit, et l'électronique de conditionnement.

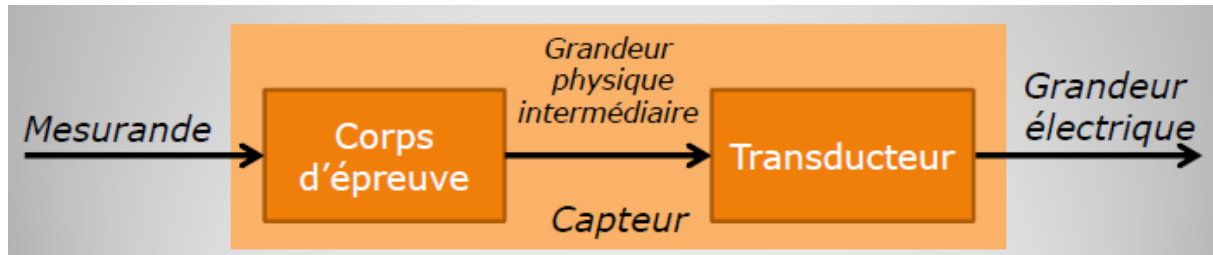


Figure 2-4 : Schéma de principe d'une chaîne de mesure

Le mesurande est la grandeur physico-chimique à mesurer, on la note X ou E pour se référer à l'entrée du capteur.

Le signal de sortie électrique, dit exploitable, peut être de nature :

- ✓ Analogique (continu dans le temps)
- ✓ Logique (binaire 0 ou 1, ou TOR : tout ou rien)
- ✓ Numérique (valeur > à deux états)

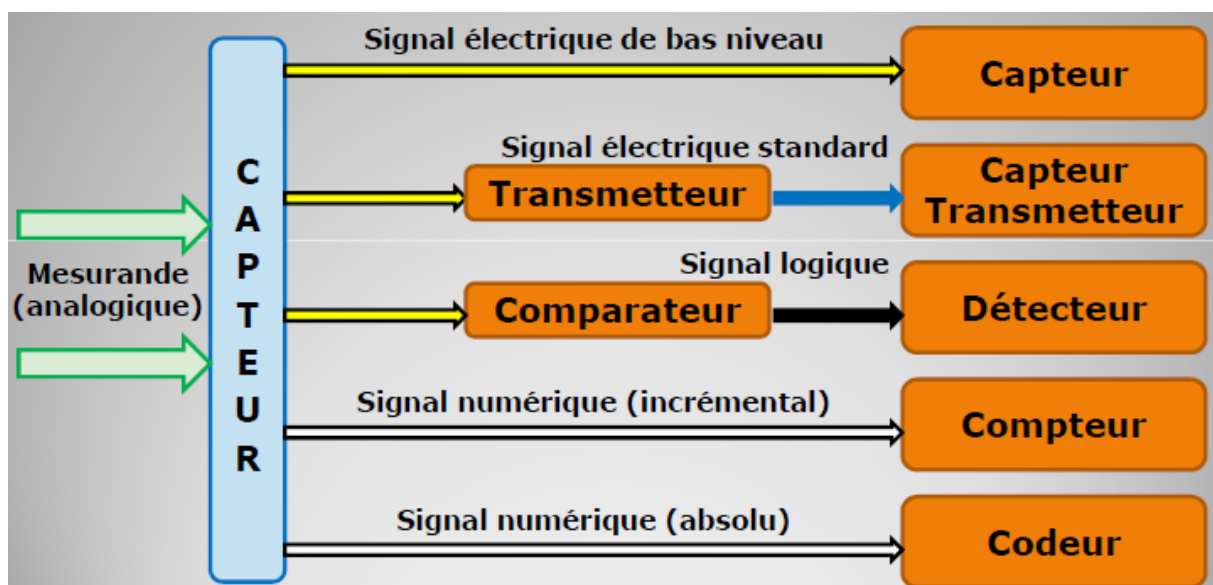


Figure 2-5 : Classification des capteurs

Le capteur est fixé sur le procédé et il délivre un signal de mesure de faible intensité, qui ne peut être transmis sur de grandes longueurs.

La solution consiste à faire appel à un transmetteur universel, soit intégré dans le boîtier de raccordement du capteur, soit déporté dans un boîtier ou monté sur rail dans un coffret d'instrumentation distant jusqu'à quelques dizaines de mètres du capteur.

3 Transmetteur universel

3.1 Schéma fonctionnel d'un transmetteur

Par rapport au capteur, le transmetteur convertit le signal de sortie du capteur en un signal de mesure standard (pneumatique, électrique ou numérique). Il a pour fonction d'assurer le lien entre le capteur qui génère la mesure et le système de contrôle commande (SNCC) ou d'acquisition de mesure.

D'après la norme NFC 46-303, un transmetteur est un appareil qui, recevant une vraie variable mesurée, produit un signal de sortie normalisé pouvant être transmis et ayant une relation continue et définie avec la valeur de la variable mesurée.

Le transmetteur est constitué d'un capteur associé à son conditionneur. Il permet ainsi la transmission de signaux exploitables pour la plupart des appareils de contrôle commande industriels.

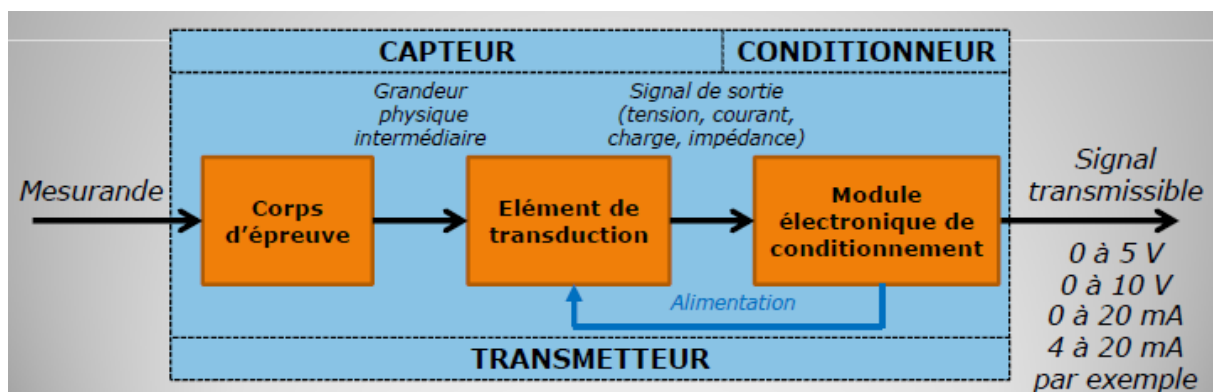


Figure 2-6 : Schéma de principe d'un transmetteur

Pour élaborer un signal normalisé à partir du signal généré par le capteur, le transmetteur comprend globalement un amplificateur, un filtre, et un module de traitement du signal.

Prenons l'exemple d'un transmetteur de pression délivrant un signal de sortie 4-20 mA :

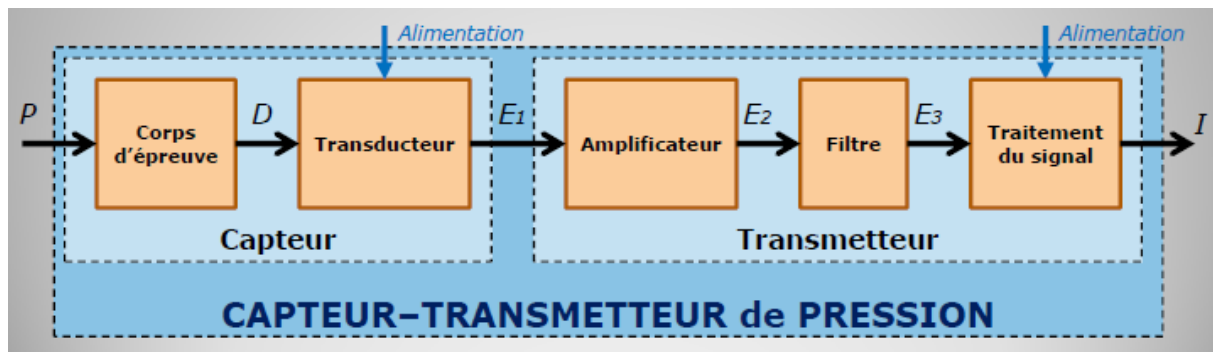
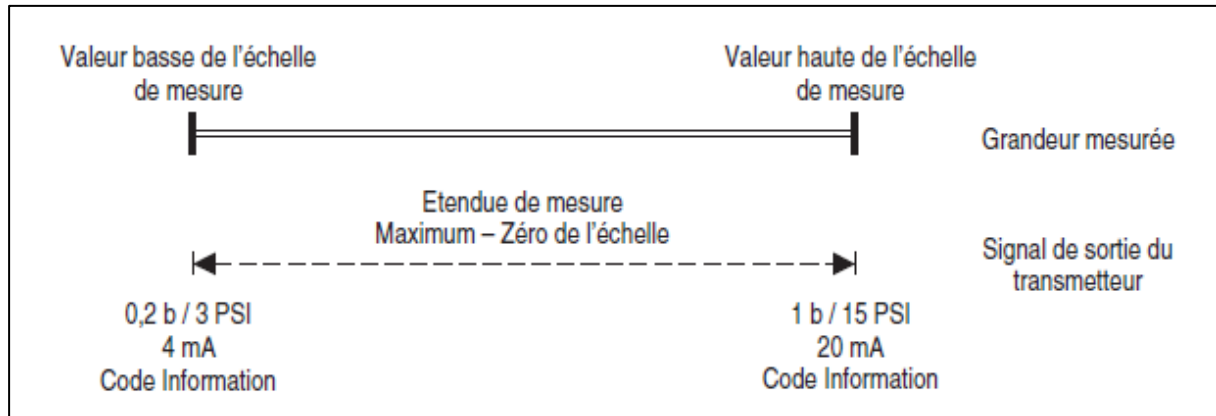


Figure 2-7 : Schéma de principe d'un transmetteur de pression

- ✓ L'amplificateur, en augmentant le niveau du signal électrique E1 délivré par le capteur, et en réduisant le rapport « bruit de fond / signal », il améliore ainsi la qualité du signal E2 transmis.
- ✓ Le filtre élimine ou atténue les signaux parasites dans la limite de certaines fréquences pour garantir un signal de mesure E3 convenable.
- ✓ Le module de traitement du signal réalise la fonction finale désirée, généralement linéaire, entre le mesurande P et la mesure I, et détermine la nature (tension ou courant), et l'intensité du signal de mesure.

Dans le cas du capteur-transmetteur de pression de notre exemple, le signal délivré est un courant I tel que : $I = a \cdot P + b$ avec a et b dépendants du réglage effectué.

L'ensemble capteur – transmetteur réalise la conversion linéaire entre la grandeur mesurée et le signal de sortie du transmetteur



Par rapport à un capteur simple, le transmetteur donne la possibilité d'intervenir au moins au niveau de deux réglages.

- ✓ La modification du zéro de l'appareil (Valeur minimum mesurée par l'appareil. Cette valeur peut être différente d'une valeur nulle)
- ✓ La modification de l'étendue de mesure (Différence entre les valeurs Maximum et minimum mesurées par l'appareil)

Un transmetteur délivre un signal standard (pneumatique ou électrique) selon sa technologie de fabrication.

Ces signaux sont :

- ✓ Pneumatique : 0,2 à 1 bar / 3 à 15 psi
- ✓ Electrique : courant (0 – 20 mA, 4 – 20 mA) ou tension (0 – 5 V , 1 – 5 V , 0 – 10 V)

En instrumentation industrielle, le signal 4-20 mA est maintenant un standard, et tous les fabricants d'instrumentation proposent ce signal.

Les **avantages** du signal analogique en courant 4-20 mA :

- ✓ Il n'est pas affecté par les chutes ohmiques de tension,
- ✓ Les tensions parasites ne l'influencent pas, grâce à l'impédance interne du générateur de courant en série dans la boucle,
- ✓ Il autorise la transmission de la mesure sur une distance supérieure à 1 km,

- ✓ Il possède une bonne immunité aux parasites de type magnétique,
- ✓ Il est économique, puisque deux fils par instrument suffisent pour l'alimentation en tension et la transmission de la mesure,
- ✓ La valeur 4 mA permet de différentier le zéro de mesure de la rupture de la transmission, et d'alimenter le transmetteur dans le cas d'un « 2 fils »,
- ✓ Il admet la superposition d'un signal numérique de communication HART.

L'**inconvenient** du signal en courant analogique 4-20 mA, est qu'une vérification du transmetteur conduit à couper la transmission, puisque tous les instruments sont montés en série dans une boucle de courant.

Certains constructeurs conditionnent leurs transmetteurs afin de pouvoir effectuer un test du signal sans couper la transmission, et le « signal HART » détourne également en partie cet inconvenient.

3.2 Structure interne d'un transmetteur intelligent

On désigne par transmetteur intelligent un instrument de mesure constitué de :

- ✓ Une chaîne de mesure pilotée par microprocesseur
- ✓ Une interface de communication bidirectionnelle

La chaîne de mesure comporte :

- ✓ Le capteur principal (spécifique au mesurande) et identifiable.
- ✓ Les capteurs secondaires propres aux grandeurs d'influence.
- ✓ Les dispositifs classiques de numérisation de la réponse de chaque capteur : (conditionneur, multiplexeur, amplificateur, filtre, échantillonneur bloqueur, convertisseur analogique/numérique).
- ✓ Un microprocesseur pour la gestion de l'acquisition, la correction des effets des grandeurs d'influence au moyen de paramètres stockés en PROM et des données fournies par les capteurs secondaires, la linéarisation, le paramétrage, le diagnostic.

L'interface de communication bidirectionnelle assure la liaison du capteur à un ordinateur central (unité de supervision, ordinateur PC, console de communication, ...) via un bus qui peut être partagé entre plusieurs transmetteurs intelligents.

Les avantages : configuration à distance, diagnostique, maintenance (alarmes).

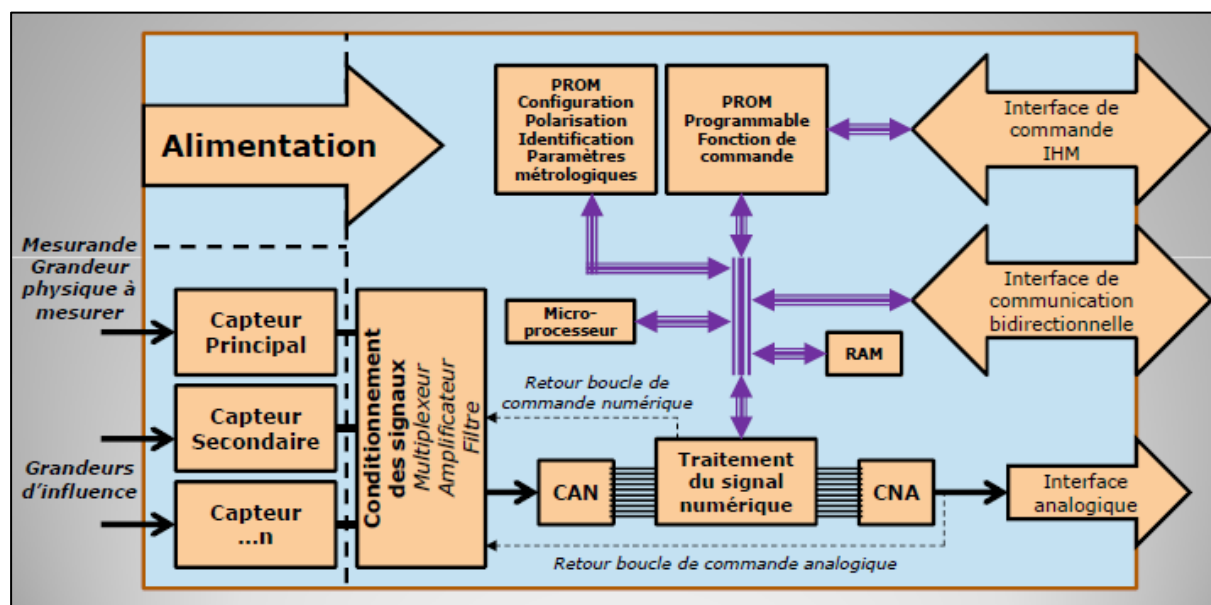


Figure 2-8 : Structure interne d'un transmetteur intelligent

3.3 Raccordement électrique des transmetteurs

Il existe des transmetteurs à « 2 fils », à « 3 fils » ou à « 4 fils ».

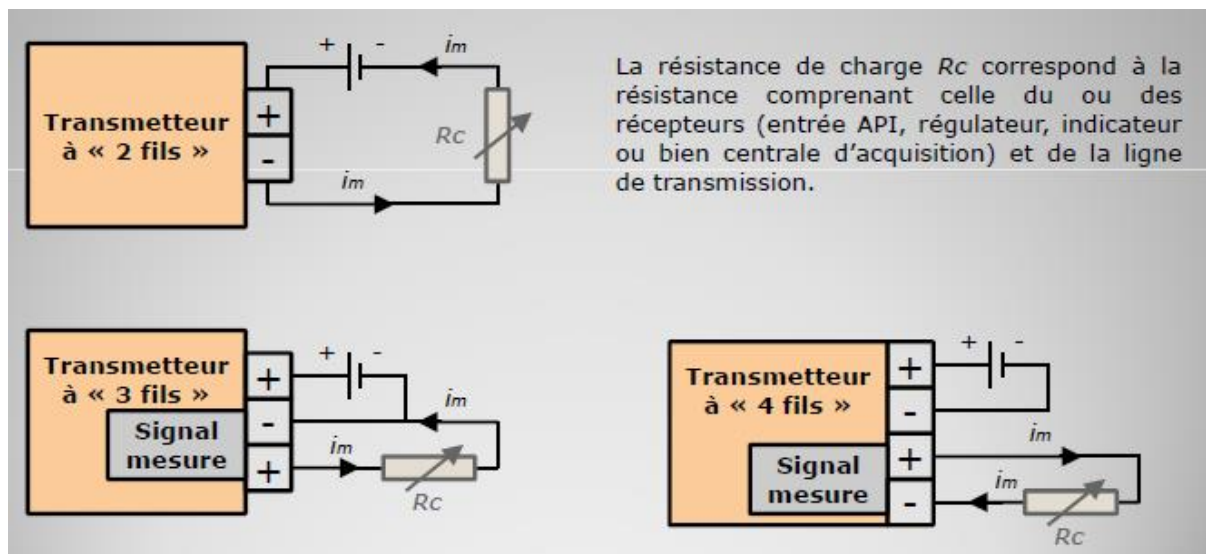


Figure 2-9 : Raccordement électrique des transmetteurs

	Signal de type courant		Signal de type tension	Alimentation en tension continue	Alimentation en tension alternative
Type de Transmetteur	4-20 mA	0-20 mA	0-5V 1-5V 0-10 V	10 Vdc à 48 Vdc en fonction de la charge	24 Vac 48 Vac 230 Vac
Transmetteur à 2 fils	oui	non	non	oui	non
Transmetteur à 3 fils	oui	oui	oui	oui	non
Transmetteur à 4 fils	oui	oui	oui	oui	oui

En instrumentation industrielle, par soucis d'économie et de standardisation, les transmetteurs à « 2 fils » en signal 4-20 mA sont les plus répandus.

3.4 Protocole de communication Hart

Le protocole HART (Highway Addressable Remote Transducteur) permet la communication simultanée de données analogiques et numériques. Ce protocole de communication de type série est spécifique au contrôle industriel et compatible avec les boucles de courant analogique 4-20 mA.

La communication effectuée sous forme digitale utilise un courant alternatif modulé en fréquence qui est superposé au courant analogique 4-20 mA sans l'altérer puisque sa valeur moyenne est nulle.

Le protocole est basé sur un système de modulation Bell 202 et du procédé FSK (Fréquency Shift Key). Le principe de base de la transmission de données sous le protocole HART consiste à moduler le signal analogique de la mesure dans la boucle de courant 4-20 mA avec le signal des données numériques transmises.

Les données numériques échangées avec un transmetteur HART sont modulées en fréquence:

- ✓ Un bit qui a la valeur 1 est codé par l'émetteur à une fréquence de 1200 Hz.
- ✓ Un bit qui a la valeur 0 est codé par l'émetteur à une fréquence de 2400 Hz.

L'amplitude du signal numérique est de 1 milliampère environ ($\pm 0,5$ mA autour de la composante du signal de mesure analogique).

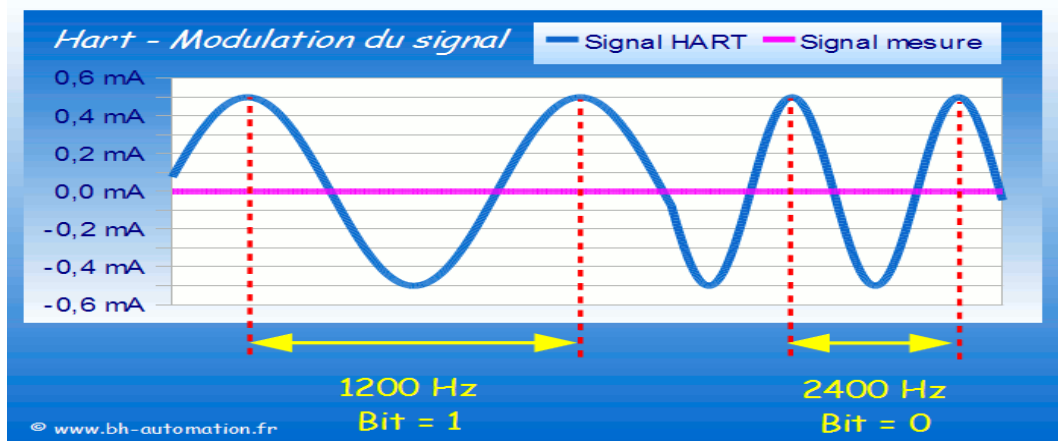


Figure 2-10 : Principe du protocole HART

Les paramètres de transfert des données sont imposés par la technologie et spécifiés en standard par le protocole :

- Débit de communication : 1200 bauds.
- Nombre de bits de départ : 1.
- Nombre de bits de données : 8.
- Parité : impaire.
- Nombre de bits de stop : 1.

Un périphérique informatique (un automate programmable, un ordinateur ou un terminal mobile) qui souhaite dialoguer avec un instrument de mesures selon le protocole HART devra utiliser les services d'un «MODEM HART» embarqué ou externe, pour pouvoir moduler et démoduler le signal de données.

Du terminal vers le capteur, le «modem HART» module en fréquence sur la boucle de courant les données reçues de son interface de communication.

Du capteur vers le terminal, le «modem HART» démodule le signal qui transite sur la boucle de courant et transmet les données au terminal via son port de communication.

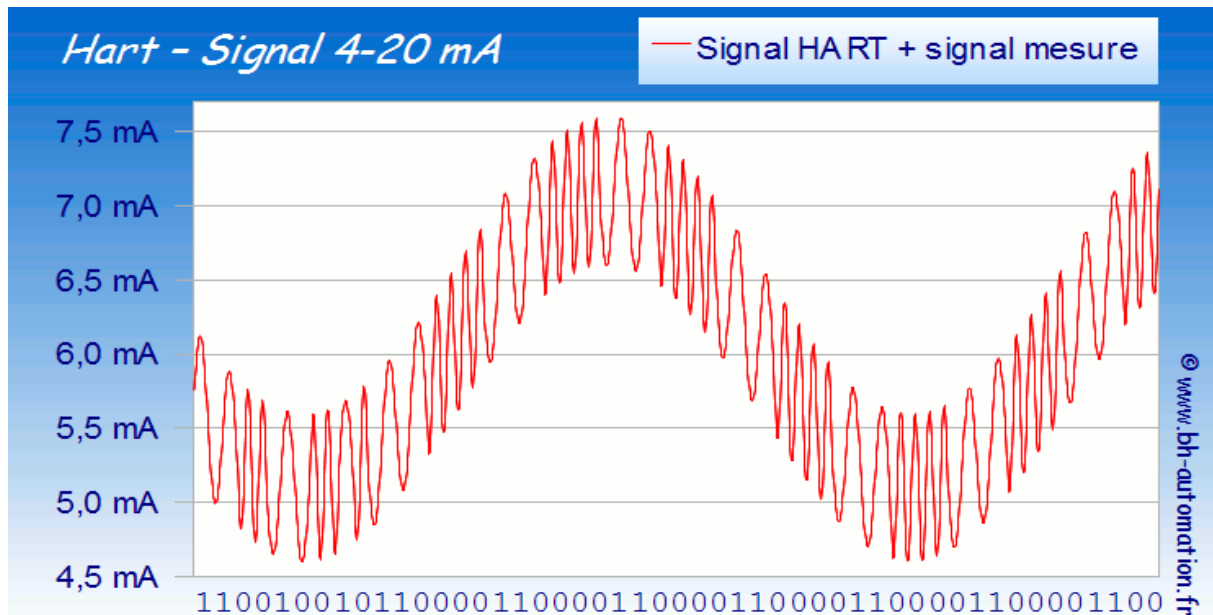


Figure 2-11 : Exemple de signal HART

- L'amplitude du signal analogique pour la mesure est de 16 mA, de 4 mA à 20 mA.
- L'amplitude du signal modulé pour les données est environ de 1 mA, $\pm 0,5$ mA par rapport à la valeur de la mesure.
- Le signal modulé est ajouté à la mesure, par conséquent la valeur moyenne du signal composite est égal à la valeur analogique de la mesure.

Le transmetteur option HART, repéré par son adresse, est configurable par un ordinateur équipé d'un modem FSK, ou via une console de configuration portative (Pocket HART), branché en parallèle sur la boucle de courant avec une résistance minimale de 250 Ω en série.

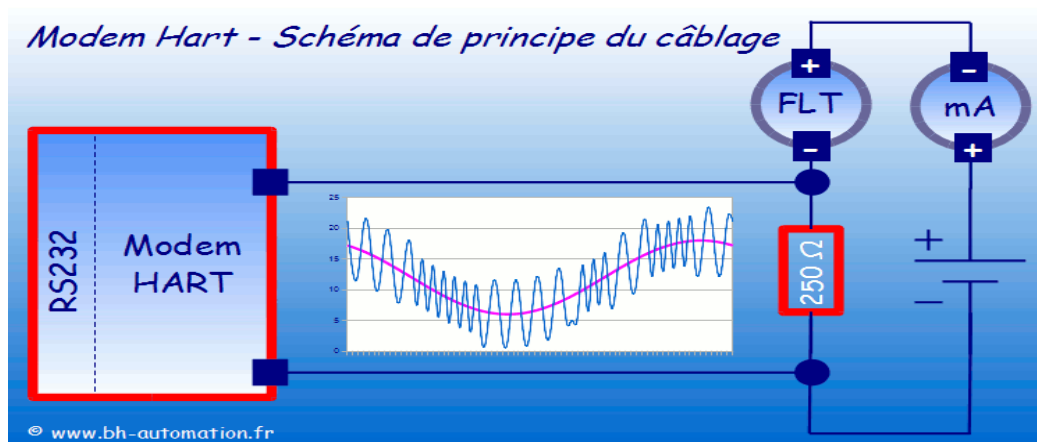


Figure 2-12 : Schéma de raccordement d'un équipement hart

L'expert peut alors régler l'étendue de mesure avec son unité, le temps de réponse, les valeurs d'alarmes, la validation d'une racine carrée sur le signal de mesure, bloquer le signal ou le simuler.

Pour la maintenance préventive, interroger l'état du transmetteur, de la mesure, de la température du fluide mesuré ou encore du boîtier.

La longueur maximale de cette transmission est de 3000 m avec un câblage en paire torsadée.

3.5 Caractéristiques météorologiques des instruments de mesure

a- Etendue d'échelle

L'échelle de mesure est donnée par la limite inférieure de mesure et la limite supérieure de mesure de l'instrument.

L'étendue d'échelle (EE) est la différence algébrique entre les valeurs extrêmes du mesurande qui peuvent être appliquées à l'instrument, et pour laquelle les caractéristiques métrologiques sont garanties.

Le terme usuel d'étendue d'échelle correspondant au terme normalisé d'intervalle de mesure.

Exemples d'étendue d'échelle

Débitmètre : échelle de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. $EE = 9 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Sonde de température : échelle de $-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. $EE = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Transmetteur de pression différentielle : échelle de -20 hPa à 40 hPa . $EE = 60 \text{ hPa}$.

b- Etendue de mesure

L'étendue de mesure (EM) est la différence algébrique entre les valeurs limites réglées par l'instrumentiste du mesurande qui peuvent être appliquées à l'instrument, et pour laquelle les caractéristiques métrologiques sont garanties.

Exemples d'étendue de mesure

Débitmètre réglé de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. $EM = 4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Sonde de température réglée de $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ à $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. $EM = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Transmetteur de pression différentielle réglé de -20 hPa à 20 hPa . $EM = 40 \text{ hPa}$.

c- Zéro de mesure

Le zéro de mesure est la valeur prise comme origine de l'information délivrée par l'instrument. Le zéro des transmetteurs industriels actuels est réglable par configuration.

Le décalage de zéro est dit positif si la valeur de l'étendue de mesure est supérieure à la valeur maximale.

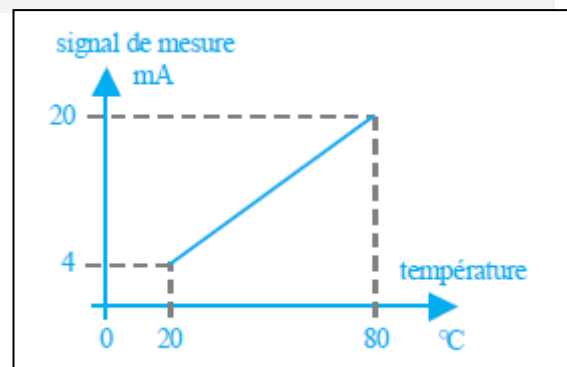
Le décalage de zéro est dit négatif si la valeur de l'étendue de mesure est inférieure à la valeur maximale.

Exemple

Caractéristiques obtenues par deux réglages d'un transmetteur de température d'échelle -100 °C à 300 °C délivrant un signal de mesure normalisé 4-20 mA proportionnel à la température.

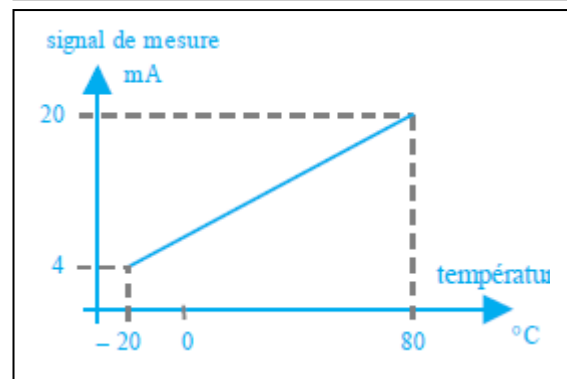
Réglage 1 :

- ✓ Valeur maximale mesurable = 80 °C
- ✓ Valeur minimale mesurable = 20 °C
- ✓ Etendue de mesure = 60 °C
- ✓ Valeur du zéro = 20 °C
- ✓ Décalage négatif car :
- ✓ EM (60 °C) < valeur maximale (80 °C)



Réglage 2 :

- ✓ Valeur maximale mesurable = 80 °C
- ✓ Valeur minimale mesurable = -20 °C
- ✓ Etendue de mesure = 100 °C
- ✓ Valeur du zéro = 20 °C
- ✓ Décalage positif car :
- ✓ EM (100 °C) > valeur maximale (80 °C)



d- Rangeabilité

La rangeabilité R d'un instrument s'exprime comme le quotient de l'étendue de mesure maximale réglable par l'étendue de mesure minimale réglable. Cette définition implique que le réglage d'étendue soit prévu par le fabricant.

$$R = \frac{E_{max}}{E_{min}}$$

Elle se note sous la forme **R : 1**, et elle chiffre la capacité de réglage de l'instrument. Une rangeabilité de **3 : 1** est médiocre, car il est classique d'avoir des rangeabilités entre 10 : 1 et 20 : 1. Certains transmetteurs numériques ont souvent des rangeabilités supérieures à 50 : 1, voire à 100 : 1, gage d'une très grande souplesse d'adaptabilité au problème de mesure.

Exemple

La notice d'un transmetteur de niveau annonce un réglage d'une étendue de mesure de 0,6 m à 30 m. La rangeabilité est $R = 30/0,6 = 50$ et elle est notée 50 : 1. Ce qui correspond à une excellente capacité de réglage.

e- Sensibilité

La sensibilité S_e est le quotient de l'accroissement du signal de sortie S de l'instrument par l'accroissement du signal d'entrée E correspondant obtenu en régime permanent :
 $S_e = dS/dE$.

Elle s'exprime en unité de la grandeur de sortie par unité de la grandeur d'entrée.

Lorsqu'un instrument est linéaire, la sensibilité indiquée est la pente de la droite qui est la meilleure approximation de la courbe d'étalonnage, généralement obtenue par la méthode des moindres carrés.

f- Linéarité

Un instrument est dit linéaire dans une plage déterminée du mesurande si sa sensibilité y est indépendante de la valeur du mesurande. L'écart de linéarité est la spécification qui permet d'apprécier la plus ou moins bonne linéarité d'une courbe d'étalonnage. Il est défini à partir de l'écart maximal entre la courbe d'étalonnage et la meilleure droite, et il est exprimé en pourcentage de la valeur maximale de la grandeur de sortie dans l'étendue de mesure considérée.

La courbe d'étalonnage est tracée à partir des points expérimentaux.

L'équation de la droite, appelée meilleure droite, qui est la représentation la plus probable est déterminée par la méthode des moindres carrés.

g- Exercice d'application

Un transmetteur de pression relative est de classe d'exactitude $C = 0,5$. Le signal de mesure est un courant normalisé de 4 à 20 mA. L'étendue de mesure du transmetteur est réglable de 0 à 50 hPa jusqu'à 0 à 700 hPa avec un décalage de zéro DZ réglable de 0 à 100 hPa.

On désire $EM = 300$ hPa et $DZ = 80$ hPa.

1. Tracer la caractéristique statique en indiquant EM et DZ .
2. Le décalage DZ est-il positif ou négatif ?
3. Déterminer la rangeabilité R de ce transmetteur.
4. Quelle est la sensibilité S_e réglée sur ce transmetteur ?
5. Déterminer l'erreur maximale ϵ_{maxi} pour une pression $P = 190$ hPa.

4 Environnement industriel de l'instrumentation

Il est primordial qu'un instrument satisfasse, par ses qualités intrinsèques, à sa fonction première. Mais il doit rester performant quelles que soient les contraintes que peut lui soumettre l'environnement du processus industriel, sans mettre en danger ni le personnel, ni l'installation, ni l'environnement par une pollution.

4.1 Environnement industriel

✓ Environnement

Tout appareil quel qu'il soit, instrument de mesure, de contrôle-commande ou autre, doit fonctionner dans les **conditions de services** imposées par le fonctionnement du processus sur lequel il opère, ainsi que dans le **milieu ambiant** dans lequel il évolue.

✓ Adaptation aux conditions de service

La corrosion dégrade les qualités de résistance mécanique de l'instrument notamment aux tenues à la température et à la pression de service. Le choix primordial du matériau détermine la compatibilité à la corrosion, et se détermine à partir de la composition chimique détaillée du produit en contact avec l'instrument.

Les valeurs des températures limites et pressions limites de service doivent être déterminées pour le fonctionnement normal du processus. En fixant une marge de sécurité pour le couple pression-température maximal, on détermine la série PN pour un matériau donné qui va satisfaire la résistance mécanique sous ces conditions.

Les services spécialisés des fabricants des instruments proposent des gammes complètes concernant les relations « matériau-pression-température ».

Tableau : Pression maximale admissible en bar en fonction de la température et de la série ISO PN pour aciers selon norme NF E 29 006.

Série ISO	20 °C	110 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
PN10	10,0	10,0	8,8	8,2	7,2	6,6
PN16	16,0	16,0	14,1	13,1	11,1	10,5
PN25	25,0	25,0	22,1	20,5	18,6	16,5
PN40	40,0	40,0	35,4	32,8	29,0	26,4

Exemple : un débitmètre (acier A48CP) mesurant un débit d'air sec à une pression entre 5 et 15 bar et une température maximale de 80 °C doit être de série PN16.

4.2 Degrés de protection

Tout matériel électrique est protégé par une enveloppe au point de vue poussières, pénétration de l'eau et impacts mécaniques externes, dont les degrés de protection sont indiqués par les codes IP et IK.

✓ Code IP : International Protection

Degré de protection, selon la norme NF EN 60529 (C20-010), de l'enveloppe contre l'accès aux parties dangereuses protégeant le personnel, la pénétration de corps solides étrangers et ou la pénétration de l'eau protégeant le matériel lorsque la tension est inférieure à 72,5 kV. Le code IP comprend 2 chiffres et deux lettres additionnelles non obligatoires : leurs significations sont données dans le tableau suivant :

	1 ^{er} chiffre IP		2 ^e chiffre IP
	Protection du matériel contre la pénétration de corps solides étrangers	Protection des personnes contre l'accès aux parties dangereuses avec :	Contre la pénétration de l'eau avec effets nuisibles
0	non protégé	non protégé	non protégé
1	de diamètre $\geq$ 50 mm	dos de la main	gouttes d'eau verticales
2	de diamètre $\geq$ 12,5 mm	doigt	gouttes d'eau à 15° d'inclinaison
3	de diamètre $\geq$ 2,5 mm	outil	pluie
4	de diamètre $\geq$ 1 mm	fil	projection d'eau
5	protégé contre la poussière	fil	projection à la lance
6	étanche à la poussière	fil	projection puissante à la lance
7			immersion temporaire
8			immersion prolongée
X	omission		omission

Exemples d'écriture :

IP65
IP5X
IPX4
IP14B
IP22S
IP21CM

Lettre additionnelle (option) contre l'accès aux parties dangereuses avec :		Lettre supplémentaire (option) spécifique à :	
A	dos de la main	H	matériel à haute tension
B	doigt	M	mouvement pendant l'essai à l'eau
C	outil	S	stationnaire pendant l'essai à l'eau
D	fil	W	intempéries

Exemple : un instrument IP33D est protégé des corps solides supérieurs à 2,5 mm et d'un outil, de la pluie, et, protège également le personnel de l'accès par un fil.

✓ Protection mécanique internationale : code IK

Degré de protection, selon la norme NF EN 50102 (C20-015), de l'enveloppe contre les impacts mécaniques nuisibles. Le code IK comprend 2 chiffres correspondants à l'énergie d'impact E en Joule.

IK	IK00	IK01	IK02	IK03	IK04	IK05	IK06	IK07	IK08	IK09	IK10
E (J)	0	0,15	0,2	0,35	0,5	0,7	1	2	5	10	20

Exemple : un instrument IK06 résiste à une énergie d'impact de 1 J, correspondant à une masse de 0,5 kg chutant d'une hauteur de 0,2 m (selon la norme).

4.3 Atmosphères explosibles ATEX

✓ Atmosphère explosible ATEX

Atmosphère susceptible de devenir explosive par suite des conditions locales et opérationnelles. ATEX : contraction de ATmosphère et de EXplosible.

✓ Atmosphère explosible dangereuse

Atmosphère explosive présente en quantités susceptibles de présenter un risque pour la santé et la sécurité des travailleurs ou d'autres personnes. Une atmosphère explosive de plus de dix litres présente en quantité constante dans des locaux fermés est considérée comme dangereuse, indépendamment des dimensions du local.

✓ Atmosphère explosive

Mélange d'air, dans les conditions atmosphériques, de substances inflammables sous forme de gaz, vapeurs, brouillards ou poussières, dans lequel, après inflammation, la combustion se propage à l'ensemble du mélange brûlé (Code du travail, art. R232-12-24).

✓ Explosion

Réaction brusque d'oxydation ou de décomposition entraînant une élévation de température, de pression ou les deux simultanément.

Le risque « poussières » est très difficile à apprécier car il n'existe pas d'analyseurs prévenant du niveau de dangerosité comme pour le gaz.

Sous certaines conditions de pression et de température; quelques cm³ de farine en suspension dans 1 m³ peuvent suffire pour avoir un risque d'explosion.

Un appareil IP6x présentera un niveau suffisant d'étanchéité à la poussière.

✓ Directives ATEX

Depuis le 1^{er} juillet 2006, les directives 1999/92/CE, dite ATEX118a, et 1994/9/CE, dite ATEX100a, sont d'application obligatoire sur l'ensemble de la communauté européenne.

La directive ATEX118a définit les prescriptions minimales visant à améliorer la protection en matière de sécurité et de santé des travailleurs susceptibles d'être exposés au risque d'atmosphères explosibles. La directive ATEX100a définit la conception et la construction du matériel utilisable en atmosphère explosible.

Pour satisfaire ces exigences, l'employeur est tenu d'évaluer s'il existe des risques d'explosion d'une ATEX, en tenant compte :

- de la probabilité de formation d'ATEX ;
- de la probabilité d'inflammation de ces ATEX, y compris par des décharges électrostatiques;
- de classer en zones les emplacements à risques où des ATEX peuvent se former;
- d'installer dans ces zones des matériels électriques et non électriques conformes à la directive ATEX 1994/9/CE ;

- de prendre des mesures organisationnelles telles que la formation et l'information du personnel appelé à travailler dans les zones à risque.

La classification des zones des atmosphères explosibles (directives 1999/92/CE) et catégories d'appareils (directive ATEX 1994/9/CE) est donné par le tableau suivant :

Zone		Niveau du risque	Appareils utilisables
Gaz	Poussières		
Zone 0	Zone 20	Emplacement où une ATEX est présente en permanence, pendant de longues périodes ou fréquemment	Catégorie 1
Zone 1	Zone 21	Emplacement où une ATEX est susceptible de se présenter occasionnellement en fonctionnement normal	Catégorie 1 ou 2
Zone 2	Zone 22	Emplacement où une ATEX n'est pas susceptible de se présenter en fonctionnement normal, ou, si elle se présente néanmoins, n'est que de courte durée	Catégorie 1, 2 ou 3

✓ Marquage spécifique des appareils électriques en zone ATEX

D'après la directive 1994/9/CE, les appareils ATEX doivent comporter des informations obligatoires et d'autres optionnelles (marquage supplémentaire).

Le marquage doit comporter : la mention Ex, le groupe de l'appareil, la catégorie de l'appareil et pour les groupes II, la lettre G ou D selon l'utilisation dans les gaz ou /et dans les poussières.

Exemples de marquage : Ex I M2 ; Ex IIB 2 G ; Ex IIB 2 D ia T4 ; Ex II 1 G T6.

Code de marquage des appareils électriques ATEX :

Groupe	Catégorie d'appareils	Marquage (D : Dust poussières)	Symbole Ex :  Marquage supplémentaire Groupes d'appareils en fonction du type de gaz explosible	
I (mines)	M1	Ex I M1		
I (mines)	M2	Ex I M2		
II (surface)	1 G (zone 0) 1 D (zone 20)	Ex II 1 G Ex II 1 D	IIA	Essence, hydracétal, méthane, propane...
II (surface)	2 G (zone 2) 2 D (zone 22)	Ex II 2 G Ex II 2 D	IIB	Butadiène, cyclopropane, éther, Ethylène, diéthylénique,...
II (surface)	3 G (zone 2) 3 D (zone 22)	Ex II 3 G Ex II 3 D	IIC	Acétylène, éthane, hydrogène, sulfure de carbone...

Marquage supplémentaire des appareils électriques ATEX

Lettre	Normes	Mode de protection	Principe
d	EN50018	Enveloppe antidéflagrante	Contact avec l'atmosphère explosible et possibilité d'explosion, mais celle-ci restant confinée dans le coffret de protection, très robuste
o	EN50015	Immersion dans l'huile	Possibilité d'étincelle interne mais impossibilité de la transmettre à l'atmosphère explosible
q	EN50017	Remplissage pulvérulent	
m	EN50028	Encapsulage	
p	EN50016	Surpression interne	Possibilité d'étincelle interne mais impossibilité que l'atmosphère explosible pénètre dans le boîtier
e	EN50019	Sécurité augmentée	Enveloppe hermétique. Pas de possibilité d'étincelle à l'intérieur, ni de températures excessives
ia – ib *	EN50020	Sécurité intrinsèque	Enveloppe non hermétique. Pas de possibilité d'étincelle à l'intérieur, ni de températures excessives

Classe de température ou Température maximale de surface

T1	T2	T3	T4	T5	T6
450 °C	300 °C	200 °C	135 °C	100 °C	85 °C

Il existe de nombreux systèmes de refroidissement ou de réchauffage pour amener la température ambiante de l'enveloppe extérieure du transmetteur à des limites acceptables, mais cela ne supprime pas le risque en zone ATEX.

4.4 Compatibilité électromagnétique

✓ Compatibilité électromagnétique CEM

C'est l'aptitude d'un appareil électrique à fonctionner de façon satisfaisante dans un environnement électromagnétique.

Un appareil, avec ses câbles d'alimentation et de signaux, doit être immunisé au mieux à un environnement électromagnétique et ne doit pas générer de perturbations électromagnétiques nocives à son environnement.

✓ Normes CEM

La directive européenne CEM 89/336/CEE exige que tout produit électrotechnique soit soumis à des essais de résistance au brouillage et d'émissions parasites. Lorsque l'appareil testé respecte les critères stipulés par les normes, il obtient le marquage CE (Communauté Européenne) attestant de sa conformité CEM avec ces normes.

- Les normes fondamentales décrivent les méthodes de mesure et de test de la compatibilité électromagnétique au point de vue immunité (normes CEI 1000).

- Les normes génériques se rapportent à un environnement particulier (résidentiel, commercial et industrie légère ou industriel) et fixent les spécifications de ces essais concernant l'émission et l'immunité et distinguent des niveaux d'aptitude électromagnétique dans une zone entre 0 et 400 GHz.
- Les normes de familles de produit décrivent les limites à respecter pour l'immunité comme pour l'émission à chaque catégorie d'appareils. Par exemple, la norme NF NE 61131 est relative aux automates programmables.

4.5 Exercice d'application

Répondre si les indices IP proposés sont suffisants selon les cas.

1. Un capteur doit être installé à l'extérieur d'un bâtiment et il doit protéger électriquement le personnel de l'introduction d'un doigt. **IP23 ? IP32 ?**
2. On doit nettoyer à l'eau savonneuse par lance un débitmètre d'un dépôt quotidien formé de particules solides d'un diamètre moyen de 0,5 mm. **IP65 ? IP56 ?**
3. Sonde plongeante de niveau placée à 45 m au fond d'un puits d'eau (cf. fiche 11). **IP6x ? IP8x ?**
4. Un capteur mesure un niveau de céréales dans un silo. Les poussières formées ont un diamètre moyen de 50 μm . La température d'auto-inflammation du nuage est de 520 °C, celle d'une couche de 5 mm est de 300 °C. Donner le code IP nécessaire et le code de protection ATEX satisfaisant à la directive 1994/9/CE.
5. Que signifie le marquage **Ex II B 1 D ia T5** ? L'appareil ainsi marqué peut-il convenir dans une zone 1 contenant de grandes quantités de gaz d'éther dont le point d'inflammation est de 160 °C ?

5 Techniques de mesure industrielle

5.1 Mesure de pression

La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée.

Les différentes unités de pression :

SI	Unité S.I	✓ Le pasca (Pa)
	Multiples et sous multiples	✓ Le déca Pascal (daPa) : 1 daPa = 10 Pa ✓ Le hecto Pascal (hPa) : 1 hPa = 100 Pa ✓ Le kilo Pascal (kPa) : 1 kPa = 10 ³ Pa ✓ Le Méga Pascal (MPa) : 1 MPa = 10 ⁶ Pa ✓ Le Bar (bar) : 1 bar = 10 ⁵ Pa ✓ Le millibar (mbar) : 1 mbar = 10 ² Pa
Hors système	Unités légales	✓ Le millimètre de mercure (mm Hg) 1 mm Hg = 133,322 Pa
	Unités non légales	✓ Le mètre de colonne d'eau. (m CE) ou (m H ₂ O) ✓ Le millimètre de colonne d'eau. (mm CE) ou (mm H ₂ O) ✓ Le kilogramme force par centimètre carré kgf / cm ² ou kg / cm ² ✓ Livre par pouce au carré (pound per square inch). (p.s.i.). (1 psi = 68,947 mbar).

Tableau de conversion

UNITES DE PRESSION									
	Pascal	Bar	kg/cm ²	Atmosphère	g/cm ² ou cm CE	mm Hg	mbar	Inch Hg	Psi
1 Pascal	1	10 ⁻⁵	1,02. 10 ⁻⁵	0,9869.10 ⁻⁵	1,02.10 ⁻²	0,75.10 ⁻²	10 ⁻²	0,2953.10 ⁻³	0,1451.10 ⁻³
1 Bar	10 ⁵	1	1,02	0,9869	1020	750	1000	29,53	14,51
1 kg/cm ²	0,980.10 ⁵	0,980	1	0,968	1000	735	980	28,96	14,22
1 Atmosphère	1,013.10 ⁵	1,013	1,033	1	1033	760	1013	29,95	14,70
1 g/cm ² ou 1 cm CE	98	0,098.10 ⁻²	10 ⁻³	0,968.10 ⁻³	1	0,735	0,98	0,02896	0,01422

1 mm Hg	133,3	$0,1333.10^{-2}$	$1,36.10^{-3}$	$1,315.10^{-3}$	1,36	1	1,333	0,03937	0,01934
1 mbar	100	$0,1.10^{-2}$	$1,02.10^{-3}$	$0,9869.10^{-3}$	1,02	0,750	1	0,02953	0,01451
1 Inch Hg	3386	$3,386.10^{-2}$	0,03453	0,03345	34,53	25,4	33,86	1	0,4910
1 psi	6890	$6,89.10^{-2}$	0,0703	0,068	70,3	51,75	68,947	2,041	1

Pression hydrostatique : Pression pour les fluides (liquide et gaz)

A l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse de fluide sur la surface considérée. La pression au fond de la colonne est égal à :

$$P_{Pa} = \rho_{kg/m^3} \times g_{m/s^2} \times h_m$$

Suivant le cas la mesure de pression peut être :

- une **pression absolue** : Les pressions absolues sont essentiellement utilisées pour les calculs par exemple en thermodynamique. Pour effectuer une mesure de pression absolue il est nécessaire de disposer d'une cellule de référence à pression nulle (Pression absolue égale à zéro)
- une **pression relative** : Elle caractérise le plus souvent une pression supérieure à la pression atmosphérique. C'est la valeur indiquée par la majorité des appareils de mesure de pression
- une **pression différentielle** : C'est une différence de pression entre deux points d'une installation ou d'un équipement (Par exemple un filtre)
- une **mesure de vide** : Elle caractérise une pression inférieure à la pression atmosphérique. La mesure du vide peut être indiquée en pression relative (Pression comprise entre -1 et 0 bar, ou en absolue, pression comprise entre 0 et 1 bar)

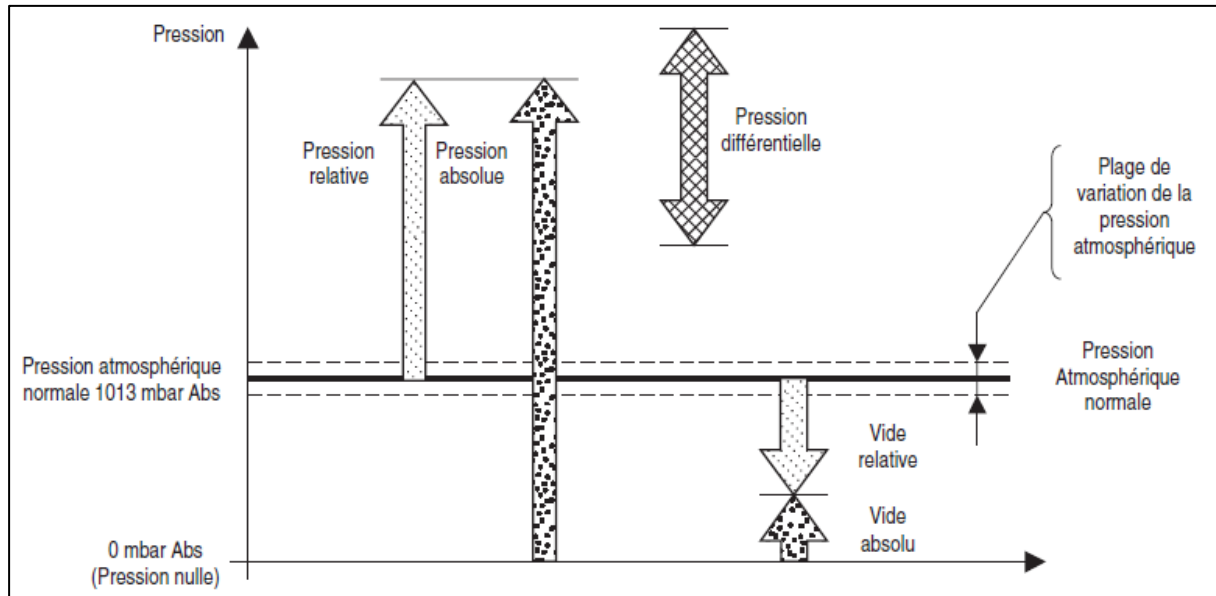


Figure 2-13 : Principe de mesure de la pression

Il existe différentes techniques qui permettent la mesure d'une pression ; les plus répandues sont :

- Les manomètres à liquide (Hydrostatique) (Tube en U, tube incliné,...)
- Les manomètres à déformation (Membrane, soufflet, tube de Bourdon,...)
- Les manomètres ou capteurs électroniques (Jauges de contraintes, piézorésistifs, capacitifs,...)

Suivant le mode de fonctionnement, l'information est soit disponible localement (cas des manomètres), soit retransmise en salle de contrôle (cas capteurs électroniques).

a- Les manomètres Hydrostatiques

La différence d'altitude h du liquide manométrique, entre les deux cotés d'un même tube en U, donne une mesure de la différence pression P entre les deux extrémités du tube. Ce manomètre offre une sensibilité sur sa partie droite :

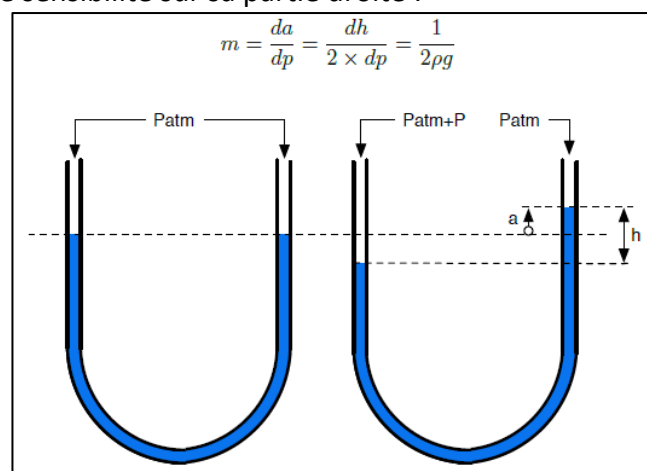


Figure 2-14: Mesure de la pression par manomètre en tube en U

On peut augmenter la sensibilité en utilisant un tube en U de sections inégales. Dans ce cas :

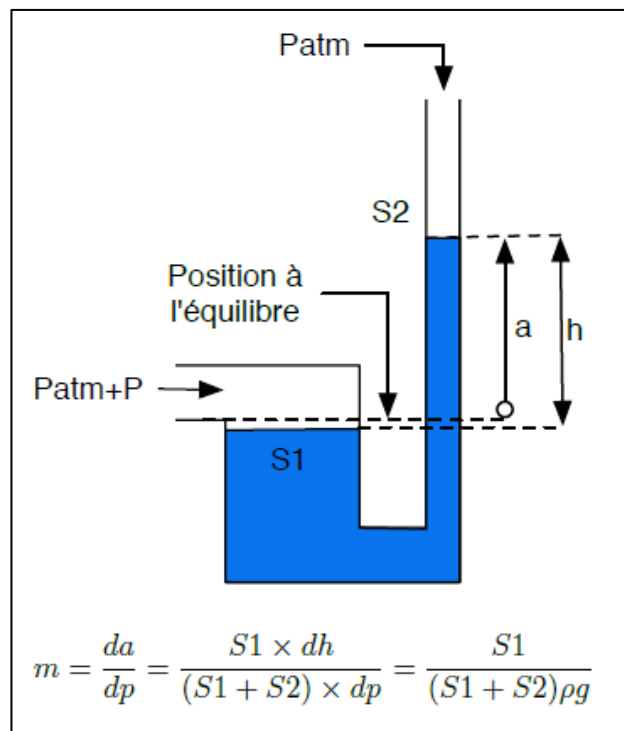


Figure 2-15: Mesure de la pression par manomètre en tube en U de sections inégales

Seule la hauteur verticale entre les deux interfaces liquide est à prendre en considération. Ce type d'appareil présente une bonne précision, une bonne stabilité et est le plus souvent de conception simple et peu coûteuse. Par contre, ils sont souvent :

- encombrants et fragiles,
- sensibles à la température et aux vibrations,
- incapables de pouvoir traduire l'information en un signal exploitable en régulation (la mesure ne peut être que locale).

b- Les manomètres à déformation de solide

• Manomètres métalliques - Indication locale

Ces instruments de mesure par voie mécanique permettent de satisfaire, moyennant quelques adaptations de montage, à la majorité des exigences des mesures de pression de l'industrie et du génie des procédés.

Ils sont équipés d'un organe élastique (tube de bourdon, membrane, capsule, soufflet, ...) qui, sous l'effet de la pression, effectue un déplacement défini et reproductible. Ce déplacement actionne une aiguille par l'intermédiaire d'un rouage. La pression peut alors être lue sur l'échelle du cadran dans l'unité désirée.

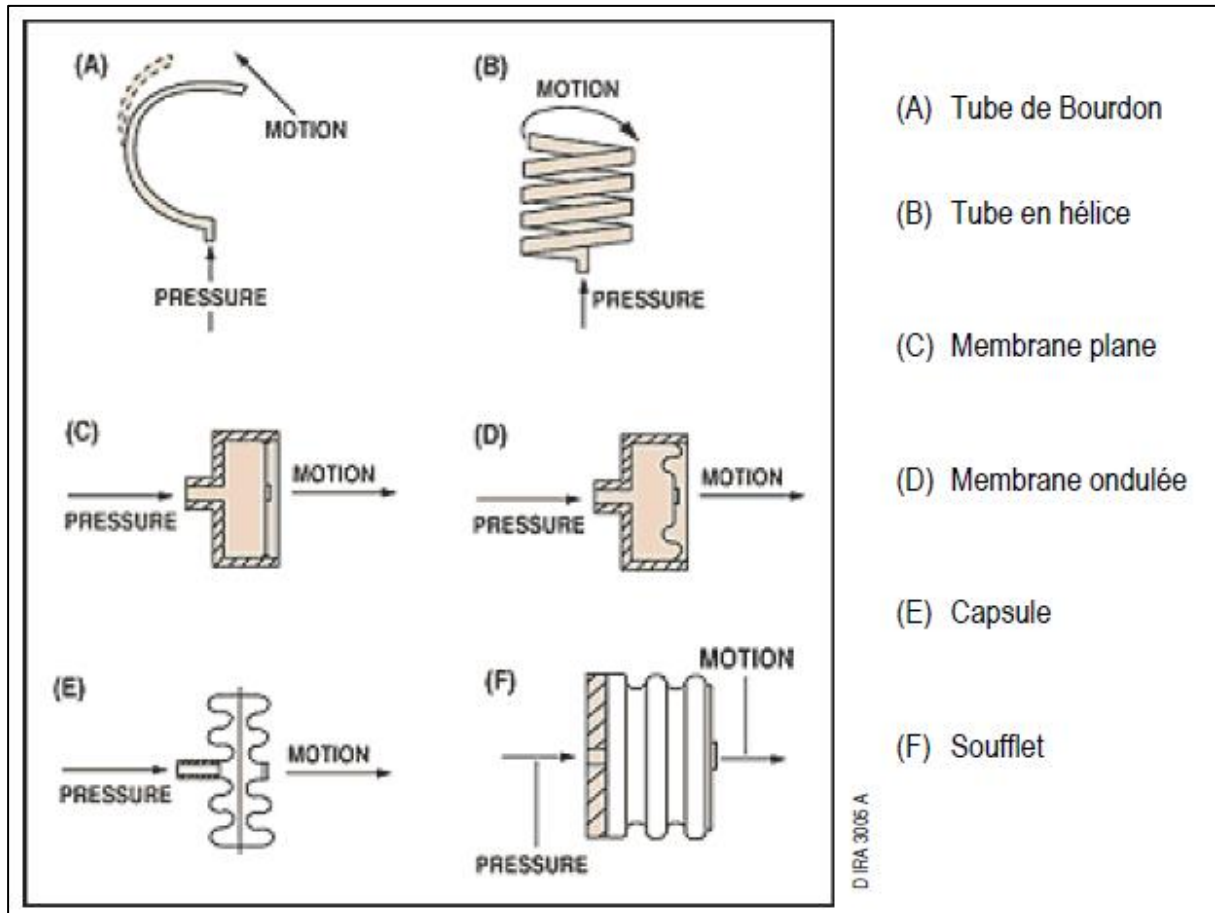


Figure 2-16 : Différentes formes de capteurs utilisés pour la mesure des pressions

- Le **tube de Bourdon** est brasé, soudé ou vissé avec le support de tube qui forme généralement une pièce complète avec le raccord. Par l'intermédiaire d'un trou dans le raccord, le fluide à mesurer passe à l'intérieur du tube. La partie mobile finale du tube se déplace lors de changement de pression (effet Bourdon). Ce déplacement qui est proportionnel à la pression à mesurer, est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier.

Les manomètres à tube de Bourdon sont utilisés pour la mesure de pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides, à condition que ceux-ci ne soient ni hautement visqueux ni cristallisant. Les étendues de mesure s'étalent sur toutes les plages de 0,6 bar à 4 kbar. Pour les étendues jusqu'à 40 bars inclus on utilise normalement la forme en arc et à partir de 60 bars la forme hélicoïdale. Les appareils sont fabriqués avec le raccordement vertical ou arrière. Il convient de les protéger contre les risques de surpression ou de dépassement d'échelle. Le tube de Bourdon ne permet pas de mesurer les phénomènes rapides et évolutifs de pression. L'incertitude de mesure varie de 0,02 à 0,2 % pour le domaine de mesure de 0 à 3 kbar.

- Le **manomètre à membrane** est tendu **entre deux brides**. Par un trou dans le raccord, le fluide à mesurer arrive dans la chambre de pression en dessous de

la membrane. La membrane se déplace sous l'effet de la pression. Le déplacement de la membrane est proportionnel à la pression mesurée et est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier. En cas de risque de corrosion due à des fluides agressifs, on peut protéger toutes les parties en contact avec le fluide par enduction de plastique ou par un film de protection.

Les manomètres à membrane sont utilisés principalement pour la mesure de faibles pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages selon DIN de 16 mbar à 40 bar. Les membranes de ces manomètres sont très minces et ondulées. De par leur forme, ils sont moins sensibles aux vibrations que les manomètres à tube et sont plus faciles à protéger contre les surcharges et les fluides agressifs. Pour l'utilisation avec des fluides hautement visqueux ou cristallisant il est possible de les équiper de brides ouvertes. Les appareils sont fabriqués avec un montage de membrane horizontal (à angle droit par rapport au cadran) ou vertical (parallèle par rapport au cadran). Etant donné qu'il n'y a pas de différence fondamentale de fonctionnement, la description suivante concerne l'exécution la plus courante, avec la membrane horizontale.

Les manomètres pour pression différentielle

Une capsule montée dans un boîtier étanche résistant à la pression, est soumise, de l'intérieur et de l'extérieur, à une pression. La différence de pression entre les deux parties provoque un mouvement de la capsule. Ce déplacement proportionnel à la différence de pression mesurée est transmis, par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille sur le cadran en tant que valeur de pression différentielle. Les deux pressions individuelles ne sont pas affichées.

Les manomètres pour pression absolue

Le principe de mesure de la pression absolue est indépendant de la forme de l'organe moteur. La pression du fluide à mesurer est mesurée par rapport à une pression de référence qui doit être égale à la pression absolue (vide absolu). C'est à dire le côté de l'organe moteur qui n'est pas en contact avec le fluide à mesurer doit se trouver à cette pression de référence. Selon la forme de l'organe moteur, on l'atteint en évacuant et étanchéifiant soit une chambre de référence soit le boîtier enrobant le système. La transmission du mouvement de l'organe moteur s'effectue comme pour les manomètres pour pression relative.

Les manomètres pour pression absolue sont utilisés pour la mesure de pression sans subir les variations de la pression atmosphérique environnante. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages de 10 mbar à 100 bar absolue.

c- Les manomètres électroniques

Suivant la nature de l'élément sensible, ce type d'appareil peut être :

Piézo-résistif :

- ✓ Piézorésistif à jauges de contrainte (ou piézorésistance d'un fil métallique) : C'est la propriété qui exprime la modification de la résistance R d'un matériau sous l'effet d'une déformation, ou de l'effet de la pression sur celui-ci. La cellule de mesure peut être métallique ou en céramique. La pression présente dans le procédé déforme légèrement la membrane au contact du fluide présent (gaz ou liquide) et transmet la force engendrée à l'élément de mesure (Corps d'épreuve et élément résistif) qui modifie la tension de sortie d'un pont de mesure.

Des jauges de contraintes sont collées sur le corps d'épreuve. Elles sont montées sur un pont de Wheatstone, par deux, ce qui permet une compensation des grandeurs d'influences.

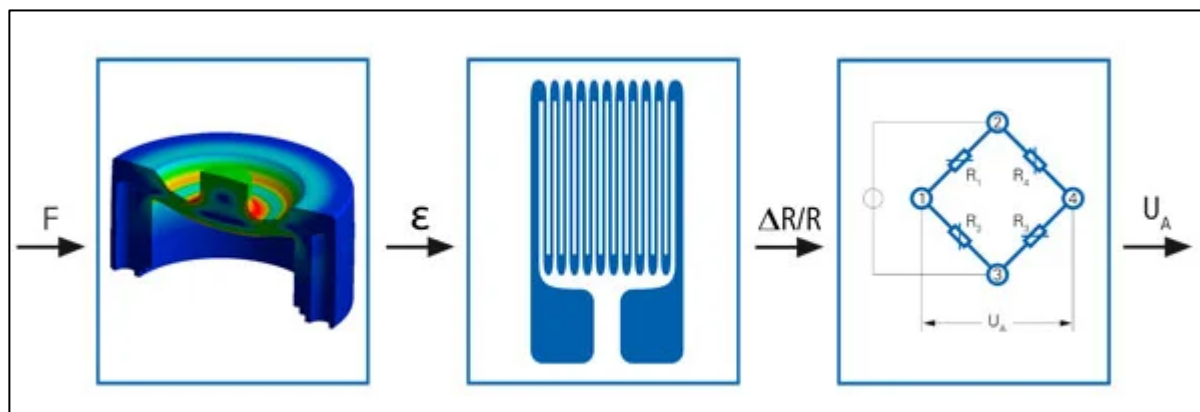


Figure 2-17 : Principe de mesure d'un capteur Piézorésistif à jauges de contrainte

Piézo-électriques

- ✓ Les structures piézo-électriques utilisées comme corps d'épreuve assurent directement la transformation de la contrainte, produite par l'application d'une force F , en une charge électrique Q . Le principe de fonctionnement reste similaire à celui des capteurs à jauges de contraintes.

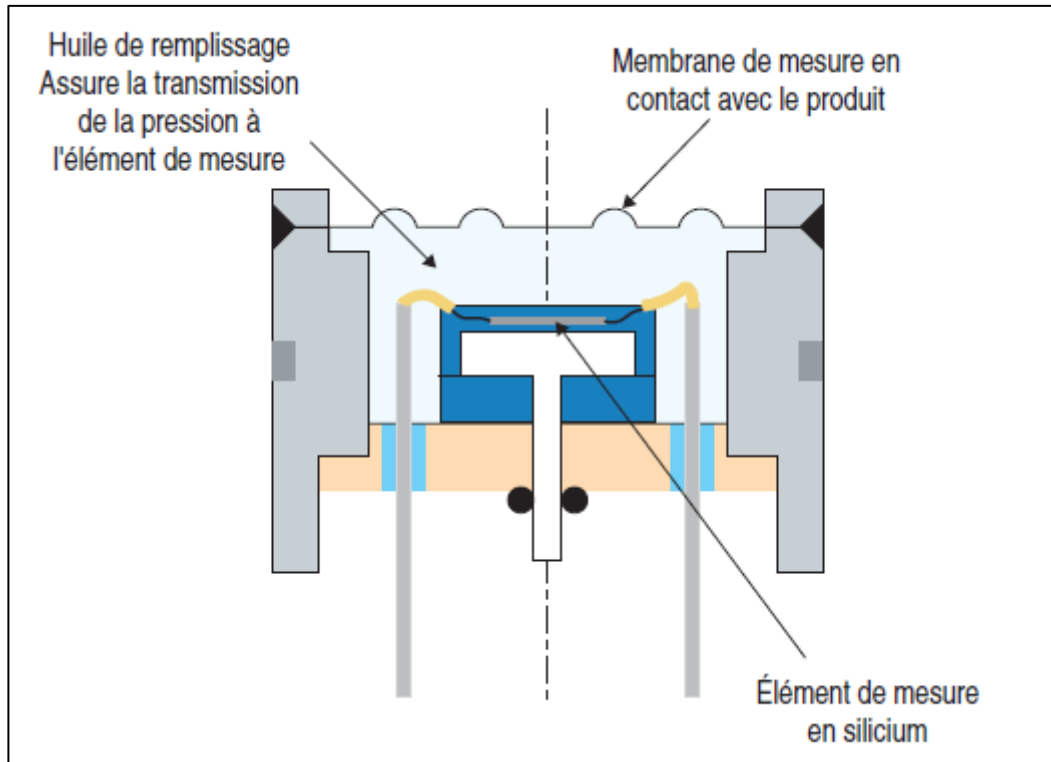


Figure 2-18 : Principe de mesure d'un capteur Piézo-électriques

Capacitif

- ✓ Le principe consiste à transformer la déformation de la membrane de mesure sous l'effet d'une force ou d'une pression en variation de capacité par modification de la distance entre les armatures que forme le condensateur. En effet, l'une des armatures du condensateur est placée sur la membrane qui se déforme (armature mobile), l'autre sur le corps du capteur qui n'est pas soumise à la déformation.

La mesure peut être locale ou retransmise à distance pour les appareils électroniques.

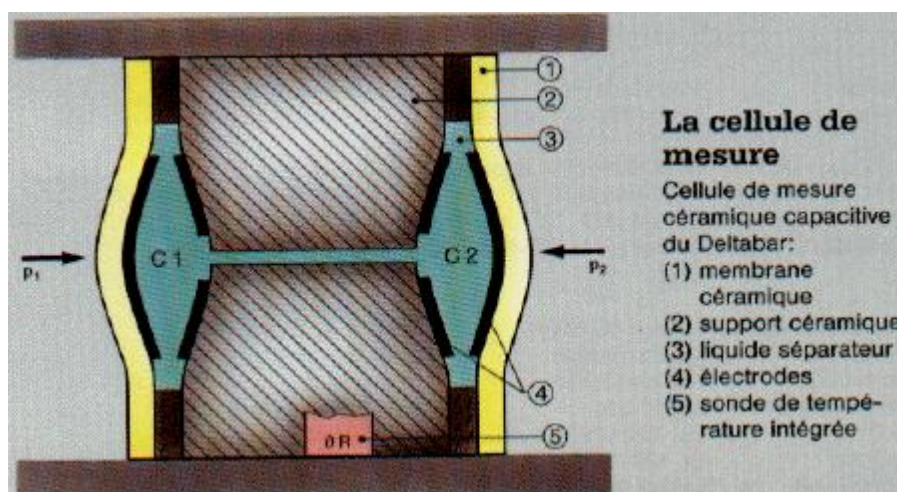


Figure 2-19 : Principe de mesure d'un capteur capacitif

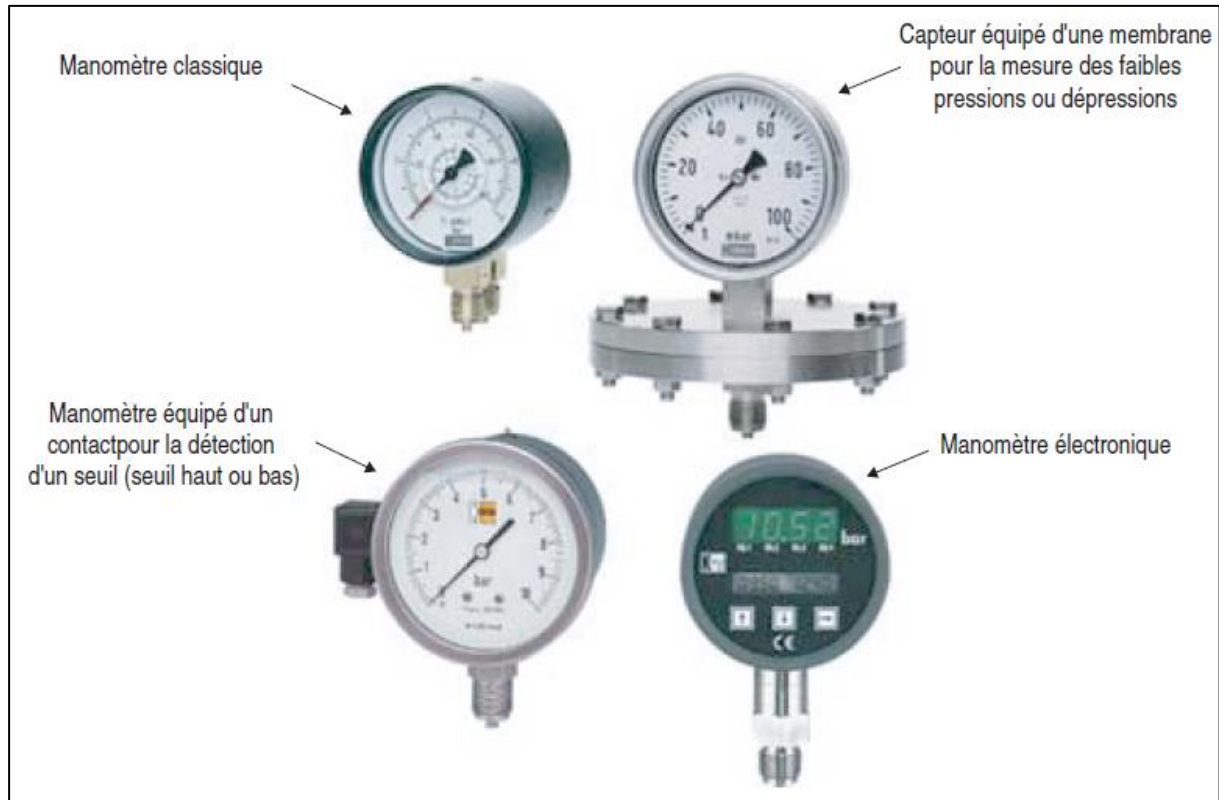


Figure 2-20 : Exemples de capteurs de pression

5.2 Mesure de température

La température dilate les liquides, modifie la valeur d'une résistance électrique et génère des tensions électriques. Différents types de thermomètres sont disponibles et installés dans les installations industrielles. Les mesures de température reposent le plus souvent soit sur les phénomènes de **dilatation thermique**, soit sur la **variation d'une grandeur électrique tension** ou **d'une résistance** suivant le type d'appareil.

Pour des questions de maintenance, les thermomètres ne sont généralement jamais en contact direct avec le produit, mais montés dans un puit thermométrique ou doigt de gant.

a- Mesure de température par RTD

Principe

La température d'un conducteur électrique est liée à sa résistance ohmique par une fonction généralement non linéaire et dépendante du matériau employé.

Les capteurs de températures RTD les plus connus sont les **thermistances** et les **résistances thermoélectriques métalliques**.

Les thermistances

Les thermistances sont des composants semi-conducteurs constitués d'un aggloméré de poudres d'oxydes métalliques. Leur forte sensibilité thermique limite leur emploi à une étendue de mesure de l'ordre de 50 °C dans une gamme comprise entre -100 °C et 250 °C.

Les résistances thermoélectriques métalliques

Dans les mesures de température de procédés industriels, les résistances thermo-électriques métalliques sont réalisées en cuivre, en nickel ou en platine.

Selon la norme CEI 751, la relation de la résistance de platine $R(T)$ avec la température T , qui permet de définir sa température à moins de 0,1 °C, est :

$$\text{Pour une plage de } -200\text{ °C à } 0\text{ °C : } \frac{R(T)}{R(0^{\circ}\text{C})} = 1 + A.T + B.T^2 + C.(T - 100).T^3$$

$$\text{Pour une plage de } 0\text{ °C à } 850\text{ °C : } \frac{R(T)}{R(0^{\circ}\text{C})} = 1 + A.T + B.T^2$$

La valeur de la résistance normalisée Pt100 est 100 Ω à 0 °C, soit $R(0^{\circ}\text{C}) = 100\text{ }\Omega$.

Les coefficients A, B et C sont déterminés par étalonnage. Pour les sondes industrielles, la valeur des coefficients est :

$$A = 3,90802 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}, B = -5,80195 \times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}, C = -4,27350 \times 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}.$$

Le tableau suivant donne la correspondance entre température et résistance pour des sondes industrielles telles que : $R(0\text{ °C}) = 100,00\text{ }\Omega$ et $R(100\text{ °C}) = 138,51\text{ }\Omega$.

Échelle Internationale de Température 1990 (EIT 90)

°C	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	°C
-200	18,52											-200
-150	39,72	37,64	35,54	33,44	31,34	29,22	27,10	24,97	22,83	20,68	18,52	-150
-100	60,26	58,23	56,19	54,15	52,11	50,06	48,00	45,94	43,88	41,80	39,72	-100
-50	80,31	78,32	76,33	74,33	72,33	70,33	68,33	66,31	64,30	62,28	60,26	-50
-0	100,00	98,04	96,09	94,12	92,16	90,19	88,22	86,25	84,27	82,29	80,31	-0
0	100,00	101,95	103,90	105,85	107,79	109,73	111,67	113,61	115,54	117,47	119,40	0
50	119,40	121,32	123,24	125,16	127,08	128,99	130,90	132,80	134,71	136,61	138,51	50
100	138,51	140,40	142,29	144,18	146,07	147,95	149,83	151,71	153,58	155,46	157,33	100
150	157,33	159,19	161,05	162,91	164,77	166,63	168,48	170,33	172,17	174,02	175,86	150
200	175,86	177,69	179,53	181,36	183,19	185,01	186,84	188,66	190,47	192,29	194,10	200
250	194,10	195,91	197,71	199,51	201,31	203,11	204,90	206,70	208,48	210,27	212,05	250
300	212,05	213,83	215,61	217,38	219,15	220,92	222,68	224,45	226,21	227,96	229,72	300
350	229,72	231,47	233,21	234,96	236,70	238,44	240,18	241,91	243,64	245,37	247,09	350
400	247,09	248,81	250,53	252,25	253,96	255,67	257,38	259,08	260,78	262,48	264,18	400
450	264,18	265,87	267,56	269,25	270,93	272,61	274,29	275,97	277,64	279,31	280,98	450
500	280,98	282,64	284,30	285,96	287,62	289,27	290,92	292,56	294,21	295,85	297,49	500
550	297,49	299,12	300,75	302,38	304,01	305,63	307,25	308,87	310,49	312,10	313,71	550
600	313,71	315,31	316,92	318,52	320,12	321,71	323,30	324,89	326,48	328,06	329,64	600
650	329,64	331,22	332,79	334,36	335,93	337,50	339,06	340,62	342,18	343,73	345,28	650
700	345,28	346,83	348,38	349,92	351,46	353,00	354,53	356,06	357,59	359,12	360,64	700
750	360,64	362,16	363,67	365,19	366,70	368,21	369,71	371,21	372,71	374,21	375,70	750
800	375,70	377,19	378,68	380,17	381,65	383,13	384,60	386,08	387,55	389,02	390,48	800
850	390,48											850

Exemple : valeur ohmique d'une sonde Pt100

Le tableau ci-dessus permet de lire : $R(335\text{ °C}) = 224,45\ \Omega$; $R(-20\text{ °C}) = 92,16\ \Omega$.

Lorsque la valeur n'est pas dans ce tableau, on fait un calcul d'interpolation : Pour $T = 412\text{ °C}$, comprise entre 410 °C et 415 °C [$R(410\text{ °C}) = 250,53\ \Omega$ $R(415\text{ °C}) = 252,25\ \Omega$] et on pose la relation :

$$R(412\text{ °C}) = R(410\text{ °C}) + \frac{412 - 410}{415 - 410} \cdot [R(415\text{ °C}) - R(410\text{ °C})]$$

$$R(412\text{ °C}) = 250,53 + \frac{2}{5} \cdot [252,25 - 250,53] = 251,218\Omega$$

Classe de précision

La norme NF EN 60751 indique les tolérances d'interchangeabilité des résistances thermoélectrique de platine Pt100, à coefficient $\alpha = 0,00385055\text{ °C}^{-1}$, pour deux classes de précision A et B. Les relations des tolérances en température sont linéaires, celles des tolérances en résistance ohmique ne le sont pas.

Température (°C)	Tolérance des sondes Pt100			
	Classe A		Classe B	
	± °C	± Ω	± °C	± Ω
-200	0,55	0,24	1,3	0,56
-100	0,35	0,14	0,8	0,32
0	0,15	0,06	0,3	0,12
100	0,35	0,13	0,8	0,3
200	0,55	0,20	1,3	0,48
300	0,75	0,27	1,8	0,64
400	0,95	0,33	2,3	0,79
500	1,15	0,38	2,8	0,93
600	1,35	0,43	3,3	1,06
650	1,45	0,46	3,6	1,13
700			3,8	0,17
800			4,3	1,28
850			4,6	1,34

Exemple : vérification d'une sonde Pt100

Une sonde Pt100 à vérifier est soumise à $T = 300\text{ °C}$. On mesure la valeur de sa résistance : $R(300\text{ °C}) = 211,71\text{ }\Omega$. La valeur théorique est $R(300\text{ °C}) = 212,05\text{ }\Omega$.

Cas d'une sonde Pt100 classe A : la tolérance est $\pm 0,27\text{ }\Omega$ à 300 °C .

On constate que la valeur mesurée $211,71\text{ }\Omega$ n'est pas dans l'intervalle $[212,05\text{ }\Omega - 0,27\text{ }\Omega : 212,05\text{ }\Omega + 0,27\text{ }\Omega]$: la sonde n'est pas conforme.

Cas d'une sonde Pt100 classe B : la tolérance est $\pm 0,64\text{ }\Omega$ à 300 °C .

On constate que la valeur mesurée $211,71\text{ }\Omega$ est dans l'intervalle $[212,05\text{ }\Omega - 0,64\text{ }\Omega : 212,05\text{ }\Omega + 0,64\text{ }\Omega]$: la sonde est donc conforme.

Câblage des sondes

La sonde Pt100 est connectée à l'instrument de mesure (transmetteur, régulateur ou automate) par des fils dont la résistance ohmique influence la valeur de la mesure de température. Pour ne pas générer une erreur de mesure inacceptable, la résistance ohmique du câblage doit être inférieure à la valeur de la tolérance de la sonde Pt100 utilisée. La connaissance de ce problème de câblage permet de choisir parmi les sondes disponibles : à deux, trois ou quatre fils de raccordement.

Code couleur des raccordements

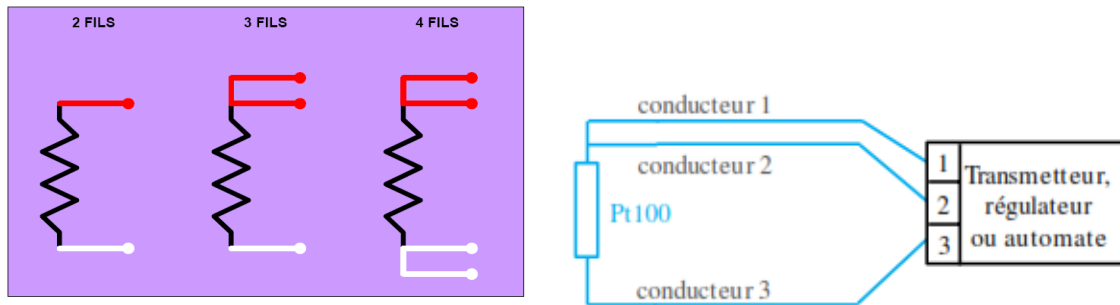


Figure 2-21 : Câblage des sondes à résistances

Sonde Pt100 à 2 fils

Dans le cas le plus simple d'une sonde à deux fils, il est impossible de distinguer les résistances parasites dues au raccordement avec la résistance de la sonde, et la précision de la chaîne de mesure est dégradée. Pour maintenir une précision satisfaisante, lorsque la longueur de câblage est importante, la solution consiste à mettre le transmetteur dans la tête de raccordement de la sonde.

Exemple : une distance de 25 m, entre une sonde Pt100 classe B et un transmetteur, nécessite une longueur de 50 m de fils de cuivre. La résistance ohmique totale de ces fils est de 2Ω , et correspond à une erreur d'environ 5°C . Pour une mesure de 200°C l'erreur relative due au câblage est de 2,5 %, bien supérieure à la tolérance de $1,3^\circ\text{C}$ soit 0,65 %.

Sonde Pt100 à 3 fils

La résistance créée entre les conducteurs 1 et 2, est soustraite, par le circuit électronique de l'appareil, de la valeur ohmique obtenue entre les conducteurs 1 et 3. La résistance des fils de raccordement est limitée, mais la résistance des contacts de connexion n'est pas supprimée.

Une longueur de câblage de l'ordre de 100 m n'influence pas la précision de la chaîne de mesure qui reste pratiquement celle de la précision intrinsèque de la sonde Pt100.

Sonde Pt100 à 4 fils

La résistance des fils de raccordement et la résistance des contacts de connexion n'interviennent plus dans la mesure ; c'est une sonde réservée à l'étalonnage. Les sondes Pt100 à 4 fils ont une précision intrinsèque dix fois supérieure aux autres sondes Pt100.

b- Mesure de température par thermocouple

Principe d'un thermocouple

Un thermocouple est un circuit électrique fermé, constitué par deux métaux différents A et B, dont les jonctions sont soumises à un gradient de température. La conversion d'énergie thermique crée un déplacement d'électrons et génère une force électromotrice (f.é.m.) de

Seebeck, qui dépend de la nature des deux métaux et de la différence des températures au niveau des jonctions.

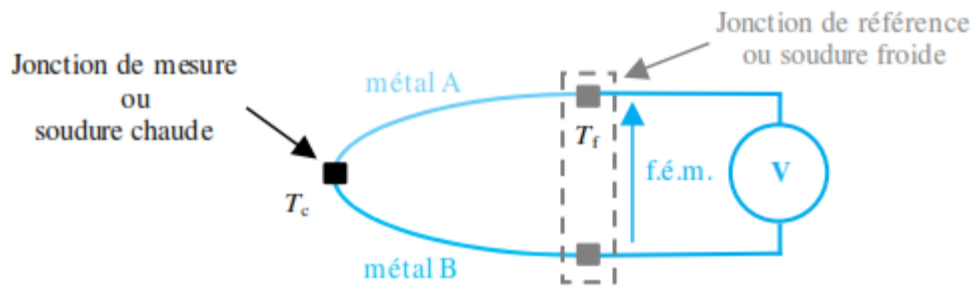


Figure 2-22 : Principe d'un thermocouple

Dans la désignation d'un thermocouple A/B, le métal A est le conducteur positif et le métal B le négatif. La jonction de mesure est soumise à la température T_c à mesurer, et la jonction de référence, reliant les bornes de l'instrument de mesure, est à une température T_f connue.

La f.é.m. de Seebeck, notée $E_{A/B}^{T_c, T_f}$, est positive lorsque la température T_c est supérieure à la température T_f . Elle est négative dans le cas inverse et nulle si les températures T_c et T_f sont égales.

Table de référence normalisée

La relation entre la température et la f.é.m. étant une fonction polynomiale complexe, c'est-à-dire non linéaire, il est d'usage d'utiliser des tables de conversion.

Pour chaque type de thermocouple, le report de la f.é.m. lue à la jonction de référence dans une table de référence normalisée (norme CEI 584.1) permet d'obtenir la valeur de la température de la soudure chaude. Il existe huit types de thermocouple normalisé codifiés par une lettre : K, J, T, N, E, S, R, et B. Le tableau suivant, donne la correspondance entre la température T_c (par pas de 10 °C) et $E_K^{T_c, 0}$ pour le thermocouple type K.

Propriétés spécifiques des thermocouples par type

Spécificités des thermocouples normalisés. Métaux courants pour K, T, J, N et E. Métaux précieux pour R, S et B

code	conducteurs positif négatif	Température en °C (hors isolants)		Indications pour thermocouples nus (les performances peuvent évoluer pour certains matériaux de gaine)
		Usage continu	Usage intermittent	
K	Nickel-Chrome Nickel- Aluminium	0 à 1 100	– 180 à 1 300	Le plus utilisé dans l'industrie pour sa grande étendue de mesure et son prix très faible. Utilisable en milieu oxydant. Moins stable que les autres thermocouples. Progressivement remplacé par le type N.
T	Cuivre Cuivre-Nickel	– 185 à 300	– 250 à 400	Applications cryogéniques. Très utilisé en laboratoire. Très bonne tolérance (± 0,5 °C à ± 1,0 °C).
J	Fer Cuivre-Nickel	20 à 700	– 180 à 750	Très utilisé dans l'industrie plastique. Fragilisé à basse température. Utilisable en milieu réducteur. Condensation oxydant le fer à éviter.

N	Nickel-Chrome- Silicium Nickel-Silicium	0 à 1 150	– 270 à 1 300	Dernier né des thermocouples. Meilleure tenue à l'oxydation que le type K. Plus stable que les thermocouples K, T, J et E. Très bonne stabilité en milieu nucléaire. De 10 à 20 fois moins onéreux que les types S ou R pour les mêmes qualités jusqu'à 1 300 °C.
E	Nickel Cuivre-Nickel	0 à 800	– 40 à 900	F.é.m. la plus élevée des thermocouples. Utilisable en milieu oxydant ou inerte. Meilleure précision que le type E.
R	Platine Rhodié 13 % Platine	0 à 1 600	0 à 1 700	Plus stable et f.é.m. plus forte que le type S.
S	Platine Rhodié 10 % Platine	0 à 1 550	0 à 1 700	Tolérance très intéressante (± 1 °C de 0 °C à 1 100 °C en classe 1). Résistance élevée à l'oxydation et à la corrosion.
B	Platine Rhodié 30 % Platine Rhodié 6 %	100 à 1 600	0 à 1 800	À utiliser entre 600 et 1 600 °C, car en dessous la f.é.m. est très faible. D'ailleurs, si la température de référence est entre 0 et 50 °C, la CSF n'est pas nécessaire.

Table de référence basée sur l'Échelle Internationale de Température 1990 (EIT 90) pour thermocouple Nickel-Chrome / Nickel-Aluminium (type K) F.é.m. en microvolts, jonction de référence à 0 °C

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-200	-5 891	-6 035	-6 158	-6 262	-6 344	-6 404	-6 441	-6 458			
-100	-3 554	-3 852	-4 138	-4 411	-4 669	-4 913	-5 141	-5 354	-5 550	-5 730	-5 891
-0	0	-392	-778	-1 156	-1 527	-1 889	-2 243	-2 587	-2 920	-3 243	-3 554
0	0	397	798	1 203	1 612	2 023	2 436	2 851	3 267	3 682	4 096
100	4 096	4 509	4 920	5 328	5 735	6 138	6 540	6 941	7 340	7 739	8 138
200	8 138	8 539	8 940	9 343	9 747	10 153	10 561	10 971	11 382	11 795	12 209
300	12 209	12 624	13 040	13 457	13 874	14 293	14 713	15 133	15 554	15 975	16 397
400	16 397	16 820	17 243	17 667	18 091	18 516	18 941	19 366	19 792	20 218	20 644
500	20 644	21 071	21 497	21 924	22 350	22 776	23 203	23 629	24 055	24 480	24 905
600	24 905	25 330	25 755	26 179	26 602	27 025	27 447	27 869	28 289	28 710	29 129
700	29 129	29 548	29 965	30 382	30 798	31 213	31 628	32 041	32 453	32 865	33 275
800	33 275	33 685	34 093	34 501	34 908	35 313	35 718	36 121	36 524	36 925	37 326
900	37 326	37 725	38 124	38 522	38 918	39 314	39 708	40 101	40 494	40 885	41 276
1 000	41 276	41 665	42 053	42 440	42 826	43 211	43 595	43 978	44 359	44 740	45 119
1 100	45 119	45 497	45 873	46 249	46 623	46 995	47 367	47 737	48 105	48 473	48 838
1 200	48 838	49 202	49 565	49 962	50 286	50 644	51 000	51 355	51 708	52 060	52 410
1 300	52 410	52 759	53 106	53 451	53 795	54 138	54 479	54 819			

Loi des températures successives

Cette loi permet de déterminer la température T_c de la jonction de mesure à partir de la f.é.m. mesurée à la jonction de référence lorsque la température T_f est différente de 0°C pour un thermocouple A/B.

$$\text{On a : } E_{A/B}^{T_c, 0} = E_{A/B}^{T_c, T_f} + E_{A/B}^{T_f, 0}$$

$$\begin{array}{ccc} \text{f.é.m. à lire dans la} & \leftarrow E_{A/B}^{T_c, 0^\circ\text{C}} = E_{A/B}^{T_c, T_f} + E_{A/B}^{T_f, 0^\circ\text{C}} \rightarrow & \text{f.é.m. à lire dans la} \\ \text{table de référence} & & \text{table de référence} \\ \text{pour déduire } T_c & \nwarrow \text{f.é.m. mesurée à la} & \\ & \text{jonction de référence} & \end{array}$$

Exemple : sachant que $T_f = 30^\circ\text{C}$ et thermocouple (type K).

Pour connaître la température T_c : On relève la tension à la jonction de référence du thermocouple $E_K^{T_c, T_f} = 18589 \mu\text{V}$, On lit à partir de la table de référence du thermocouple K, la fém pour $T_f = 30^\circ\text{C}$ $E_K^{30^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}} = 1203 \mu\text{V}$.

La loi des températures successives conduit à : $E_K^{T_c, 0} = E_K^{T_c, T_f} + E_K^{T_f, 0} = 18589 \mu\text{V} + 1203 \mu\text{V} = 19719 \mu\text{V} \Rightarrow T_c = 480^\circ\text{C}$ (d'après le tableau de référence du thermocouple K).

Loi des conducteurs intermédiaires

La f.é.m. d'un couple thermoélectrique n'est pas modifiée si on intercale dans le circuit un ou plusieurs conducteurs intermédiaires, de nature différente, à la condition que les nouvelles jonctions de ces conducteurs soient maintenues à la même température deux à deux.

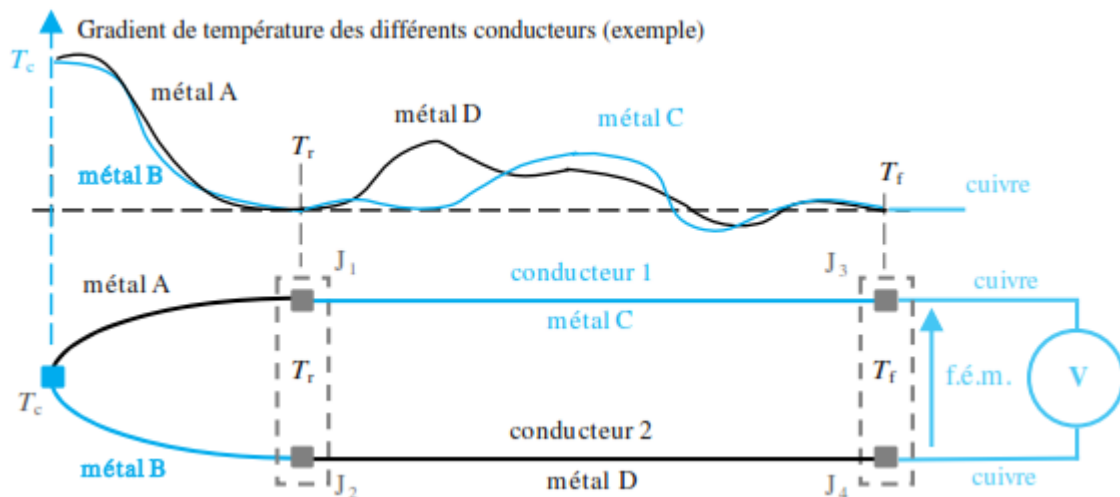


Figure 2-23 : Principe des conducteurs intermédiaires

Compensation de soudure froide

La connaissance de la température de la soudure froide est indispensable pour déterminer la température de la soudure chaude. Deux cas pratiques se présentent.

- Température de soudure froide constante à 0 °C

Lorsque la soudure froide est à 0 °C, la mesure de la f.é.m. permet de connaître directement la température de la soudure chaude à l'aide des tables de référence.

Dans ce cas idéal, les conducteurs de la soudure froide doivent être insérés dans un milieu thermostaté à 0 °C avec une précision meilleure que celle du thermocouple. À utiliser uniquement pour un étalonnage en laboratoire.

- Température de soudure froide variable

Industriellement, c'est un circuit électronique qui mesure automatiquement la température de la soudure froide, à partir d'une thermistance placée près de la jonction de référence, et ajoute la f.é.m. correspondante $E_{A/B}^{T_c, 0}$ à la f.é.m. de mesure $E_{A/B}^{T_c, T_f}$. La tension exploitée est $E_{A/B}^{T_c, 0}$ et correspond à la température mesurée. Ce circuit est appelé circuit de compensation de soudure froide, souvent noté CSF, et intégré dans l'instrument de mesure (transmetteur, régulateur ou automate). La CSF doit être validée dans la configuration de cet instrument.

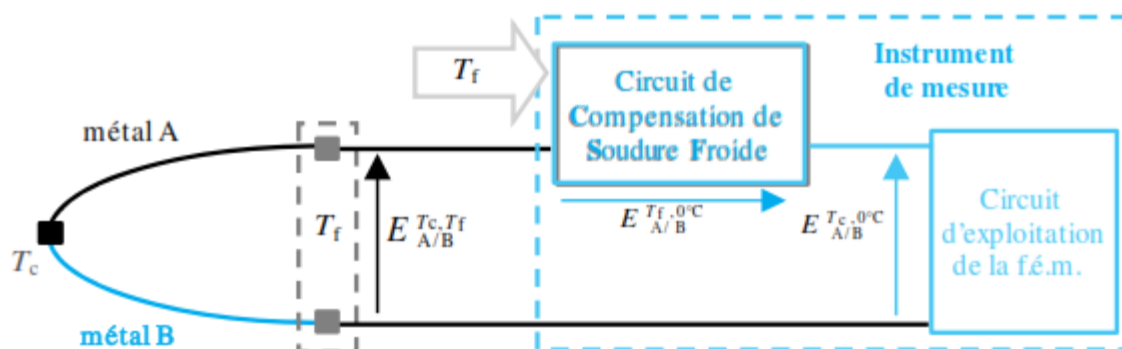


Figure 2-24 : Principe de compensation de soudure froide

Câbles d'extension ou de compensation

Industriellement, comme la distance est éloignée entre la jonction de mesure et la jonction de référence, on emploie soit des câbles d'extension soit des câbles de compensation. Leurs caractéristiques, telles que le domaine de température d'utilisation, la tolérance ou le repérage par couleurs, sont données par la norme NF C 42-324.

• Câbles d'extension

Les câbles d'extension sont des fils de même nature que ceux du thermocouple et sont employés pour le relier jusqu'à la jonction de référence. C'est la meilleure solution au point de vue précision, mais la moins économique.

• Câbles de compensation

Les câbles de compensation sont des fils de nature différente de ceux du thermocouple mais dont les propriétés thermoélectriques sont équivalentes dans un domaine restreint de température d'environ 100 °C à 200 °C entre T_r et T_f . C'est une solution économique, mais moins précise qu'avec l'emploi des câbles d'extension.

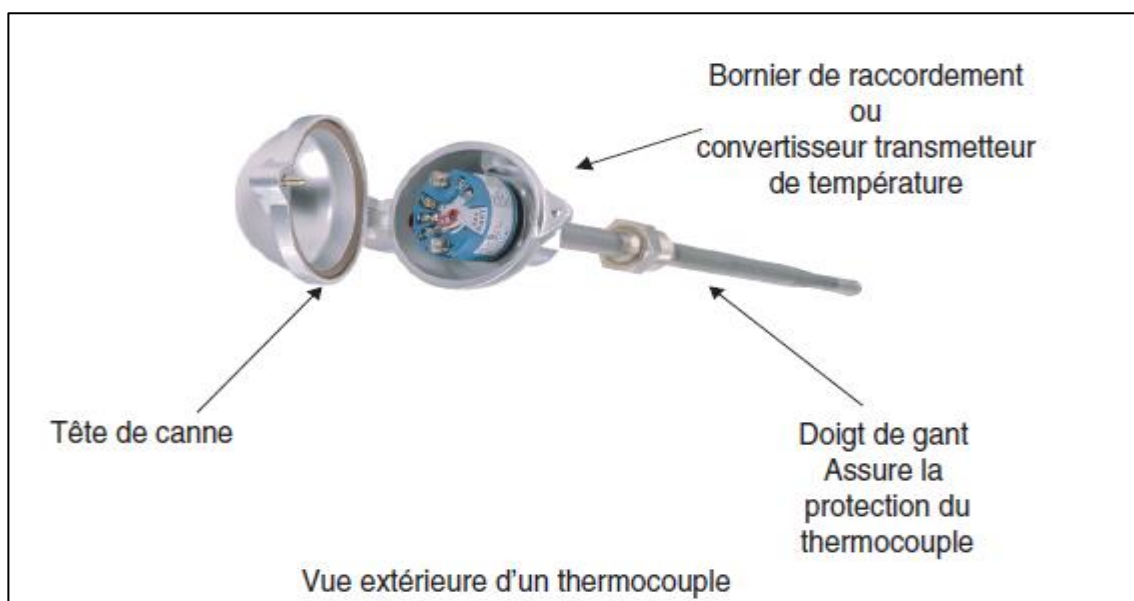


Figure 2-25 : Vue extérieure d'un thermocouple

c- Exercice d'application :

La température en tête d'une colonne à distiller doit être maintenue constante à 138 °C. Cette mesure est réalisée par une sonde thermocouple de type T dont un extrait de table est donné. La température ambiante est de 12 °C. L'étendue de mesure du transmetteur est EM = 145 °C et le réglage du zéro est Z = 5 °C. Le signal de sortie du transmetteur est en courant normalisé 4 – 20 mA.

1. Le transmetteur ne possède pas de circuit de compensation de soudure froide.

1.1. Déterminer les f.é.m. d'étalonnage, c'est-à-dire les deux tensions permettant de régler le signal de sortie à 4 mA puis 20 mA.

- 1.2. Déterminer la relation entre le signal de mesure M (en mA) et la f.é.m. E (en mV) du thermocouple, en supposant linéaire la relation $M = f(E)$.
- 1.3. Déterminer la f.é.m. E (en mV) et la valeur du signal de mesure M (en mA) pour $\theta = 138^\circ\text{C}$.
2. Le transmetteur possède un circuit de compensation de soudure froide. Pour ce nouveau cas, reprendre les questions ci-dessus.
3. Conclure sur le rôle du circuit de compensation de soudure froide.

Extrait de la table de référence (EIT 90) pour thermocouple (type T)
F.é.m. en mV et jonction de référence à 0°C

$^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,312	0,352	0,391
10	0,391	0,431	0,470	0,510	0,549	0,589	0,629	0,669	0,709	0,749	0,790
20	0,790	0,830	0,870	0,911	0,951	0,992	1,033	1,074	1,114	1,155	1,196
130	5,714	5,763	5,812	5,861	5,910	5,959	6,008	6,057	6,107	6,156	6,206
140	6,206	6,255	6,305	6,355	6,404	6,454	6,504	6,554	6,604	6,654	6,704

Chapitre III

ELEMENTS DE REGULATION INDUSTRIELLE

1 Généralités

1.1 Définitions

La **régulation** regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Exemples de grandeur physique : Pression, température, débit, niveau etc...

La **grandeur réglée**, c'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Exemple : une régulation de température.

La **consigne** : C'est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.

La **grandeur réglante** est la grandeur physique qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Elle n'est généralement pas de même nature que la grandeur réglée.

Les **grandeurs perturbatrices** sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont généralement pas de même nature que la grandeur réglée.

L'**organe de réglage** est l'élément qui agit sur la grandeur réglante.

1.2 Principe de fonctionnement

Pour réguler un système physique, 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. On peut représenter une régulation de la manière suivante :

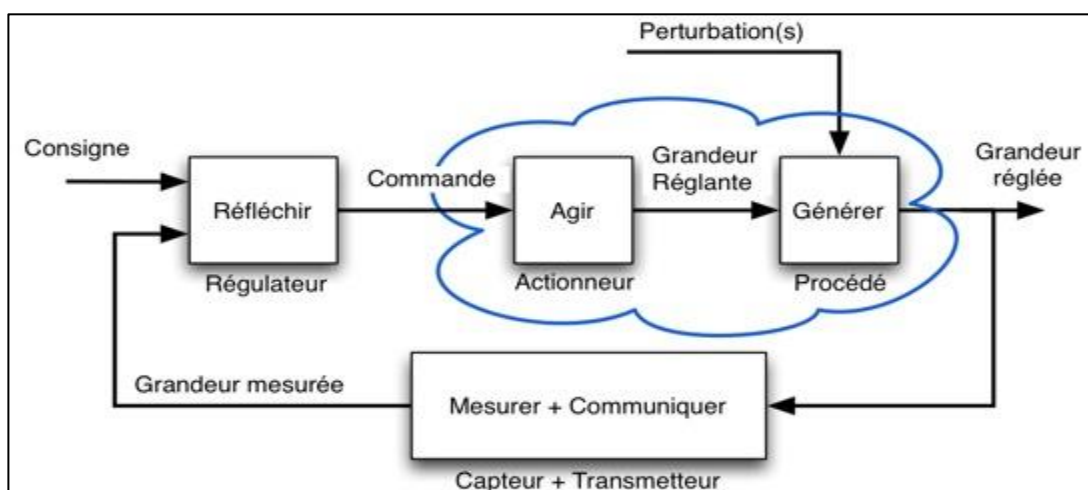


Figure 3-1 : Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation

1.3 Influence de la régulation

Baisse du coût de la transformation

La bonne régulation amène une plus grande précision sur la grandeur réglée, permettant une diminution de la consigne pour un fonctionnement à la limite.

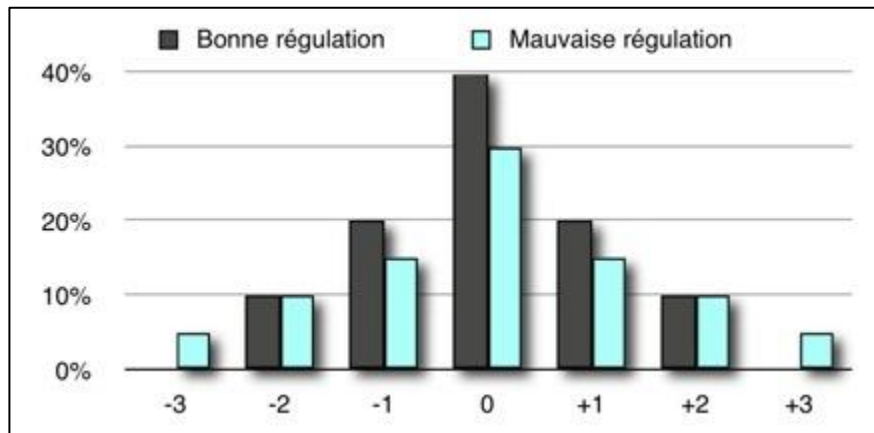


Figure 3-2 : Pourcentage de pièces obtenues en fonction de l'erreur d'épaisseur du revêtement en μm lors d'un dépôt électrolytique

Dans l'exemple figure précédente, la diminution de la disparité dans la valeur de la grandeur réglée, entraîne une diminution de la consigne de $1 \mu\text{m}$ pour l'obtention d'une épaisseur minimale sur toutes les pièces.

Baisse du coût de l'installation et gain de temps

On reconnaît une bonne régulation par sa capacité à accélérer le système sans entraîner de dépassement de la consigne. Dans l'exemple (figure suivante), une bonne régulation entraîne une diminution du temps nécessaire à l'élévation de la température, ainsi que l'économie d'un dispositif de refroidissement.

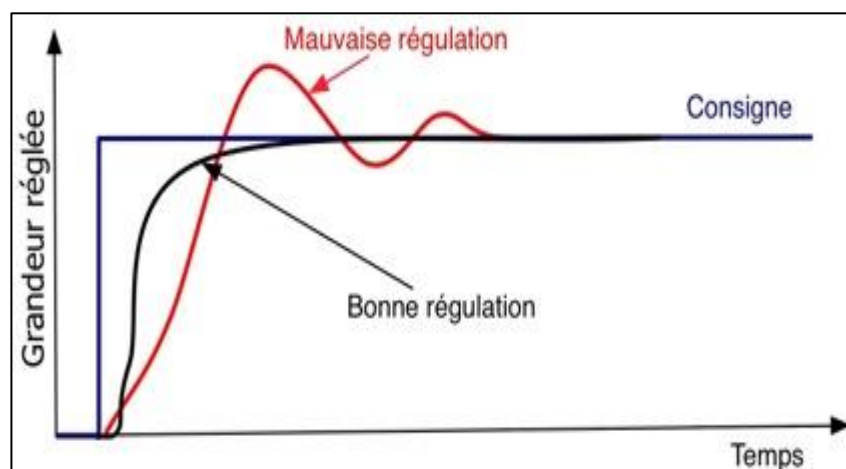


Figure 3-3 : Réponses indicielles

1.4 Régulation ou Asservissement

Dans une **régulation**, on s'attachera à maintenir constante la grandeur réglée d'un système soumis à des perturbations. Dans un **asservissement**, la grandeur réglée devra suivre rapidement les variations de la consigne.

1.5 Les servomécanismes

On appelle servomécanisme, un système asservi dont le rôle consiste à amplifier la puissance et dont la grandeur réglée est une grandeur mécanique tel qu'un effort, un couple, la position ou l'une de ses dérivées par rapport au temps, comme la vitesse et l'accélération.

1.6 Fonctionnement en boucle ouverte (Manuel)

On parle de fonctionnement en boucle ouverte quand c'est l'opérateur qui contrôle l'organe de réglage (figure 3.4). Ce n'est pas une régulation.

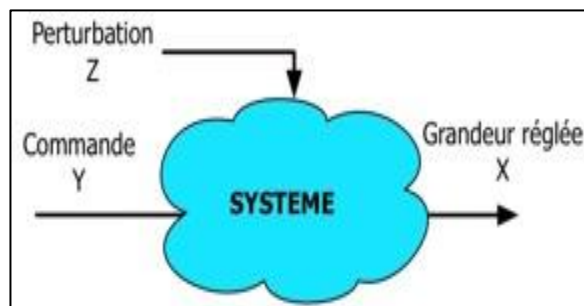


Figure 3-4 : Boucle ouverte

1.7 Fonctionnement en boucle fermée (Automatique)

C'est le fonctionnement normal d'une régulation (figure 3.5). Le régulateur compare la mesure de la grandeur réglée et la consigne et agit en conséquence pour s'en rapprocher.

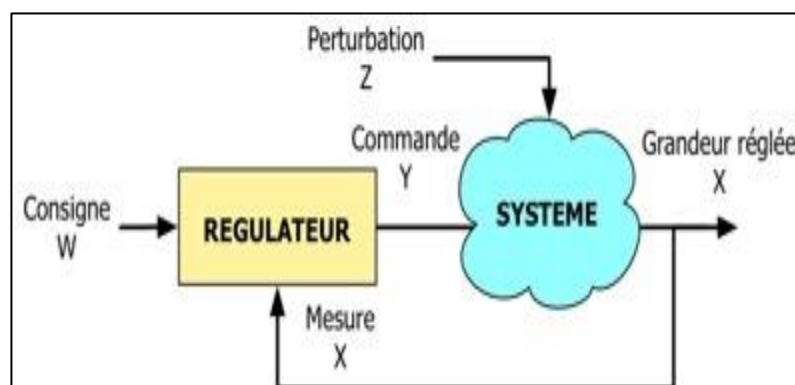
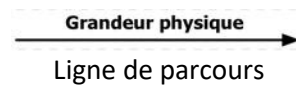


Figure 3-5 : Boucle fermée

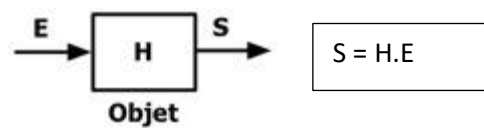
2.2 Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel tente de représenter les relations entre les différentes grandeurs physiques des boucles de régulation. Il sera composé uniquement des éléments suivants :

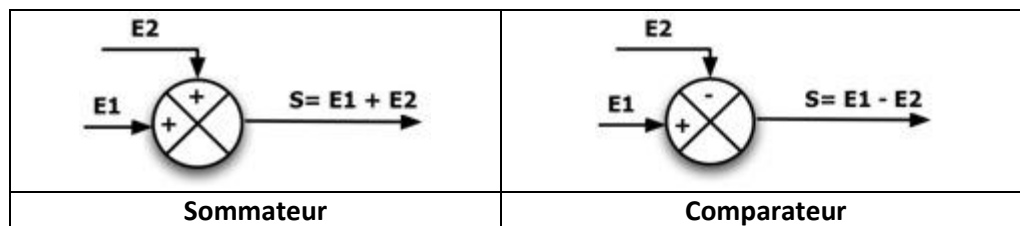
- ✓ **Ligne de parcours d'une grandeur physique** : Cette ligne représente le parcours d'une même grandeur physique de la boucle de régulation.



- ✓ **Bloc gain**: Le bloc représente la relation entre deux grandeurs physiques, relation réalisé par un élément de la boucle de régulation :



- ✓ **Sommateur et soustracteur**: Ce bloc représente l'addition ou la soustraction de grandeurs physique de même nature.



La représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation est donnée par la figure suivante :

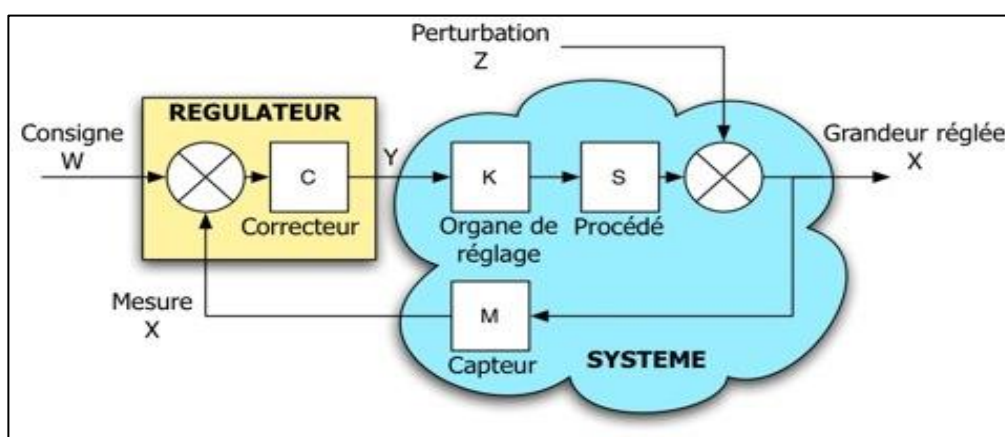


Figure 3-6 : Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation

3 Causes de modification de l'équilibre 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.

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. 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.

3.1 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.

a) Les délais dans le procédé

Les délais dans le procédé 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.

La capacité est représentée par tout système qui emmagasine de l'énergie. Ainsi, la masse d'eau contenue dans un 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 un 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.

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).

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 vitesse du fluide et de la distance à parcourir.

b) Les délais dans la commande

Les délais dans la commande 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. 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 une variation de la grandeur 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.

3.2 La variation de la consigne

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 un échangeur de chaleur par exemple, la variation de consigne s'établit 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.

3.3 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.

3.4 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 perturbations 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.

4 Réponse des systèmes 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.

4.1 Réponse 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 3-8 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 $N^{\text{ième}}$ ordre). Ainsi, la réponse d'un système en boucle ouverte, en fonction du nombre de capacités, est présentée à la Figure 3-6.

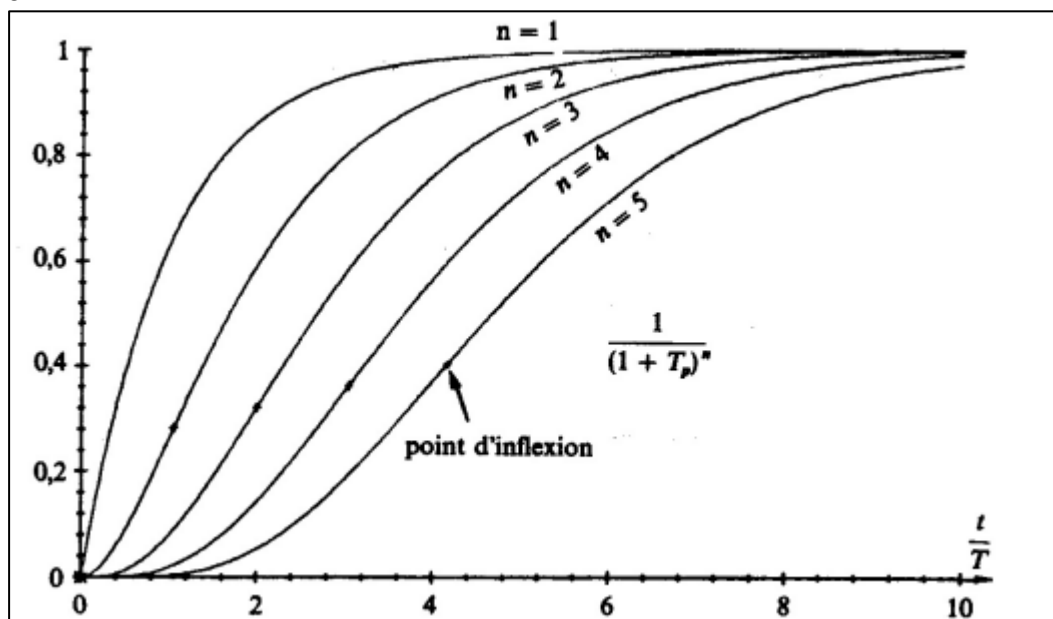


Figure 3-6 : Réponse du procédé en boucle ouverte

4.2 Réponse 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 3-7) 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.

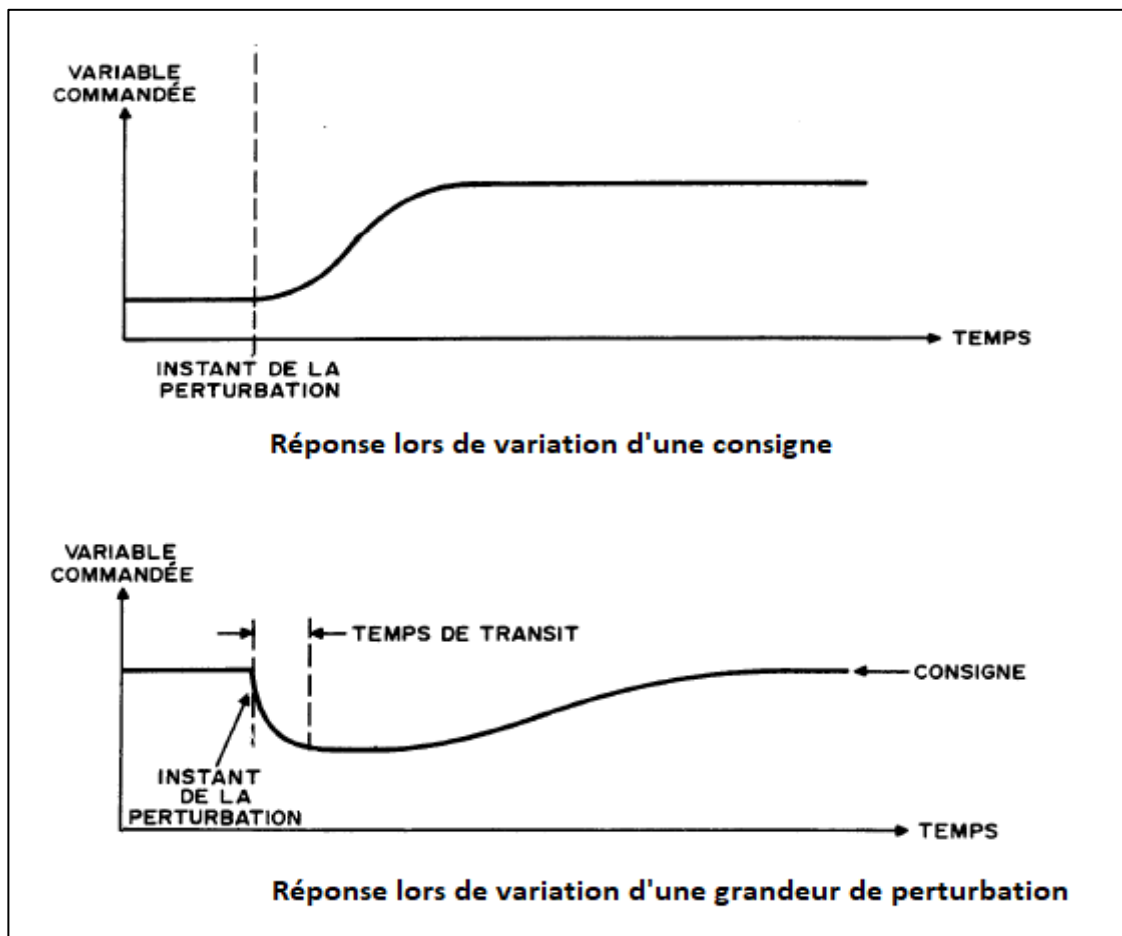


Figure 3-7 : Réponse sur amortie du procédé en boucle fermée

La réponse critique (Figure 3-8) 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. Il s'agit de la correction la plus rapide que l'on puisse obtenir sans qu'il y ait dépassement de la valeur-cible.

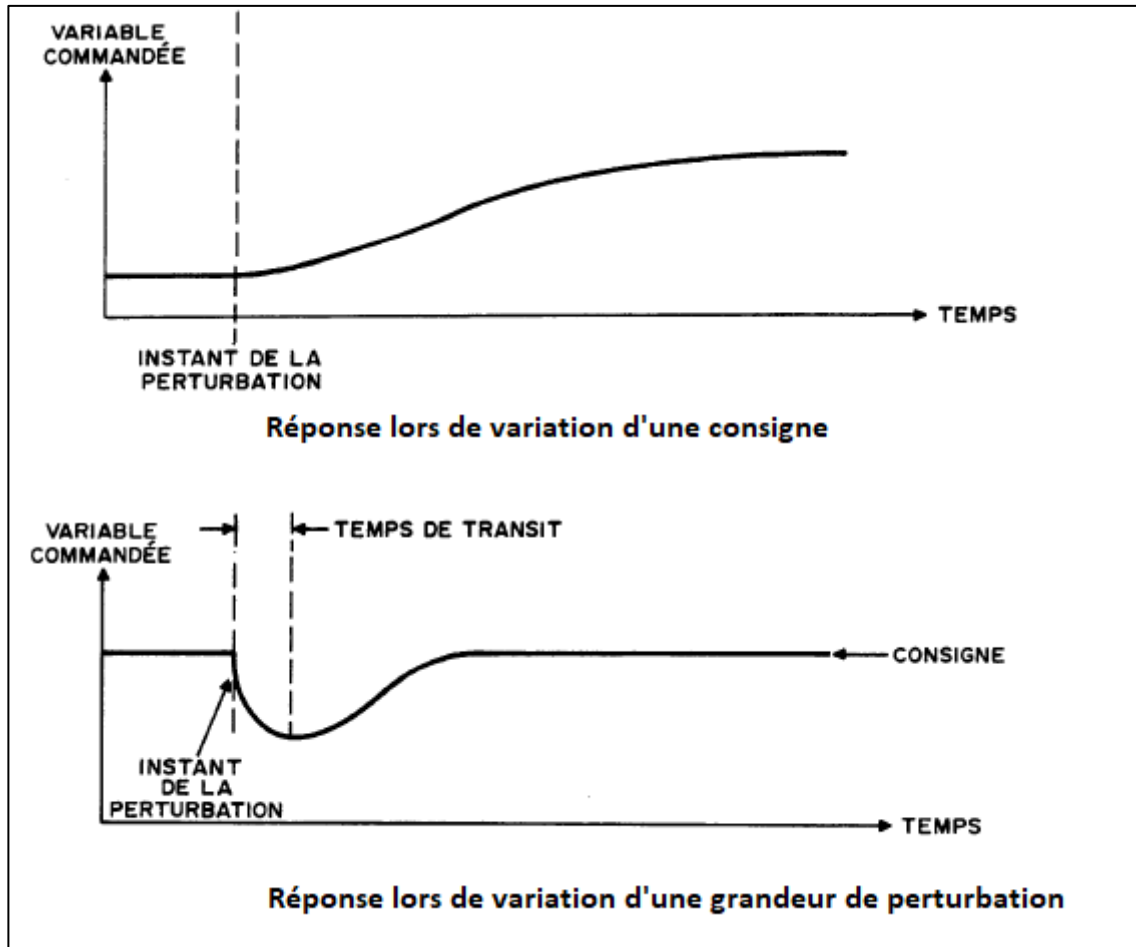


Figure 3-8 : Réponse critique du procédé en boucle fermée

La réponse sous-amortie (Figure 3-9) 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.

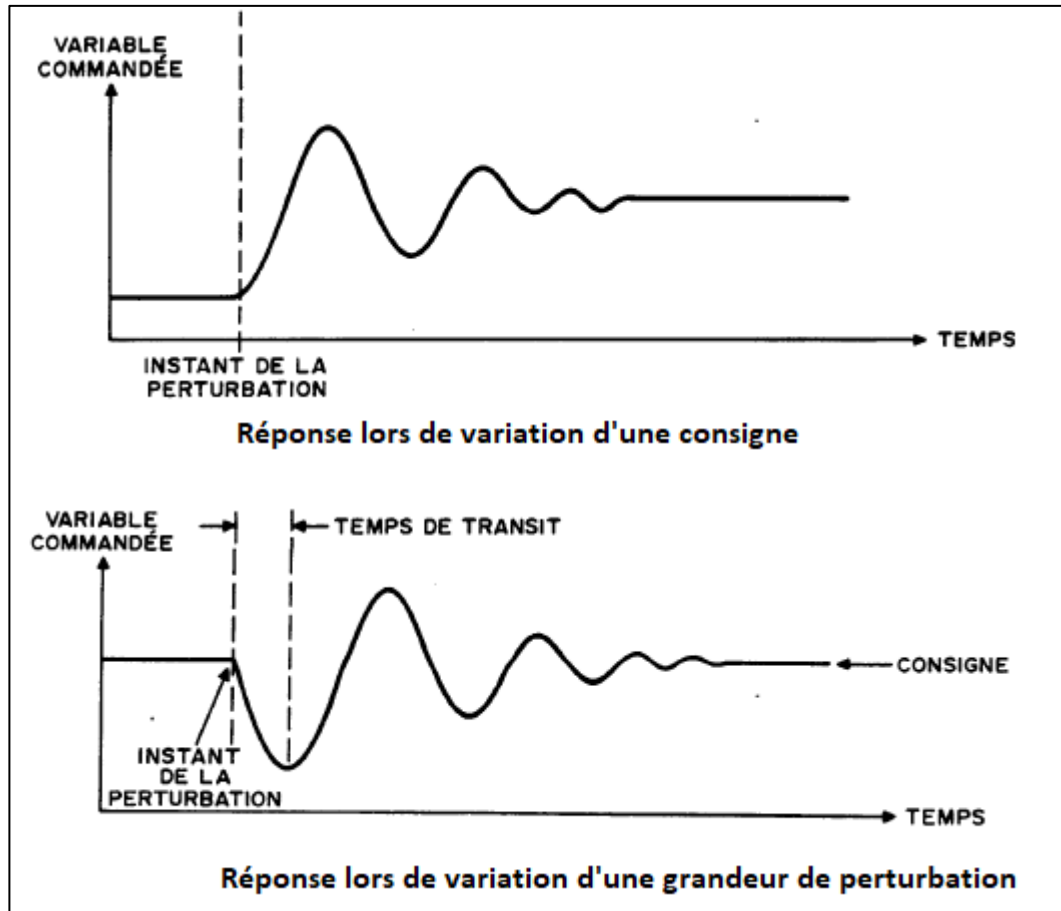


Figure 3-9 : Réponse sur amortie du procédé en boucle fermée

5 Objectifs de la régulation d'un 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 3-10) 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.

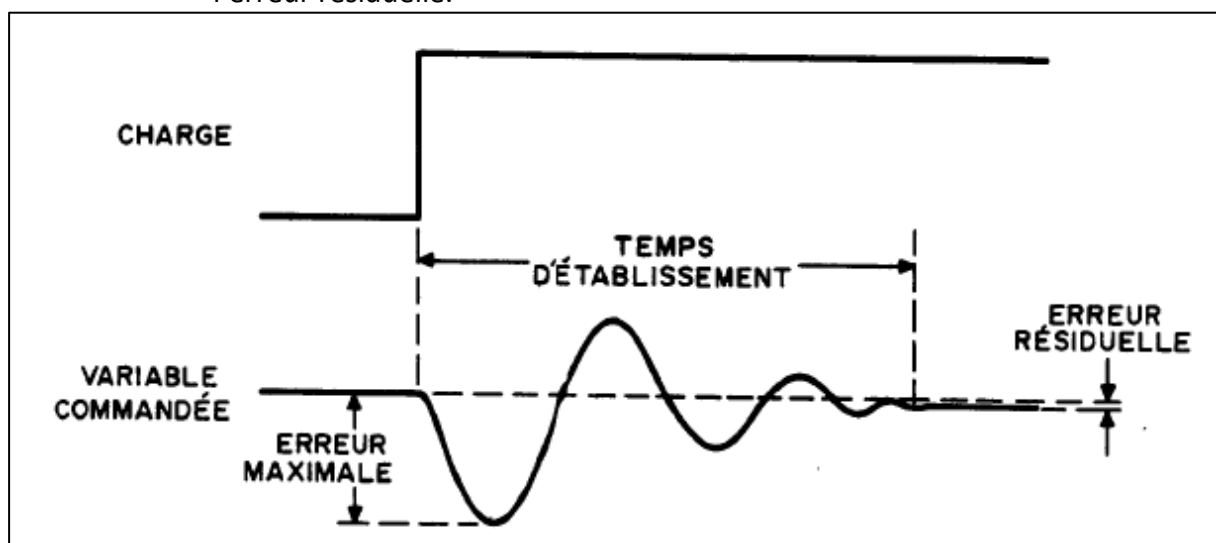


Figure 3-10 : Objectifs de la régulation d'un procédé

5.1 Erreur maximale

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 3-11).

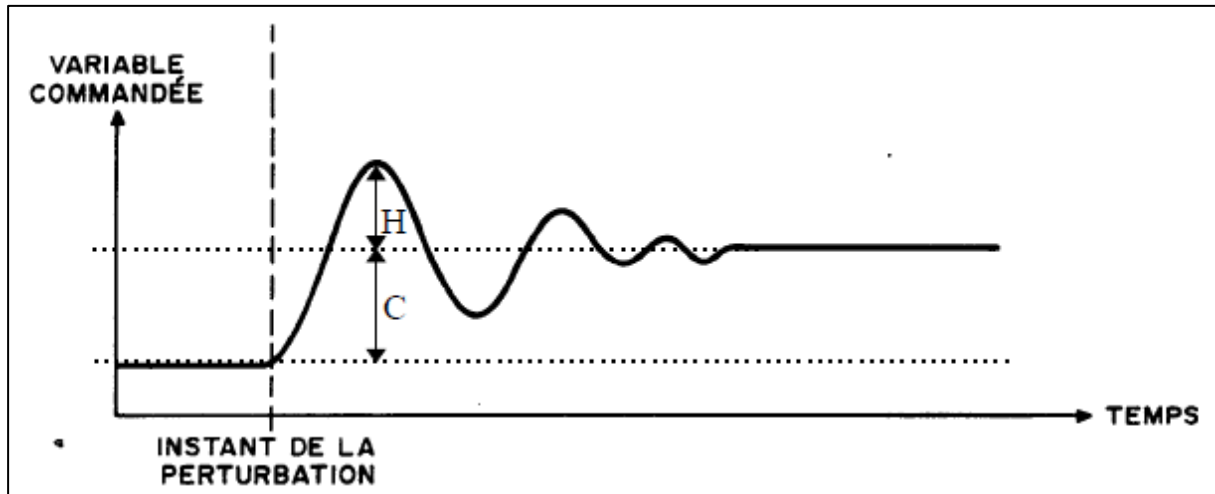


Figure 3-11 : Taux de dépassement

$$\text{Taux de dépassement} = \frac{H}{C} \cdot 100$$

5.2 Temps de rétablissement

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 $\pm 5\%$ de sa valeur finale. Cette plage de $\pm 5\%$ implique l'utilisation d'une échelle normalisée concernant la variation totale de la mesure.

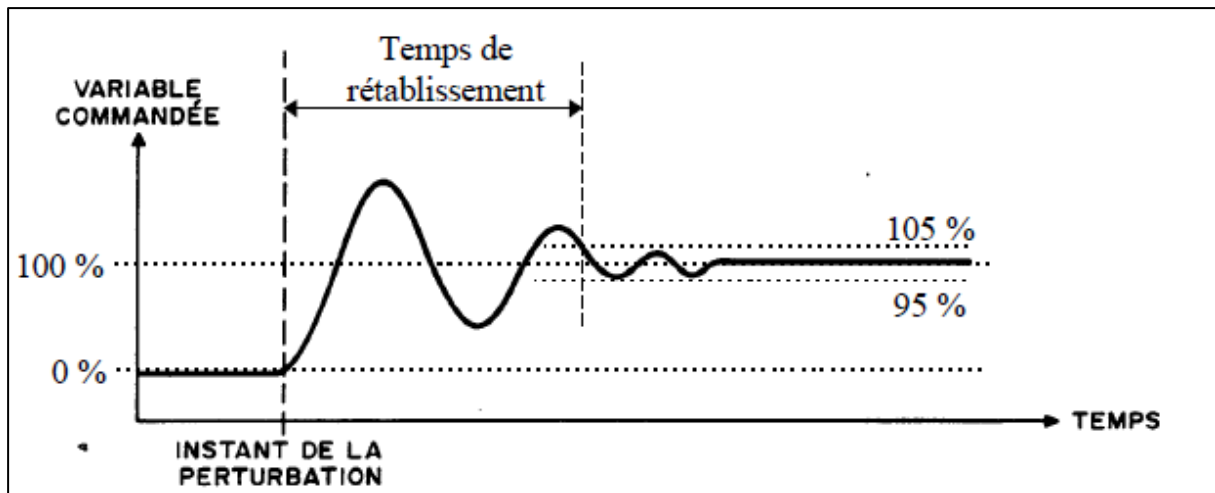


Figure 3-12 : Temps de rétablissement

5.3 Erreur résiduelle

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.

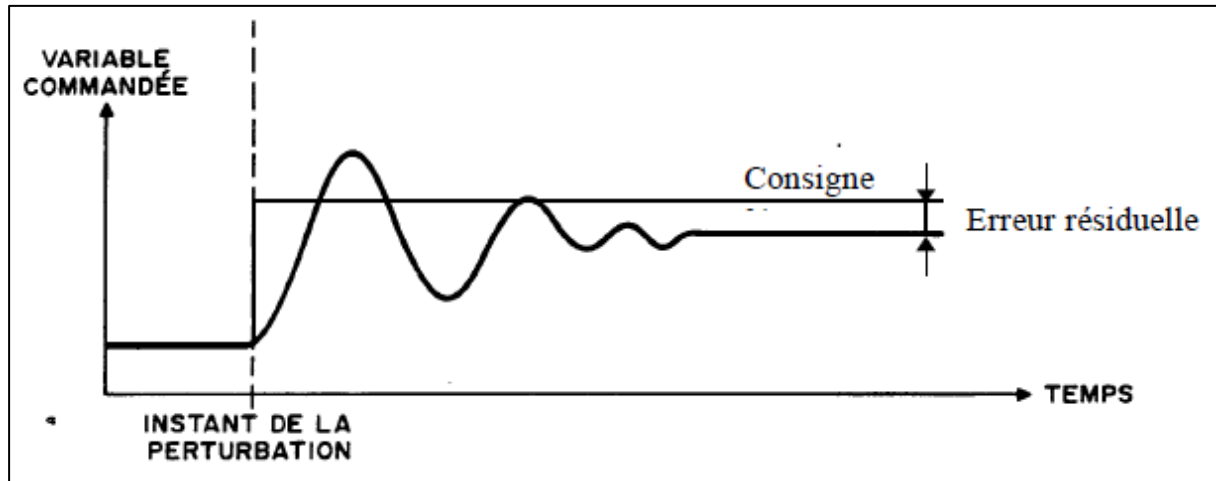


Figure 3-13 : Erreur résiduelle

6 Modélisation d'un procédé

6.1 Les types de procédés

Il existe principalement trois types de procédés:

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

Un procédé autorégulateur (naturellement stable) 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 (naturellement instable) 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.

La Figure 3-14 présente les courbes de réponse de chacun des types de procédé.

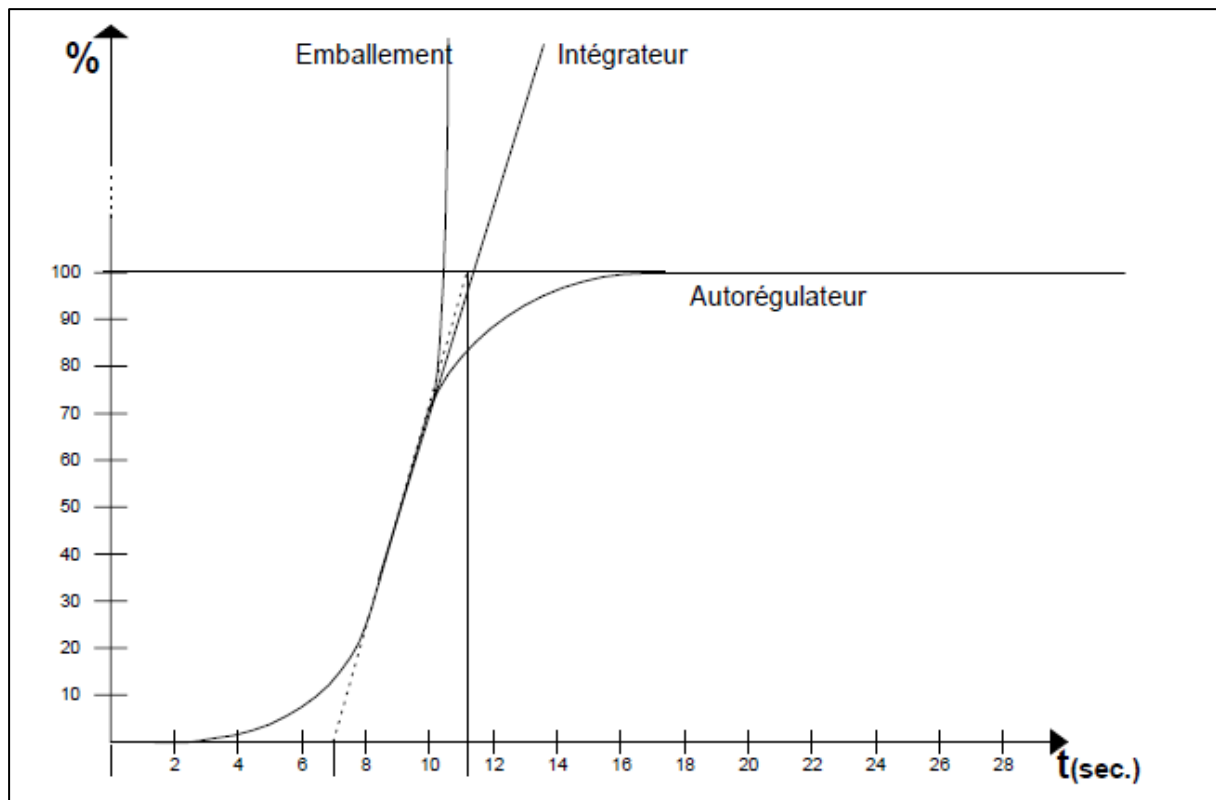


Figure 3-14 : Types de procédés

6.2 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.

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

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

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

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

La constante de temps (ou θ) 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 élevée puisque le rythme n'est pas maintenu; il est plutôt réduit graduellement.

La constante de temps 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 continues sont présentes, le procédé débute sans cesse un nouveau régime transitoire dont la pente est proportionnelle au tau.

Le temps de retard (ou τ) 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 retard est la conséquence directe du retard liée 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 Méthode d'identification d'un procédé en boucle ouverte

Mode opératoire :

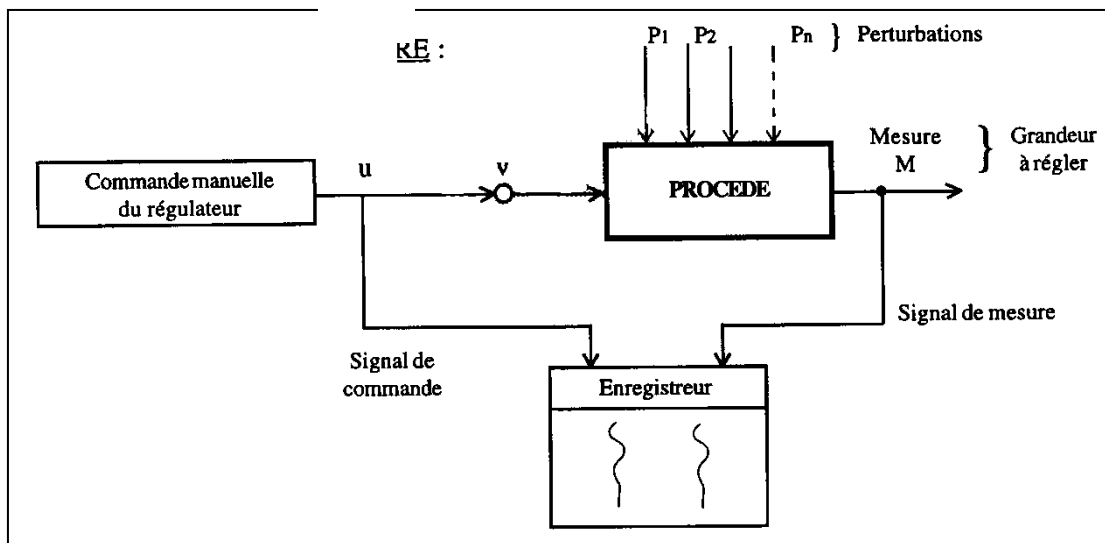


Figure 3-15 : schéma de principe du relevé de la caractéristique d'un procédé

- ◆ Stabiliser la mesure $M(t)$ au point de fonctionnement choisi ou aux conditions moyennes. Le système pouvant présenter des non-linéarités (voir courbes d'essais statiques), il est important d'analyser au point de fonctionnement futur.
- ◆ Régulateur en manuel $\Rightarrow$ boucle ouverte.
- ◆ Faire un échelon ΔU à l'aide de la commande manuelle sur le signal de vanne. Cet échelon doit être suffisamment grand afin d'obtenir une réponse sur l'enregistrement de la mesure exploitable et suffisamment faible afin de ne pas dépasser les limites de linéarité du procédé.
- ◆ Exploitation graphique de l'enregistrement du signal de mesure $M(t)$.

Procédés naturellement stable

- Procédé à dominante du premier ordre avec retard :

$$HR(p) = Gs. \frac{e^{-\tau p}}{1 + \theta p}$$

La fonction de transfert :

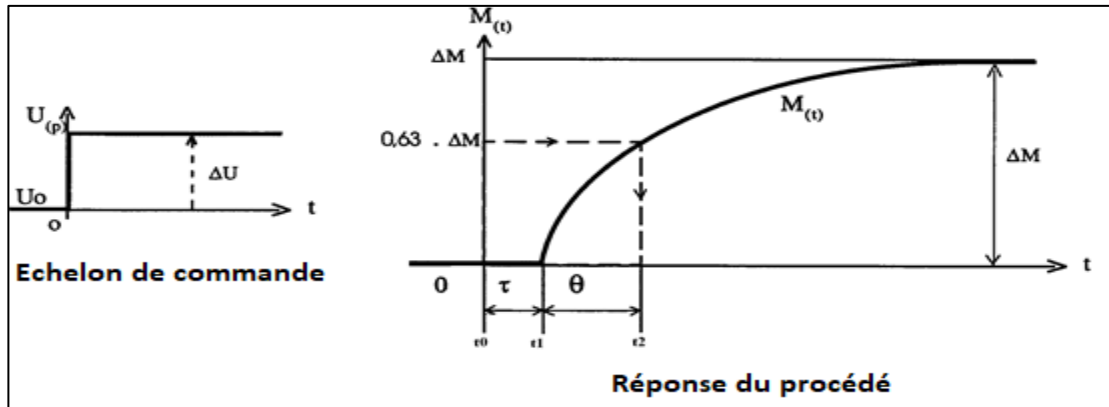


Figure 3-16 : Allure de la réponse d'un système de premier ordre

A partir des constructions fournies, on calcule :

- Le gain statique : $G_s = \Delta M / \Delta U$;
- Le retard : $\tau = t_1 - t_0$;
- La constante de temps : $\theta = t_2 - t_1$.
- **Procédé du nième ordre avec retard :**

La figure suivante montre la construction graphique à réaliser, cette construction est basée sur la méthode mise au point par **V.BROIDA** : recherche des temps **t1** et **t2** correspondants à **28%** et **40%** de la variation ΔM .

$$HR(p) = \frac{G_s \cdot e^{-\varphi}}{(1 + \theta_1 \cdot p)(1 + \theta_2 \cdot p) \dots (1 + \theta_n \cdot p)} = \frac{G_s \cdot e^{-\varphi}}{(1 + \theta \cdot p)}$$

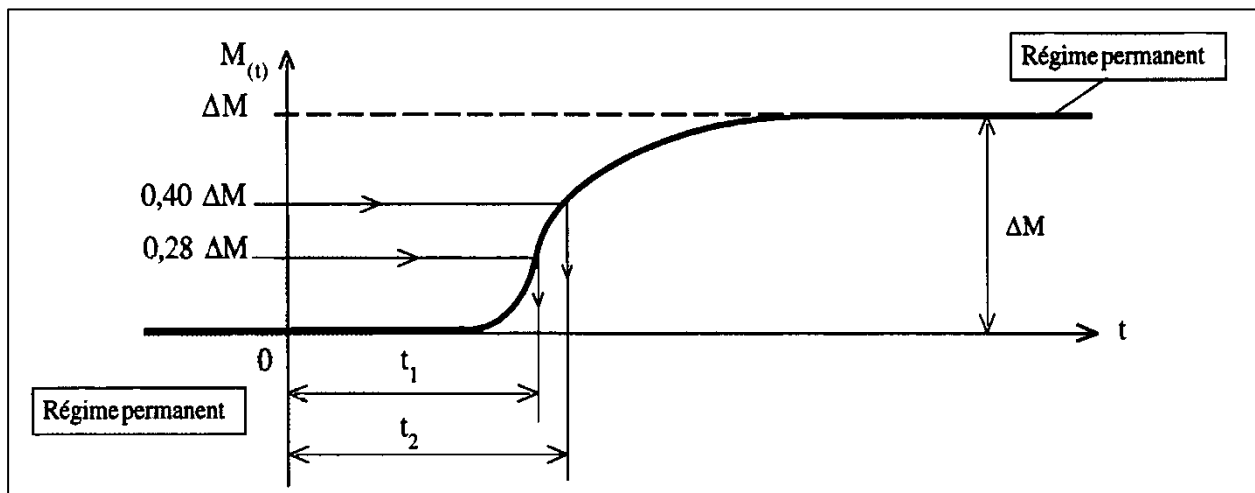


Figure 3-17 : Allure de la réponse d'un système nième ordre

Le problème d'identification consistera donc à déterminer les paramètres suivants

θ : **Constante du temps** (sec.) , τ : **Temps de retard pur** (sec.)

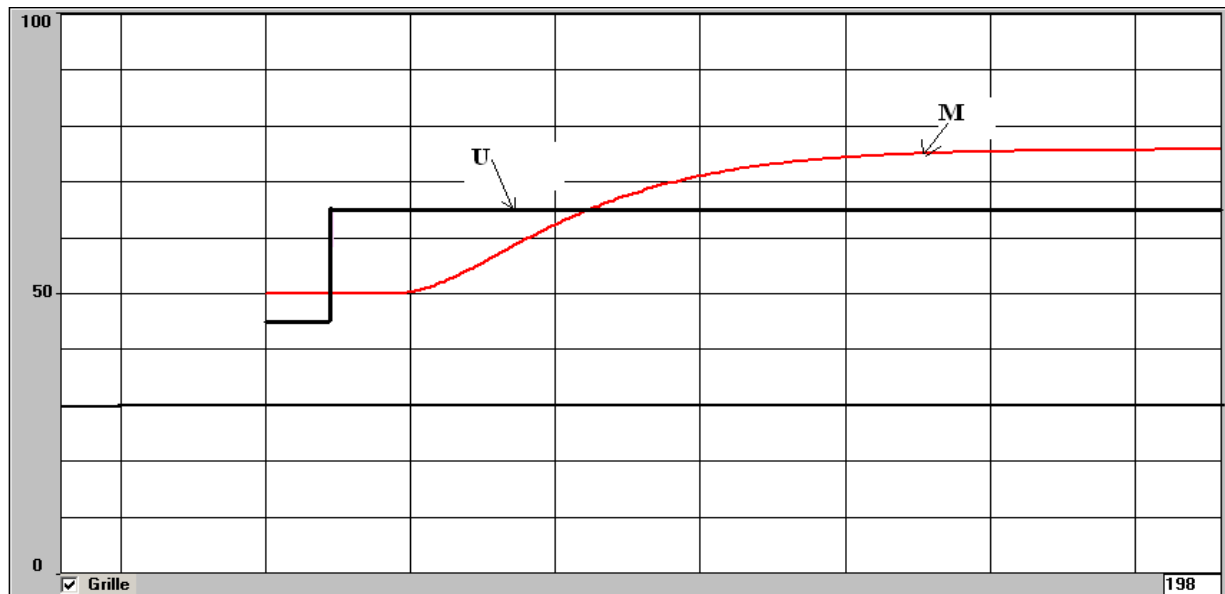
Afin de déterminer des valeurs de ces paramètres, Broïda fait correspondre la réponse indicielle à identifier et la fonction de transfert du 1^{er} ordre affectée d'un retard en deux points t_1 et t_2 d'ordonnées correspondant à 28% et 40% de la valeur finale de la sortie du système.

Calcul des paramètres du modèle :

- Gain statique : $G_s = \Delta M / \Delta U$
- Constante du temps : $\theta = 5,5 (t_2 - t_1)$
- Temps de retard : $\tau = 2,8 t_1 - 1,8 t_2$

Exemple :

La réponse en boucle ouverte d'un système stable est donnée par la figure suivante :



En régime permanent :

$\Delta U = 20\%$; $\Delta M = 26\%$ d'où $G_s = 26/20 = 1.3$

A 28% de ΔM (7.28 %) correspond $t_1 = 50$ s

A 40% de ΔM (10.4 %) correspond $t_2 = 56$ s

Les calculs de θ et τ donnent alors :

$$\theta = 5,5.(t_2 - t_1) = 5.5.6 = 33 \text{ s}$$

$$\tau = 2,8.t_1 - 1,8.t_2 = 39,2 \text{ s}$$

La fonction de transfert du procédé est :

$$HR(p) = G_s. \frac{e^{-\tau p}}{1 + \theta p} = 1,3. \frac{e^{-39,2p}}{1 + 33p}$$

Procédés naturellement instables:

Quelle que soit la méthode employée, les paramètres du modèle du procédé à identifier sont ceux d'un intégrateur pur avec retard : k et τ .

La fonction de transfert de ce modèle est la suivante :

$$HR(p) = \frac{k.e^{-\tau p}}{p.(1 + \theta_1.p)(1 + \theta_2.p).....(1 + \theta_n.p)} = \frac{k.e^{-\tau p}}{p}$$

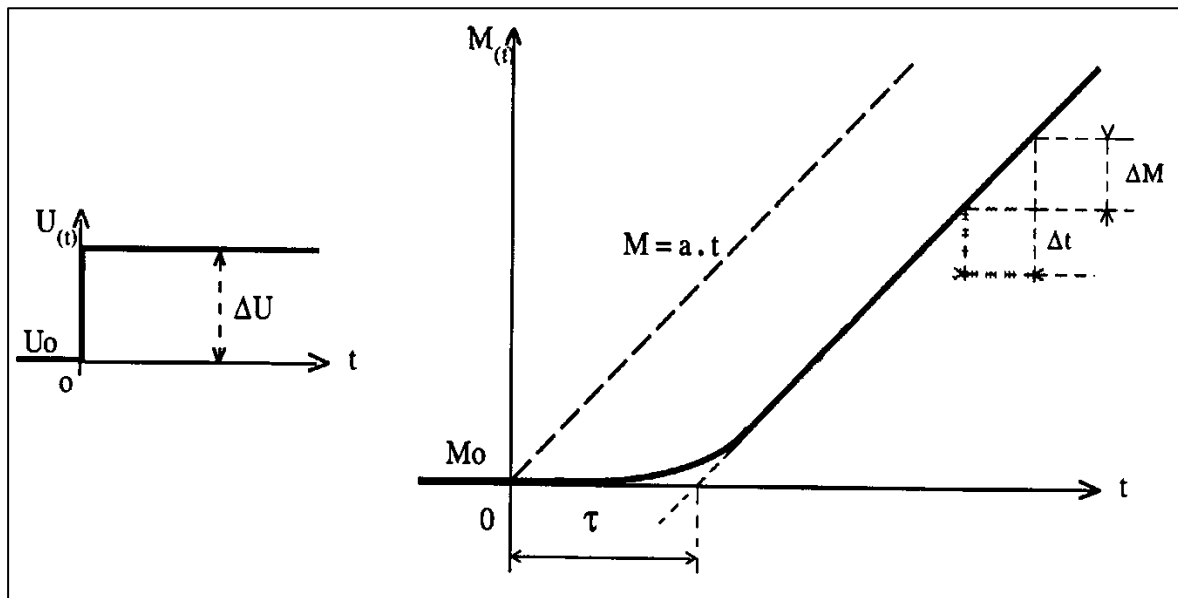


Figure 3-18 : Allure de la réponse d'un système naturellement instable

- Le temps mort du modèle est déterminé graphiquement

Coefficient d'intégration du procédé : $K = \frac{\Delta M (\%)}{\Delta U (\%).\Delta t}$

Remarque :

- Cette méthode d'identification en boucle ouverte doit être utilisée avec précautions, compte-tenu du caractère instable du procédé.
- Pour restabiliser le procédé, passer le régulateur en automatique et en proportionnelle seule, avec un gain assurant la stabilité.

7 Les régulateurs

7.1 Structure de principe d'un régulateur

La figure suivante représente la structure interne d'un régulateur.

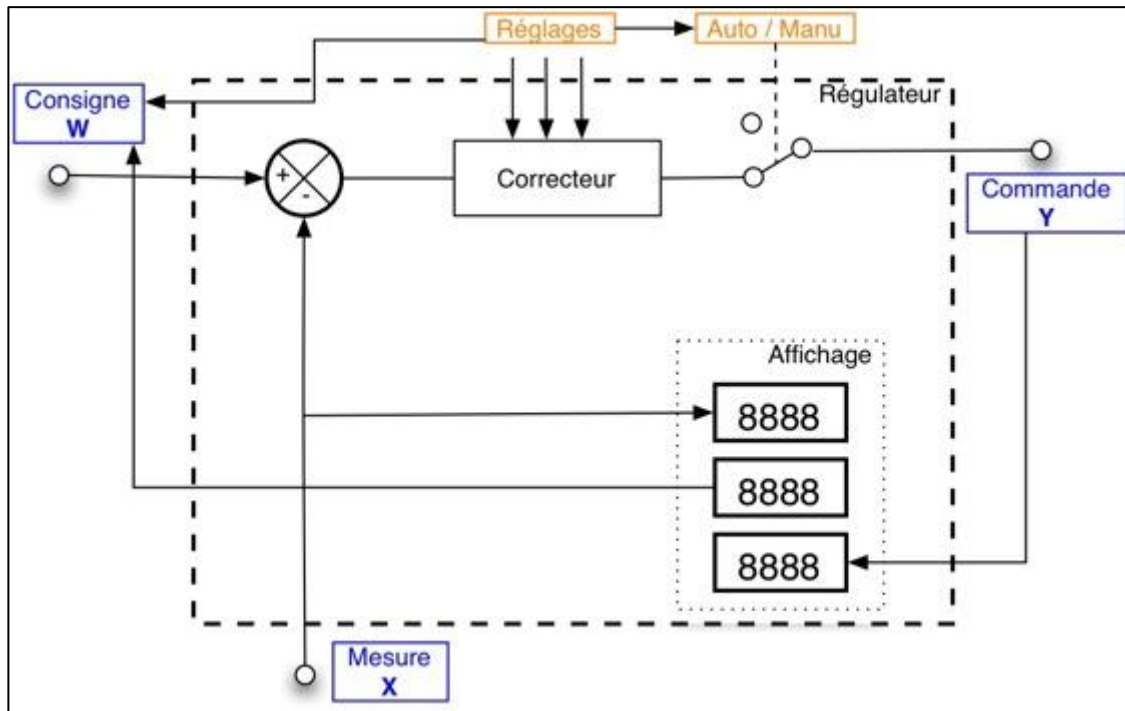


Figure 3-19 : Structure d'un régulateur

- Le signal de mesure X est l'image de la grandeur réglée, provenant d'un capteur et transmetteur et transmise sous forme d'un signal électrique ou pneumatique ;
- La consigne W peut-être interne (fournie en local par l'opérateur) ou externe ;
- L'affichage de la commande Y se fait en et généralement en unités physiques pour la consigne et la mesure.
- Si un régulateur est en automatique, sa sortie dépend de la mesure et de la consigne. Ce n'est pas le cas s'il est en manuel.

7.2 Choix du 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, le procédé est dit inverse.

Choix du sens d'action du régulateur

Si le procédé est direct : Il faut mettre le sens d'action du régulateur sur inverse (fig. 3.20).

Si le procédé est inverse : Il faut mettre le sens d'action du régulateur sur directe (fig.3.21).

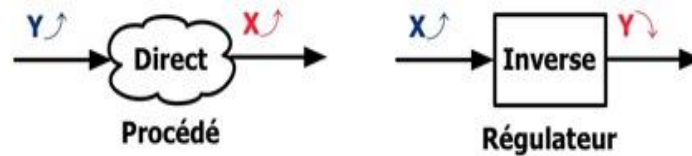


Figure 3-20 : Système à action directe

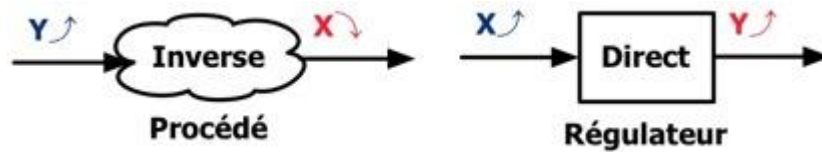


Figure 3-21 : Système à action inverse

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 (fig 3.22). Si X augmente, le couple régulateur + procédé doit tendre à le faire diminuer.

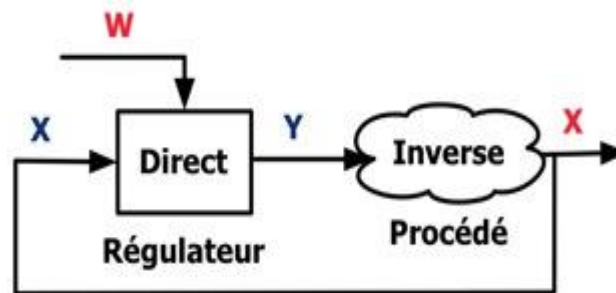


Figure 3-22 : Sens d'action dans une boucle fermée

7.3 Raccordement électrique

Le transmetteur

On peut distinguer trois types de transmetteur :

- Les transmetteurs 4 fils (actifs) qui disposent d'une alimentation et qui fournissent le courant I . Leur schéma de câblage est identique à celui des régulateurs (fig.3.23).
- Les transmetteurs 3 fils (actifs) sont des transmetteurs 4 fils, avec les entrées moins reliées (fig.3.24).
- Les transmetteurs 2 fils (passif) qui ne disposent pas d'une alimentation et qui contrôle le courant I fournie par une alimentation externe (fig.3.25).



Figure 3-23 : Transmetteur 4 fils



Figure 3-24 : Transmetteur 3 fils

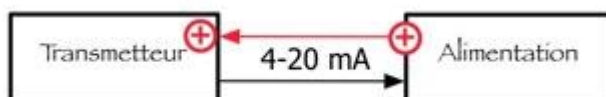


Figure 3-25 : Transmetteur 2 fils

Schéma de principe d'une boucle de courant

Une boucle 4-20 mA est composée (fig. 3.26) :

- D'un générateur, qui fournit le courant électrique ;
- D'un ou plusieurs récepteurs, qui mesure le courant électrique qui les traverse.



Figure 3-26 : Boucle de courant

Remarque :

- Le courant sort par la borne + du générateur ;
- Le courant entre par la borne + des récepteurs.

Générateur ou récepteur ?

Récepteur	Transmetteur 2 fils	Entrée mesure du régulateur	Enregistreur	Organe de réglage
Générateur	Transmetteur 4 fils	Sortie commande du régulateur		Alimentation

Mise en œuvre pratique

- Chercher le nombre de boucle de courant. (Il y a deux fois plus de boucle de courant que de boucle de régulation)
- Pour chaque boucle, faire la liste de l'instrumentation mise en œuvre.
- Dans chaque liste, déterminer l'**unique** élément générateur.
- Relier le (+) du générateur au (+) d'un récepteur avec un fil {rouge}.
- Relier le (-) du générateur au (-) d'un récepteur avec un fil noir.
- Si possible, relier les (+) disponibles des récepteurs, au (-) disponibles d'autres récepteurs avec un fil {bleu}.
- Vérification : Dans chaque boucle de courant, il y a autant de fils de liaison que d'éléments.

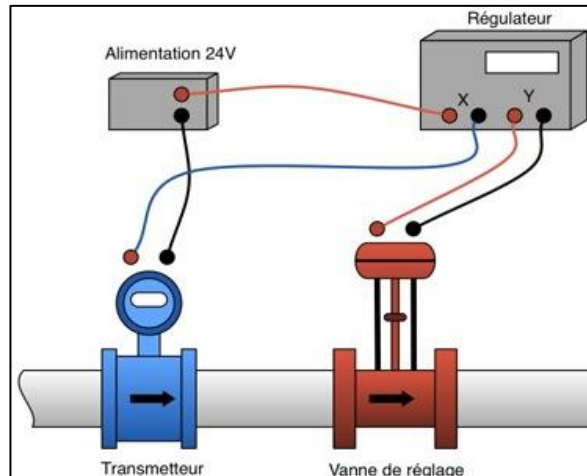


Figure 3-27 : Exemple de câblage - Boucle de régulation de débit

Précaution d'emploi

La somme des résistances d'entrées des récepteurs est limitée. Il faut donc faire attention aux boucles trop longues (>1000 m) ou résistances de mesure que l'on peut placer. D'une manière générale, $U_{lim} (V) \geq R \cdot I_{max}$.

7.4 Action continue et action discontinue

On peut séparer le fonctionnement d'un régulateur en deux types d'actions. Une action discontinue, dans laquelle la sortie Y du régulateur ne prend que deux valeurs 0 et 100 et une action continue avec une sortie du régulateur qui peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 100. On appelle aussi le fonctionnement discontinue fonctionnement Tout Ou Rien.

8 Régulation Tout Ou Rien - TOR

8.1 Présentation

Le fonctionnement se caractérise par deux états possibles pour la commande. Celui qui correspond à la commande maximale (100 et celui qui correspond à la commande minimale (0. 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, un régulateur à action inverse a la caractéristique, figure suivante.

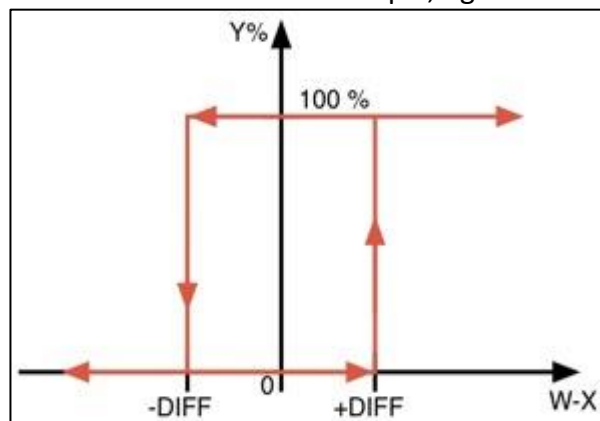


Figure 3-28 : Caractéristique d'un régulateur tout ou rien

8.2 Fonctionnement

La grandeur réglée oscille autour du point de fonctionnement (fig. 3.29 et fig 3.30). 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 $|E|$ peut dépasser le seuil $DIFF$.

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

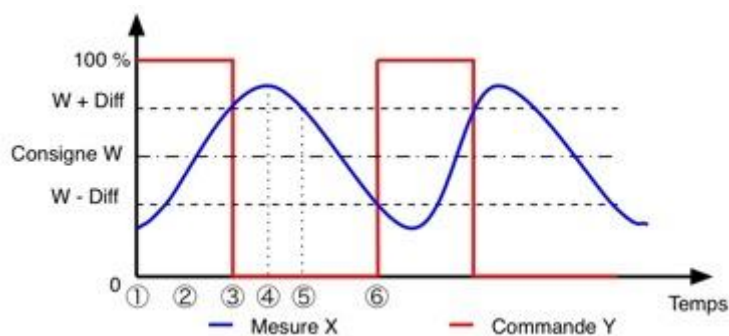


Figure 3-29 : Evolution des grandeurs dans le temps

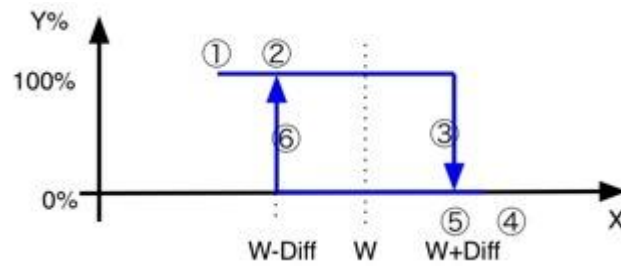


Figure 3-30 : Evolution des grandeurs dans le plan XY

8.3 Influence du paramètre seuil

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.

9 Régulation Proportionnelle Intégrale Dérivée - PID

9.1 Action proportionnelle

Rappel

Pleine échelle : C'est l'ensemble des valeurs que peut prendre l'entrée mesure du régulateur; X de 0 à 100 Elle est généralement réglée au niveau du régulateur par deux paramètres, $X_{\min}$ et $X_{\max}$.

Présentation

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 Dans la partie proportionnelle, appelée bande proportionnelle, on a :

$$Y = 100. \frac{W - X}{X_p}$$

La consigne W, la mesure X et la bande proportionnelle X_p , s'expriment en fonction de la pleine échelle. Ainsi, un régulateur à action inverse a la caractéristique, figure 3.31.

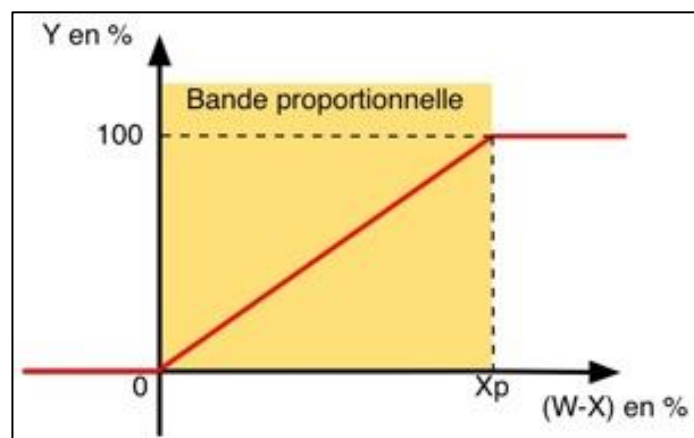


Figure 3-31 : Caractéristique d'un régulateur proportionnel

Fonctionnement

Lors d'une variation en échelon de la consigne, le système à une réponse ressemblant à la celle représentée sur la figure 3.32.

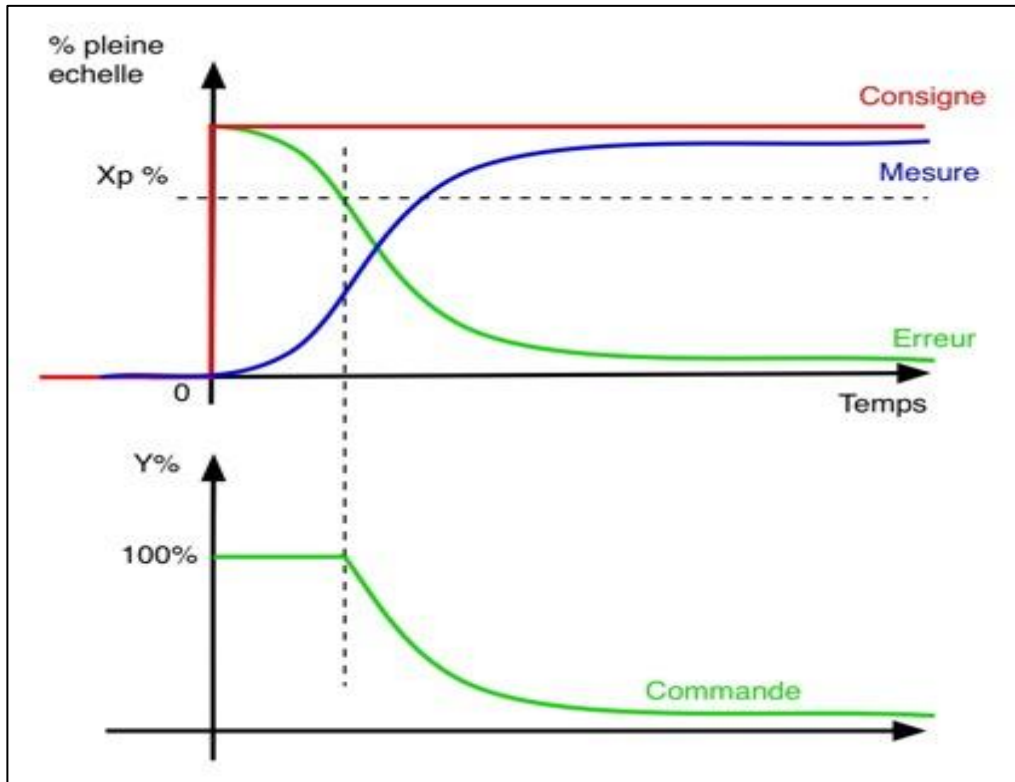


Figure 3-32 : Réponse indicielle d'une régulation proportionnelle

Détermination du point de fonctionnement La régulation d'un procédé peut être représentée par la figure 3.33. Le régulateur et le procédé définissent chacun d'eux une caractéristique statique (figure 3.34). Dans le cas d'un fonctionnement stable, le point de fonctionnement en régime permanent appartient aux deux courbes. Le point de fonctionnement correspond donc à l'intersection de ces deux courbes. On peut déduire de cette construction, la valeur de l'erreur statique ($W-X_s$), ainsi que la valeur de la commande du régulateur en régime permanent Y_s .

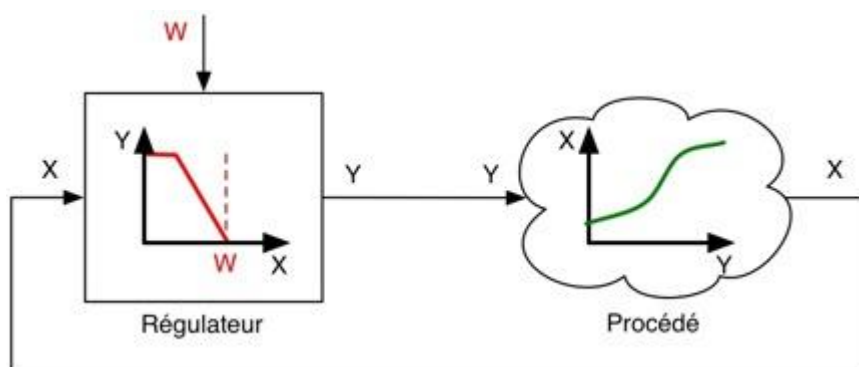


Figure 3-33 : Régulation proportionnelle en fonctionnement

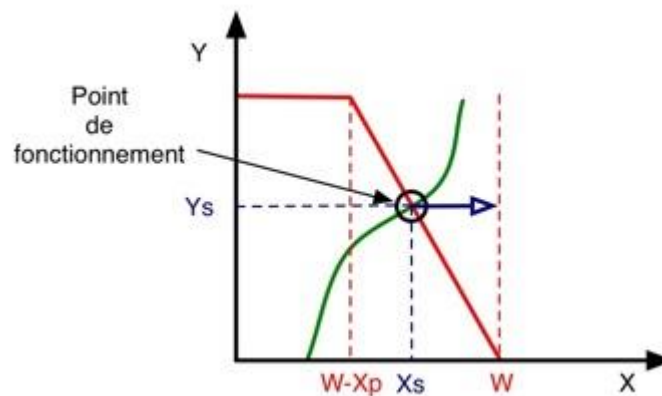


Figure 3-34 : Détermination du point de fonctionnement

Influence de la bande proportionnelle

Comportement statique (fonctionnement en régime permanent) : On s'aperçoit graphiquement que plus la bande proportionnelle est petite, plus l'erreur en régime permanent est petite. Sur la figure 3.35, $X_{p1} < X_{p2}$.

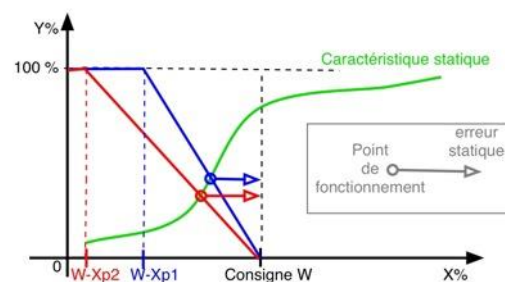


Figure 3-35 : Influence de la bande proportionnelle sur l'erreur statique

Comportement dynamique (fonctionnement en régime transitoire) : Plus la bande proportionnelle est petite, plus le temps de réponse du système est court. En effet, pour la même erreur, la commande fournie est plus importante qu'avec une bande proportionnelle plus importante (figure 3.36). Si la bande proportionnelle se rapproche de 0, le système devient instable. En effet, un fonctionnement en TOR correspond à une bande proportionnelle nulle.

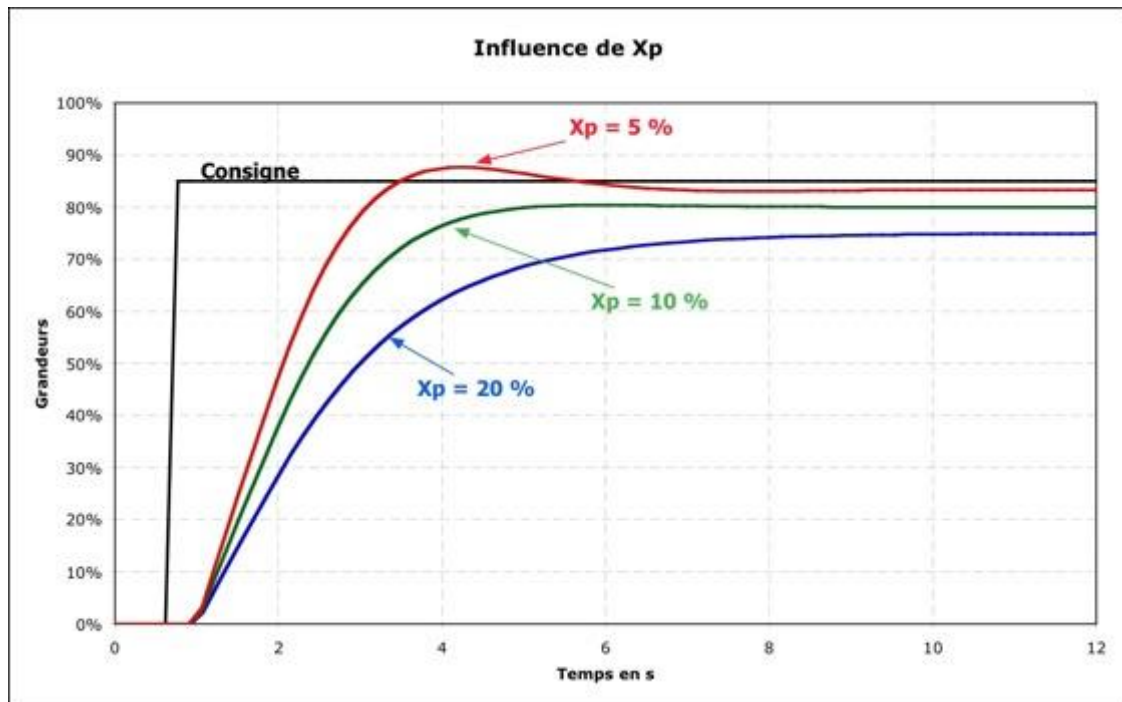


Figure 3-36 : Influence de la bande proportionnelle sur le temps de réponse

Décalage de bande - Talon - Intégrale manuelle

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

$$Y = 100. \frac{W - X}{X_p} + Y_0$$

Avec Y_0 , le décalage de bande à régler sur le régulateur. Ainsi, pour un régulateur à action inverse on a le caractéristique figure 3.37.

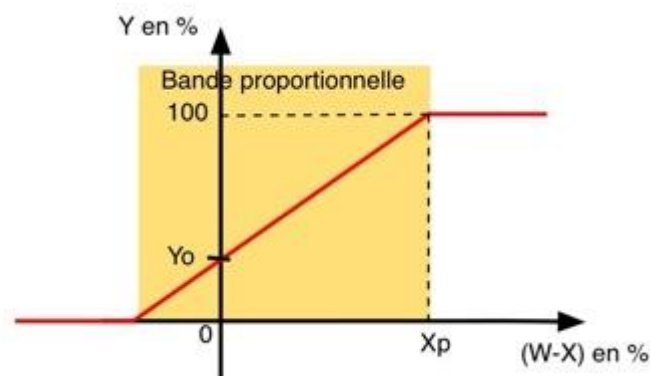


Figure 3-37 : Caractéristique d'un régulateur proportionnel avec décalage de bande

Influence du décalage de bande

Sur la figure 3.38, 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.

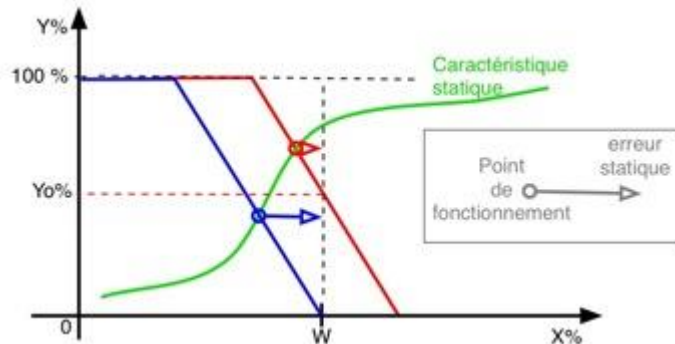


Figure 3-38 : Influence du décalage de bande sur l'erreur statique

Représentation fonctionnelle d'une régulation proportionnelle

Dans le cas d'une régulation à action inverse, la figure 3.39 représente un régulateur en fonctionnement proportionnel.

- K_p = gain de correcteur : $K_p = \frac{100}{X_p}$
- Y_o = décalage de bande

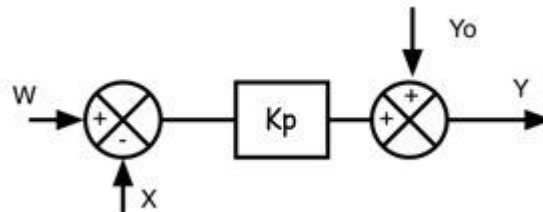


Figure 3-39 : Schéma fonctionnel d'une régulation proportionnelle

9.2 Action intégrale

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 3.40).

- Car la caractéristique statique peut se déplacer sous l'effet d'une grandeur perturbatrice (fig.3.41) ;
- Car la valeur de la consigne change (fig.3.42).

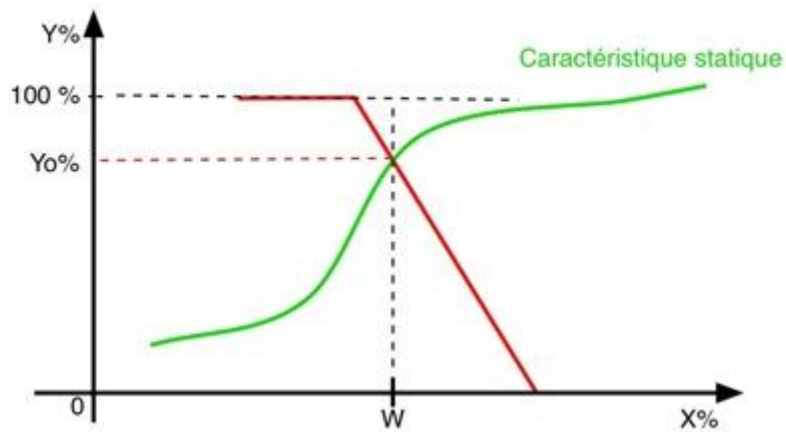


Figure 3-40: Du bon choix de l'intégrale manuelle

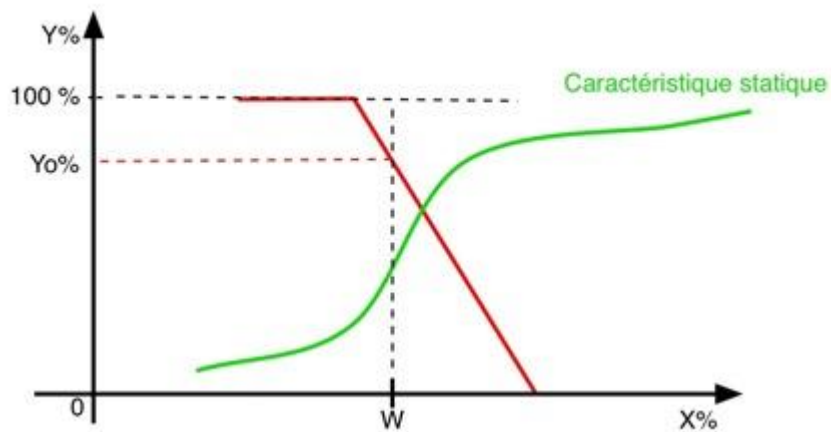


Figure 3-41 : Influence de la perturbation sur l'erreur statique

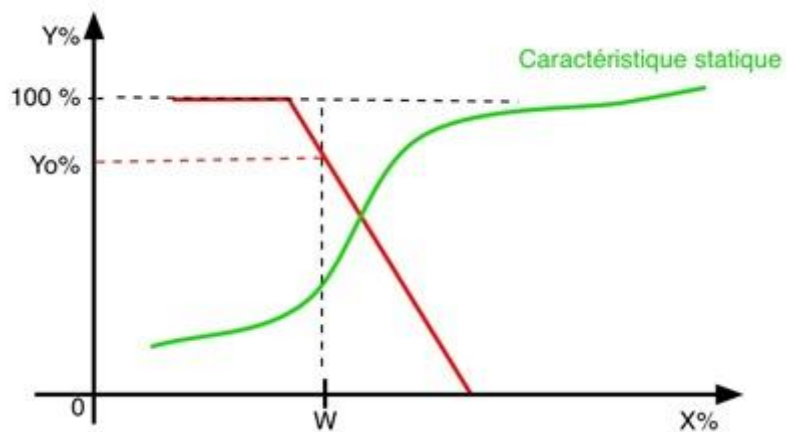


Figure 3-42 : Influence du changement de la consigne sur l'erreur statique

Qu'est-ce qu'une action intégrale ?

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 définit l'action intégrale à partir d'un des deux paramètres T_i ou K_i avec :

$$Y(t) = K_i \int_{t_0}^t (W(t) - X(t)) dt = \frac{1}{T_i} \int_{t_0}^t (W(t) - X(t)) dt$$

- T_i est le temps intégral, définie en unité de temps.
- K_i le gain intégral, définie en coup par unité de temps.

Fonctionnement

Pour étudier l'influence de l'action intégrale, on s'intéressera à la réponse du module intégral à un échelon. Plus K_i est grand (T_i petit), plus la valeur de la sortie Y augmente rapidement. Le temps T_i est le temps pour que la commande Y augmente de la valeur de l'entrée $E=W-X$.

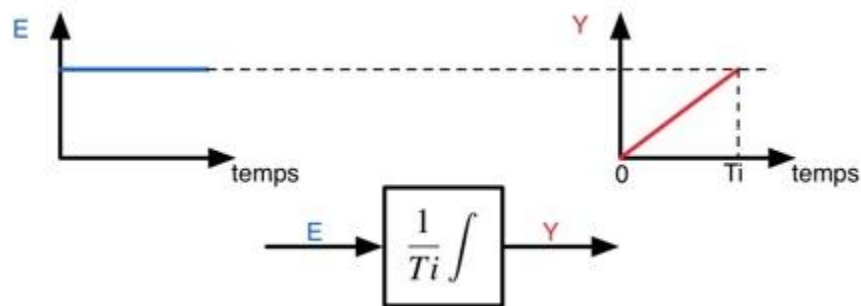


Figure 3-43 : Influence de T_i sur la commande

Supprimer l'action intégrale

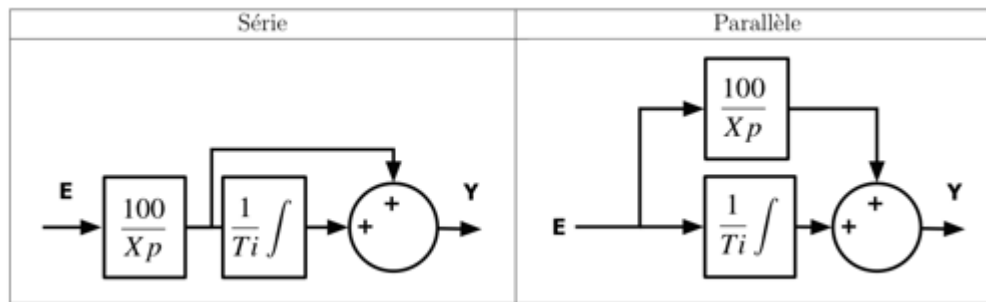
Pour annuler l'action intégrale, il existe plusieurs solutions, fonction du régulateur. Si, on règle l'action intégrale à l'aide du gain K_i , il suffit de mettre K_i à zéro. Dans le cas où le réglage du gain intégral se fait à l'aide du temps T_i , il y a deux solutions :

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

Action conjuguée PI

En général, le régulateur ne fonctionne pas en action intégrale pure (trop instable). Il fonctionne en correcteur Proportionnel Intégral (PI). Le couple, Bande Proportionnelle - Temps Intégral, définit deux types de fonctionnement qui sont représentés dans le tableau suivant :

Structures d'un régulateur PI



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

Influence du paramètre temps intégral

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

Comportement dynamique : Lors d'une réponse indicielle (figure 3.44), plus T_i est petit plus le système se rapproche de l'instabilité.

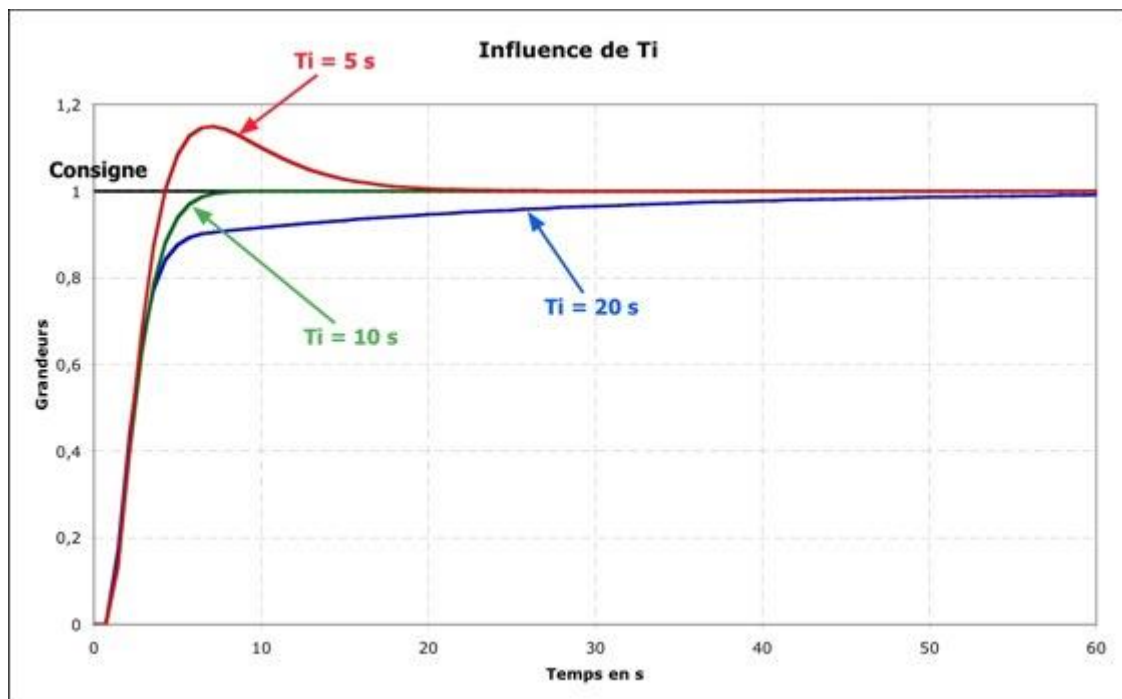


Figure 3-44 : Influence du temps intégral

9.3 Action dérivée

Qu'est-ce qu'une action dérivée ?

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 définit l'action dérivée à partir du temps dérivé T_d avec :

$$Y(t) = T_d \cdot \frac{d}{dt}$$

Le temps dérivé T_d s'exprime en unité de temps.

Fonctionnement

Pour étudier l'influence de l'action dérivée, on s'intéressera à la réponse du module dérivé à une rampe (figure 3.45). Plus T_d est grand, plus la valeur de la sortie Y sera importante. Le temps T_d est le temps pour que l'entrée E augmente de la valeur de la sortie Y .

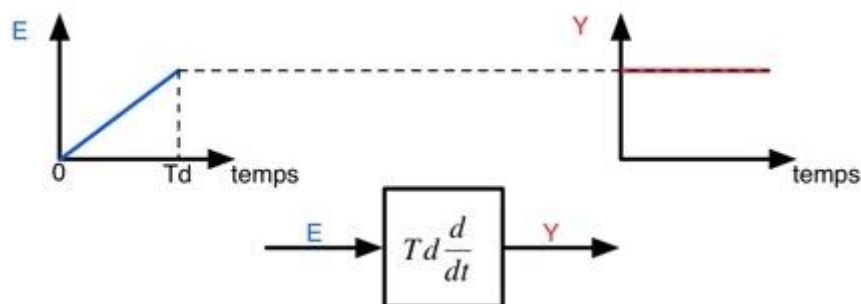


Figure 3-45 : Influence de T_d sur la commande

Supprimer l'action dérivée

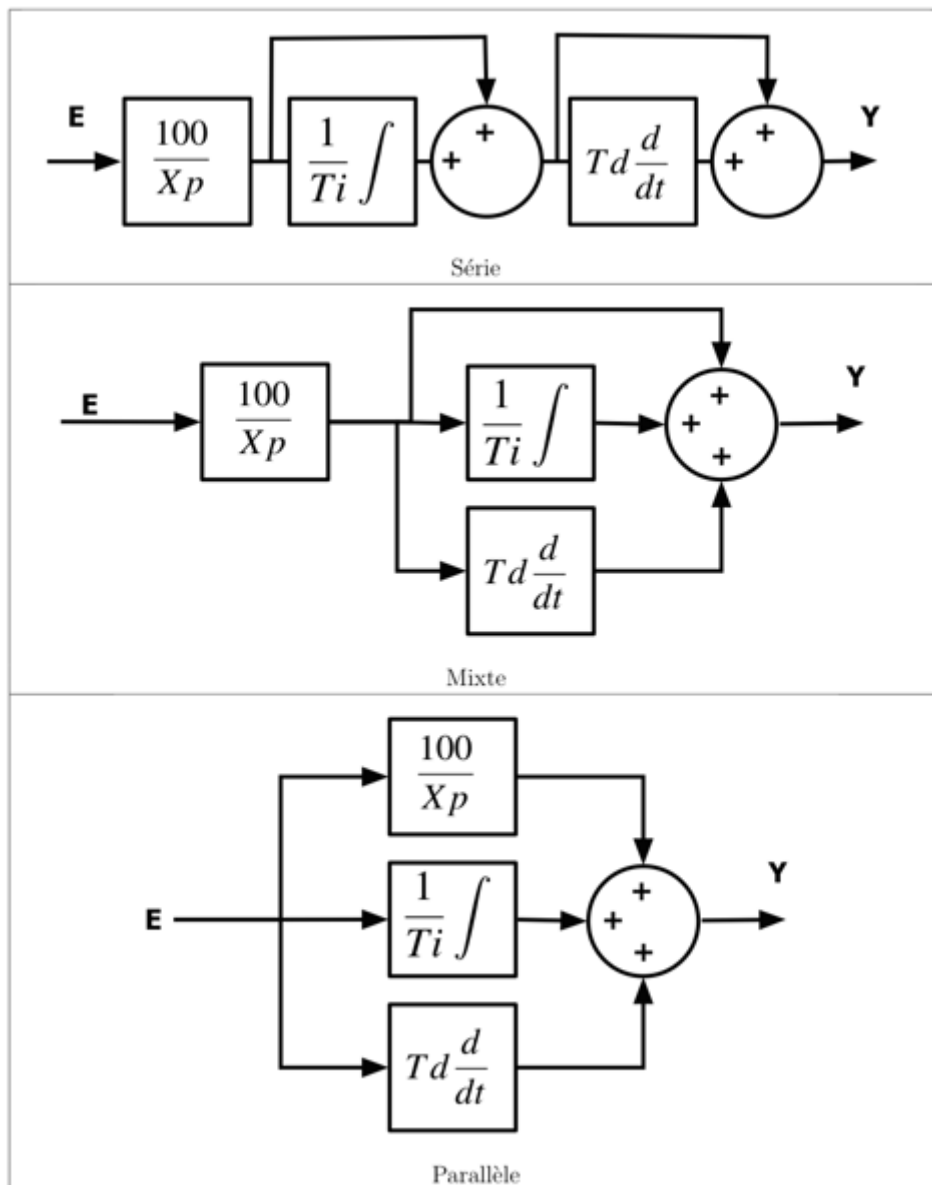
Pour annuler l'action dérivée, il suffit de mettre T_d à 0.

Action conjuguée PID

En général, le régulateur ne fonctionne pas en action dérivée pure (trop instable). Il fonctionne en correcteur Proportionnel Intégral Dérivé (PID). Le triplet, Bande Proportionnelle - Temps Intégral - Temps dérivé, définit trois types de fonctionnement qui sont représentés dans le tableau (Structures des régulateurs PID) :

Remarque : Les régulateurs électroniques (tous ceux de la salle de travaux pratiques) ont une structure mixte.

Structures d'un régulateur PID



Déterminer la structure interne d'un régulateur

Pour déterminer la structure d'un régulateur, il faut l'isoler du système (faire en sorte qu'il n'agisse plus sur la mesure) et le mettre en fonctionnement automatique. Il suffit alors de suivre le logigramme figure 3.46 (on observe la commande Y du régulateur en réponse à un échelon de la mesure X ou de consigne W). Pour avoir des mesures aisées, on prendra les valeurs suivantes :

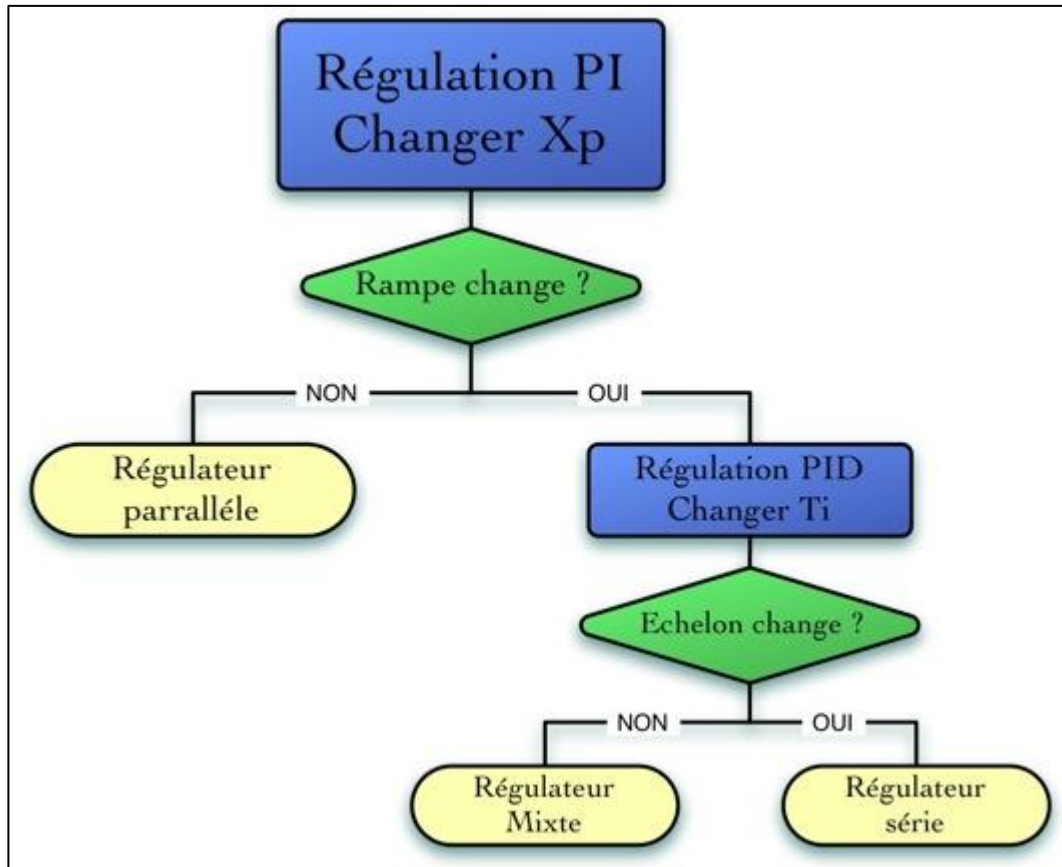


Figure 3-46 : Détermination de la structure d'un régulateur

Influence du paramètre temps dérivé

- **Comportement statique** : Aucune influence.
- **Comportement dynamique** : Lors d'une réponse indicielle (fig. 3.47), plus T_d est grand plus le système est rapide.

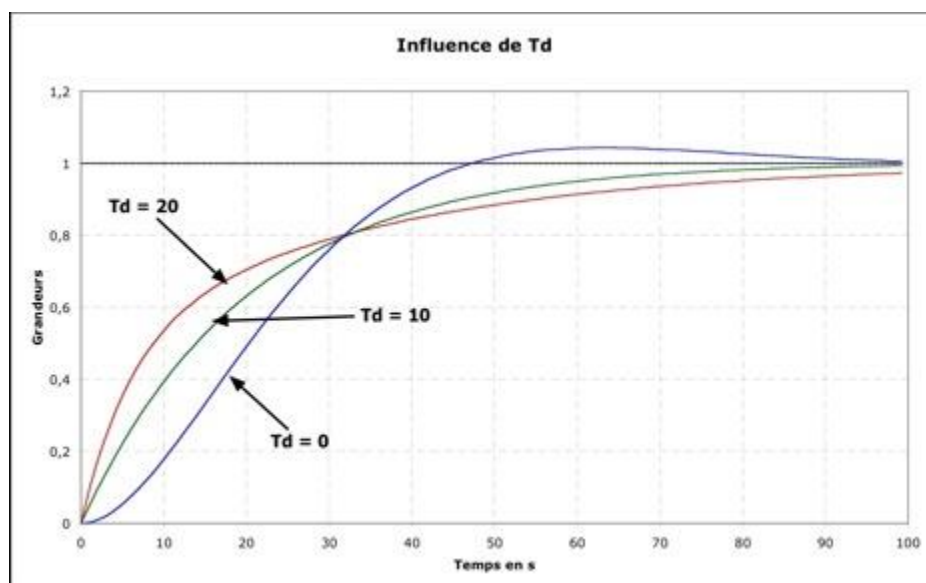


Figure 3-47 : Influence du temps dérivé

9.4 Résumé des actions des corrections P, I et D

Influence des actions du régulateur

Quand augmente	Stabilité	Rapidité	Précision
Bande proportionnelle - XP	Augmente	Diminue	Diminue
Temps intégral - Ti	Augmente	Diminue	Pas d'influence
Temps dérivée - Td	Diminue	Augmente	Pas d'influence

10 Méthodes simples de détermination des actions PID

10.1 Principes fondamentaux

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

- Relevé des caractéristiques du système. Ces relevés se font soit en boucle ouverte soit en boucle fermée.
- Détermination des paramètres représentant le système dans le modèle choisi.
- À l'aide des paramètres, calcul du correcteur PID.

10.2 Les modèles de base

Pour donner une image des différents modèles de base, on s'intéressera à la réponse de ces modèles à un échelon (figure 3.48).

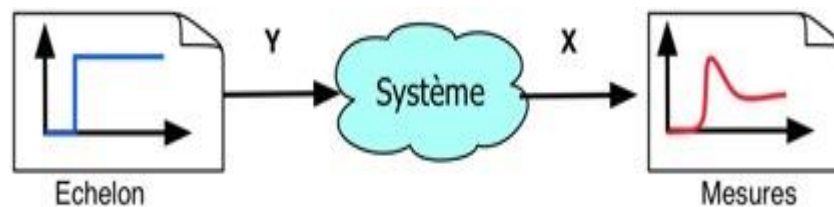


Figure 3-48 : Réponse indicielle

Retard pur

Le signal de sortie est identique au signal d'entrée, mais décalé dans le temps du retard R (figure 3.49).

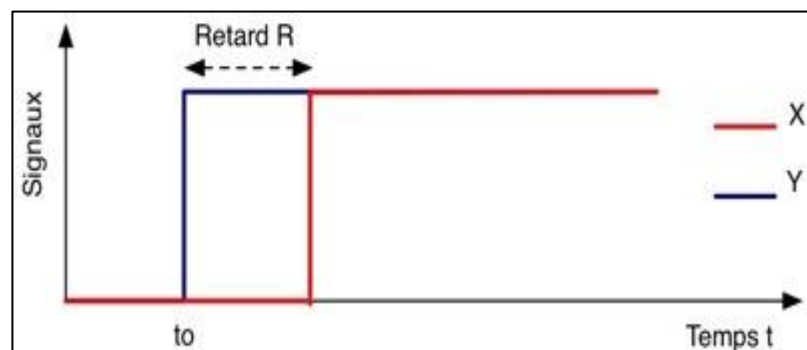


Figure 3-49 : Retard pur

Premier ordre à gain unitaire

Le signal de sortie a pour équation :

$$X(t) = X_{max}. (1 - e^{-\frac{t-t_0}{T}})$$

avec T est la constante de temps du système (figure 3.50).

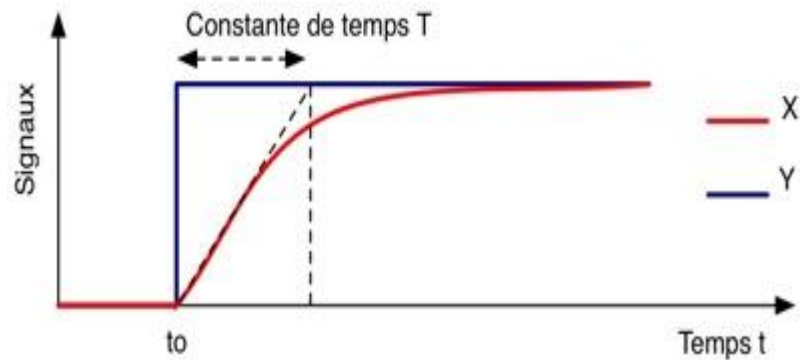


Figure 3-50 : Réponse indicielle du premier ordre à gain unitaire

Intégrateur

Le système peut être défini par son temps intégral T (figure 3.51).

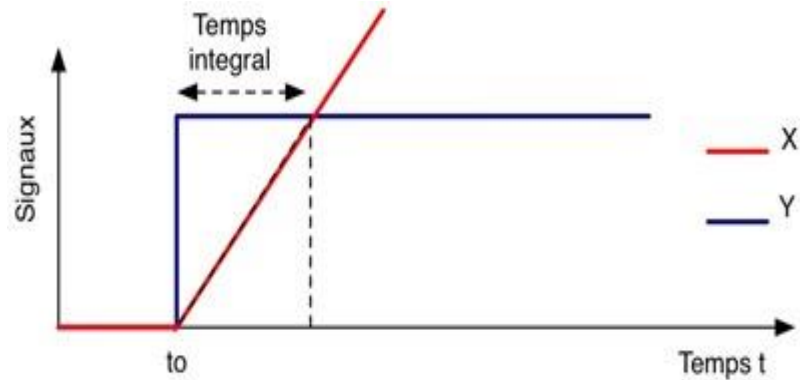


Figure 3-51 : Réponse indicielle d'un système intégrateur

10.3 Réglage en boucle ouverte

Étape 1

Autour du point du fonctionnement, on relève la réponse du système, à un échelon du signal de sortie Y du régulateur. Attention à ne pas saturer X (figure 3.52).

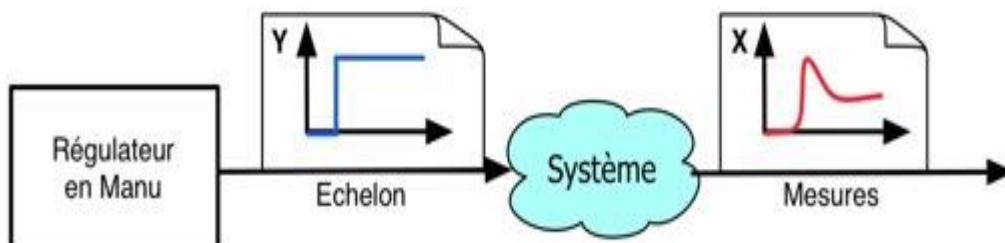


Figure 3-52 : Système en boucle ouverte

Étape 2 - Méthode simple

Procédé stable : À partir des constructions fournies figure 3.53, on calcule :

- Le gain statique : $G = X / Y$;
- Le retard : $R = t_1 - t_0$;
- La constante de temps : $T = t_2 - t_1$.

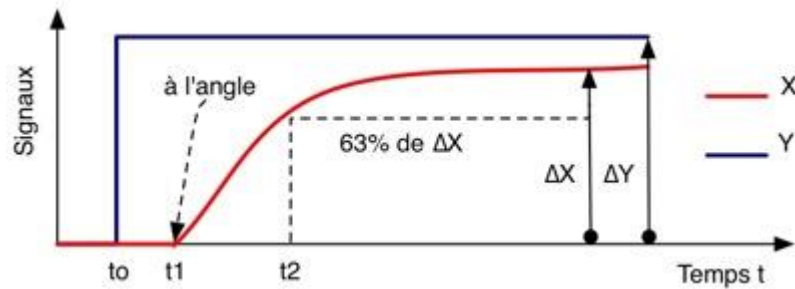


Figure 3-53 : Méthode simple - système stable

Procédé intégrateur : À partir des constructions fournies figure 3.54, on calcule :

- Le temps intégrale $T = t_2 - t_1$;
- Le retard : $R = t_1 - t_0$.

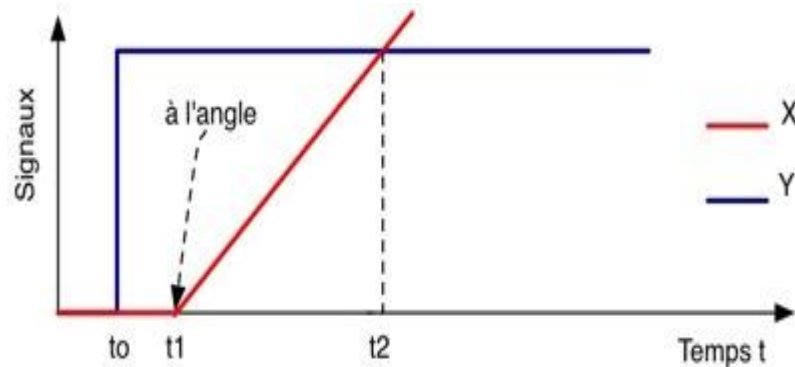


Figure 3-54 : Méthode simple - système instable

Étape 2 - Méthode Broïda

Procédé stable : À partir des constructions fournies figure 3.55, on calcule :

- Le gain statique : $G = X / Y$;
- Le retard : $R = 2,8(t_1 - t_0) - 1,8(t_2 - t_0)$;
- La constante de temps : $T = 5,5(t_2 - t_1)$.

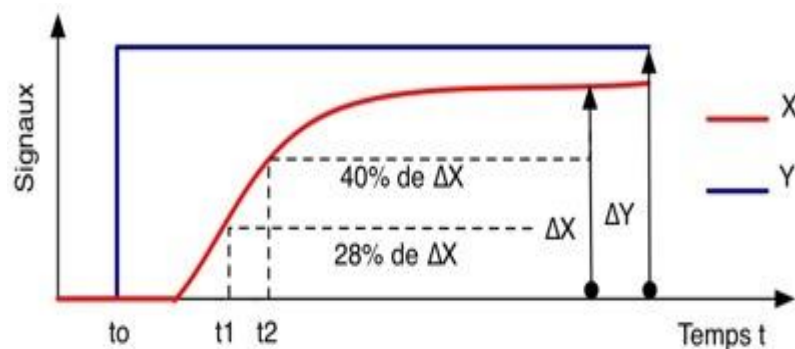


Figure 3-55 : Méthode de broïda - système stable

Étape 3 – Méthode Réglages

À partir du rapport T/R , on détermine le type de correcteur à utiliser à l'aide du tableau choix du type de correcteur. En fonction du type de procédé, stable ou instable, on calcule la valeur des paramètres.

Choix du type du correcteur

$T/R < 2$	$2 < T/R < 5$	$5 < T/R < 10$	$10 < T/R < 20$	$20 < T/R$
Autre	PID	PI	P	TOR

Réglages pour un procédé stable

	P	PI Série	PI //	PID Série	PID //	PID Mixte
X_p	125. G.R/T		118.G.R/T	120.G.R/(T+0,4.R)		
T_i	Maxi	T	1,25.G.R	T	1,3.G.R	T+0,4.R
T_d	0			0,4.R	0,35.T	T.R/(R+2,5.T)

Réglages pour un procédé intégrateur

	P	PI Série	PI //	PID Série	PID //	PID Mixte
X_p	125.R/T		118.R/T	111. R/T		
T_i	Maxi	5.R	6,6.R ² /T	4,8.R	6,6.R ² /T	5,2.R
T_d	0			0,4.R	0,35.T	0,4.R

10.4 Réglages en boucle fermée

Méthode de Ziegler Nichols

Le système est en régulation proportionnelle (actions intégrale et dérivée annulées). On diminue la bande proportionnelle jusqu'à obtenir un système en début d'instabilité, le signal de mesure X et la sortie du régulateur Y sont périodiques, sans saturation (figure 3.56).

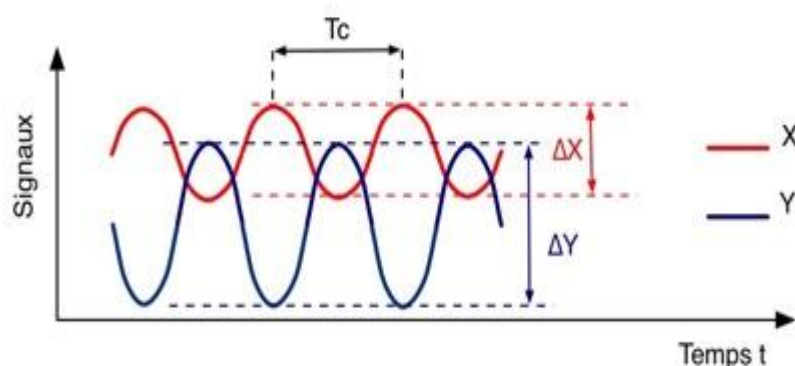


Figure 3-56 : Système instable

- On relève alors la valeur de la bande proportionnelle X_{pc} , ainsi que la période des oscillations T_c .

- La mesure de la période des oscillations T_c et de X_{pc} permet de calculer les actions PID du régulateur (tableau Réglages de Ziegler-Nichols).
-

Réglages de Ziegler-Nichols

	P	PI Série	PI //	PID Série	PID //	PID Mixte
X_p	$2.X_{pc}$	$2,2.X_{pc}$		$3,3.X_{pc}$	$1,7.X_{pc}$	
T_i	Maxi	$T_c/1,2$	$0,02.T_c.X_{pc}$	$T_c/4$	$85.T_c.X_{pc}$	$T_c/2$
T_d		0		$T_c/8$	$7,5.T_c/X_{pc}$	$T_c/8$

Remarque : Cette méthode a été établie à partir d'expérimentations sur divers systèmes à régler en retenant comme critère un bon amortissement dans le fonctionnement en régulation. Elle donne des résultats variables, il faut parfois retoucher les réglages pour obtenir des résultats de performance (stabilité, précision, rapidité) plus proches de ceux désirés.

La méthode du régleur

C'est une méthode qui échappe au cas général. Le réglage du régulateur se fait par petit pas. Le système fonctionnant en boucle fermée, autour du point de consigne :

- En régulation proportionnelle, on cherche la bande proportionnelle correcte en observant la réponse du système à un échelon de consigne (figure 3.57).

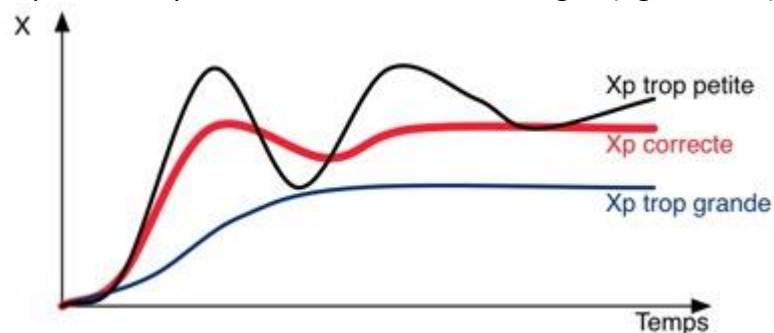


Figure 3-57 : Réglage de la bande proportionnelle

- En régulation proportionnelle intégrale, on cherche le temps intégral correct en observant la réponse du système à un échelon de consigne (figure 3.58).

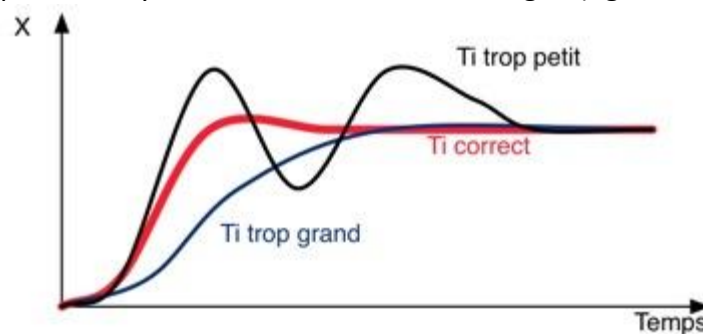


Figure 3-58 : Réglage du temps intégral

- En régulation proportionnelle intégrale dérivée, on cherche le temps dérivé correct en observant la réponse du système à un échelon de consigne (figure 3.59).

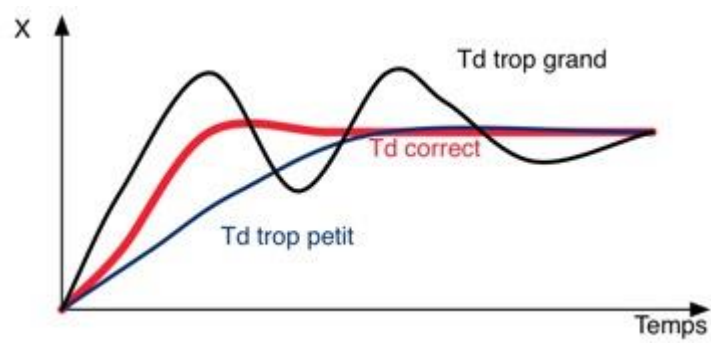


Figure 3-59 : Réglage du temps dérivé

11 Maintenance, Diagnostic et réparation régulateurs numériques

11.1 Introduction

Le diagnostic est une phase importante de la maintenance corrective. De sa pertinence et de sa rapidité dépend l'efficacité de l'intervention. Pour garantir une intervention de maintenance, il est nécessaire de poser les conditions suivantes :

- ✓ Tout intervenant effectuant un diagnostic sur un système doit connaître le fonctionnement du système ainsi que le procédé qu'il permet de réaliser. Cette connaissance doit inclure le but de la machine, son cycle, sa composition et les risques liés à son fonctionnement dans tous les modes de marche, notamment en mode réglage et en mode manuel : l'intervenant doit faire preuve de responsabilité dans ses manipulations.
- ✓ La documentation est aussi vitale que celle du système et qu'il incombe souvent au service maintenance de garantir la fraîcheur de cette documentation.

La méthodologie de diagnostic et maintenance peut être résumée en neuf étapes.

11.2 Étapes de diagnostic et de maintenance

ETAPE 1 : MISE EN EVIDENCE DE LA DEFAILLANCE

La défaillance peut être mise en évidence :

- ✓ de façon visuelle (appel d'un opérateur qui signale la panne en donnant des indications plus ou moins vagues)
- ✓ de façon automatique par détection d'une situation anormale (ex : écoulement d'un temps de recouvrement de mouvement avec émission d'une alarme par l'automatisme). La signalisation d'un problème va alors de l'allumage d'un simple voyant, jusqu'à la remontée à une supervision, en passant par un affichage local sur la machine.

Dans tous les cas, il faut se poser les questions suivantes :

- ✓ de quelle manière se manifeste la défaillance ? (arrêt de la machine, mouvement non conforme, moteur ne tournant pas, vérin ne bougeant pas, ...). A quel stade du cycle le système est-il devenu défaillant ?
- ✓ que peut-on observer à ce stade ?
 - voyants sur l'automate et sur la machine
 - messages (s'il y a un afficheur)
 - état de la machine
 - ...
- ✓ a-t-on déjà une première idée permettant de cerner la zone en défaillance ?

Les réflexions menées à cette étape vont orienter la recherche qui va suivre. On comprend quelle est l'importance de la connaissance de la machine pour que cette orientation soit la bonne. Le but du diagnostic est de cercler autour de la défaillance en réduisant le diamètre du cercle à chaque nouvelle étape de la méthode, et ce jusqu'à ce que la panne soit identifiée.

ETAPE 2 : L'ANALYSE DES RISQUES

Avant d'entreprendre le travail il faut définir les mesures de sécurité à prendre dans le but de :

- ✓ se protéger soi-même
- ✓ protéger les autres (les curieux qui mettent les mains n'importe où)
- ✓ protéger la machine s'il y a risque de casse,

Les dangers à prendre en compte ont différentes sources :

- ✓ Fluides sous pression,
- ✓ Sources thermiques,
- ✓ Energie électrique,
- ✓ Flux de production entrants et sortants de la machine,
- ✓ Dangers mécaniques

On peut donc envisager les mesures suivantes :

- ✓ utilisation de matériel de protection (gants, lunettes, tapis, outils isolés, ...)
- ✓ balisage de la zone de travail pour en empêcher l'accès,
- ✓ apposition d'un panneau d'avertissement,
- ✓ établissement éventuel d'un bon de travail,
- ✓ consignation de l'appareil si nécessaire,
- ✓ vérification des instruments de mesure,
- ✓ ...

Si des mesures doivent être faites (tension, intensité) il ne faut pas consigner tout de suite : ne consigner (si nécessaire) ou condamner la partie en défaut que pour les interventions de réparation.

En cas de consignation ou de condamnation, vérifier l'absence de tension.

N'oubliez pas que vous devez posséder une habilitation pour les interventions de nature électriques.

ETAPE 3 : RECHERCHE DE LA CHAÎNE FONCTIONNELLE

Il s'agit d'interpréter les observations en se basant sur la connaissance de la machine et du déroulement du cycle afin d'identifier toutes les chaînes fonctionnelles ayant un rapport avec la défaillance. C'est le point d'analyse le plus délicat.

La réflexion doit permettre d'identifier cette partie du cycle comme étant la zone de la défaillance. Ainsi on met en cause une ou plusieurs chaînes fonctionnelles:

- ✓ chaînes de commande qui génèrent les actions
- ✓ chaînes d'acquisition qui reçoivent les informations combinées

Il reste alors à terminer le raisonnement pour dire quelle est la chaîne parmi toutes celles identifiées qui est en défaillance. Ce raisonnement doit être logique et doit s'appuyer sur la connaissance du cycle machine ainsi que sur la documentation technique disponible.

On peut pour cela s'aider des voyants des cartes E/S automate (ex : voyants d'entrée et de sortie éteints = chaîne capteur en défaut; voyants d'entrée et de sortie allumés = chaîne actionneur en défaut). Certains tests globaux simples permettent de confirmer le raisonnement :

- ✓ une chaîne fonctionnelle capteur peut être facilement testée en sollicitant le capteur manuellement (avec la main pour une cellule ou un contact mécanique, avec un objet métallique pour un capteur inductif, ...). Il suffit de constater si l'information arrive jusqu'à l'automate en examinant le voyant d'entrée correspondant
- ✓ un actionneur peut être testé manuellement (dans la mesure où la sécurité n'est pas compromise = l'intervenant sait ce qu'il fait). Un forçage manuel des contacts d'un contacteur permet de constater le bon ou le mauvais fonctionnement de la chaîne de puissance électrique en aval (attention, ce forçage doit être bref pour éviter tout risque de casse machine). Un forçage de distributeur pneumatique permet de constater le bon ou le mauvais fonctionnement du circuit pneumatique en aval de ce distributeur.

Remarque : l'utilisation de la console de programmation s'avère ici très utile pour qui sait s'en servir.

ETAPE 4 : LISTE DES MAILLONS DE LA CHAINE

La chaîne fonctionnelle étant identifiée, il faut en lister les maillons, c'est à dire les éléments qui la composent et ce de façon exhaustive :

Chaîne d'acquisition (entrée)

- ✓ carte d'entrée API
- ✓ fils et embouts
- ✓ bornes et connecteurs
- ✓ contacts avec leurs connexions
- ✓ capteurs avec leur réglage
- ✓ ...

Chaîne de commande (sortie)

- ✓ carte de sortie API
- ✓ fils et embouts

- ✓ bornes et connecteurs
- ✓ contacts de relais et de contacteurs avec leurs connexions
- ✓ bobines de relais et de contacteurs avec leurs connexions
- ✓ électrodistIBUTEURS (connecteur, bobine, électrovanne, distributeur)
- ✓ tubes pneumatiques ou tuyaux hydrauliques
- ✓ raccords
- ✓ limiteurs de débit
- ✓ vérins
- ✓ moteurs
- ✓ accouplements mécaniques
- ✓ ...

Un dossier technique à jour s'avère des plus utiles à ce point (électrique, pneumatique, hydraulique, mécanique)

ETAPE 5 : LISTE DES MODES DE DEFAILLANCES

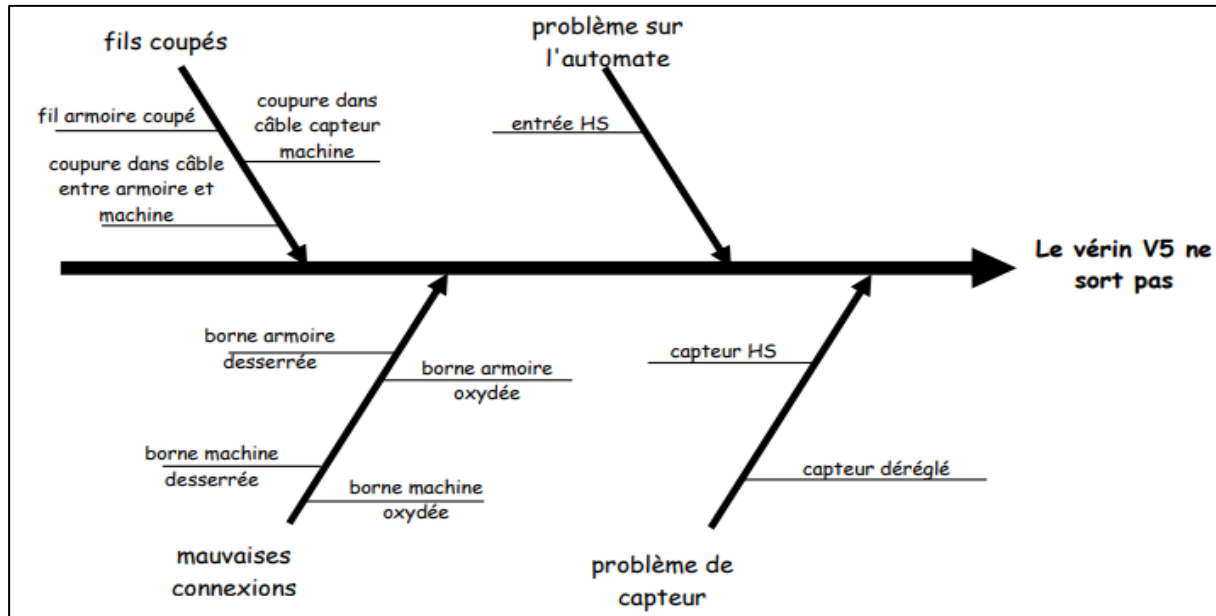
Il s'agit, pour chaque élément de la chaîne, de déterminer les modes de défaillances qui expliquent la panne constatée.

Exemple : le moteur ne tourne pas : fil entre sortie automate et bobine de contacteur coupé
N'oublions pas qu'un dérèglement mécanique est aussi une panne (cellule photoélectrique mal orientée, accouplement desserré, ...)

Cette étape peut être présentée sous une forme conviviale :

- ✓ tableau de cause à effet
- ✓ diagramme d'Ishikawa
- ✓ autre

Exemple de diagramme d'Ishikawa : La chaîne fonctionnelle incriminée est une chaîne d'acquisition. La conséquence de la panne est que le vérin V5 ne sort pas et bloque le cycle.



ETAPE 6 : CRITERES DE TEST

Chaque élément de la chaîne étant identifié par ses modes de défaillance, il faut classer les tests selon des critères permettant de réduire le temps d'intervention :

- ✓ rapidité
- ✓ probabilité
- ✓ accessibilité

sur les parties

- ✓ électrique
- ✓ pneumatique
- ✓ hydraulique
- ✓ mécanique

Exemple: si l'ampoule ne s'allume pas il est raisonnable de penser qu'elle est grillée (probabilité et rapidité) plutôt que de défoncer le mur à la recherche d'une coupure du câble.

Les tests du type "visuel" sont à privilégier dans un premier temps : on vérifie sans instrument de mesure. (exemple : vérification de l'état des connexions).

Les tests nécessitant un démontage se feront en dernier lieu.

Pour les tests avec mesures d'une grandeur électrique, il est préférable de privilégier les mesures de tension à celles de continuité. En effet, la mesure de continuité nécessite l'isolement des circuits à tester. Les mesures d'intensité ne se feront que si c'est absolument nécessaire, car elles imposent la mise en série de l'appareil dans le circuit de mesure, et de plus il faut respecter les limites d'ampérage pour l'appareil.

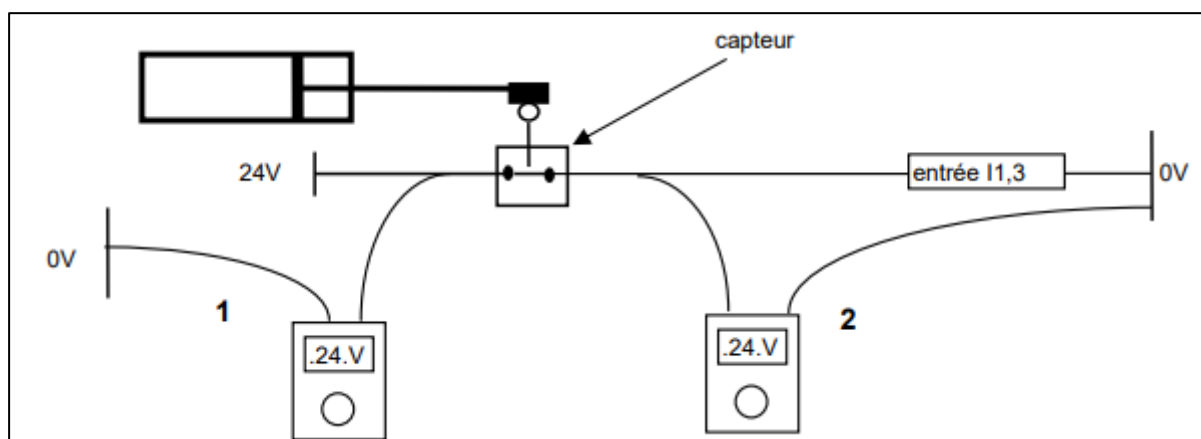
ETAPE 7 : PROCEDURES DE TEST

Tous les tests doivent être présentés sous forme de tableau. Dans ce tableau on précise :

- ✓ l'élément à tester
- ✓ le principe du test (visuel, avec instrument)
- ✓ l'instrument utilisé s'il y a lieu
- ✓ les point précis du test (ex : où placer les sondes du voltmètre)
- ✓ les résultats normalement attendus de ce test
- ✓ une observation éventuelle

Lorsque tous les tests ont été défini de manière exhaustive, on peut passer à la phase active du diagnostic, c'est à dire l'examen et la mesure. Les tests sont réalisés l'un après l'autre en commençant par le premier de la liste. Les résultats sont notés dans le tableau dans la colonne mesure. Lorsque le résultat est différent du résultat attendu, c'est qu'on a trouvé l'élément défaillant.

Exemple : dans cette configuration de test, le contact du capteur est censé être fermé.



Si le capteur est bien fermé, la mesure au test 2 donne normalement 24V aux bornes de l'entrée. Si on obtient une mesure de 0V, c'est que le capteur est défaillant ou mal réglé, ou qu'une connexion est défaillante au niveau du capteur.

ETAPE 8 : REPARATION

Les tests étant tous définis, il s'agit de les réaliser jusqu'à ce que la panne soit trouvée. Il ne reste plus alors qu'à remplacer l'élément défectueux et à essayer à nouveau la machine.

Si la réparation est temporairement impossible (manque de pièce en stock), il est nécessaire de déterminer les possibilités en marche dégradée si on ne veut pas que la production reste bloquée.

ETAPE 9 : COMPTE-RENDU

L'intervention de maintenance corrective doit laisser une trace dans l'organisation du système de maintenance de l'entreprise. Cette trace se fait sous forme de compte-rendu écrit ou informatisé et vient alimenter un historique qui pourra servir d'outil d'analyse.

Les documents et supports de saisie propres à l'entreprise sont utilisés dans ce cas, mais un minimum d'informations est requis :

- ✓ référence de la machine
- ✓ nature de l'intervention
- ✓ date (et heure) de l'intervention
- ✓ identification de l'auteur
- ✓ durée de l'intervention
- ✓ pièces changées s'il y a lieu
- ✓ coût éventuel des pièces

11.3 Maintenance diagnostic & dépannage des boucles de régulation

Les problèmes d'une boucle de régulation proviennent pour l'essentiel :

- ✓ Des **défauts des chaînes de mesure** ou de commande,
- ✓ D'un **comportement trop nerveux** (pompage !) ou trop mou de la boucle de régulation qui nécessite une retouche des réglages du régulateur.

Dans certains cas c'est le régulateur lui-même qui peut être défaillant.

Sur les régulateurs numériques actuels, de part cette technologie, aucune dérive des fonctionnalités PID n'est possible. Les problèmes concernent essentiellement les quatre points névralgiques les plus « fragiles » que sont :

- ✓ **Les entrées**
- ✓ **Les sorties**
- ✓ **L'alimentation électrique**
- ✓ **La face avant**

Certains régulateurs ont des fonctions d'autotest (partiel) de leurs points sensibles. Ces fonctions opèrent en continu ou simplement au démarrage ou sur commande et indiquent d'eux-mêmes, et de différentes manières (clignotement d'affichage ou de led, émission de codes d'erreurs), la défaillance d'un de leurs éléments.

LES ENTREES :

Défaut	Mise en évidence	Causes possibles
Défaillance du convertisseur analogique/numérique (CAN)	Après avoir consigné et mis en manuel, la boucle de régulation puis avoir déconnecté l'arrivée de la chaîne de mesure sur le régulateur, injecter un courant entre 4 et 20 mA sur la voie d'entrée mise en doute. Vérifiez la	Injection accidentelle d'un courant ou d'une tension parasite trop forts dans la boucle d'entrée (manœuvre accidentelle, foudre, électricité statique) Surchauffe du composant CAN (ventilation défaillante ou insuffisante).

	cohérence des informations reçues par l'appareil par rapport à la valeur du signal émis.	
Défaut d'alimentation de la boucle par le régulateur (si c'est le cas).	Vérifiez la tension d'alimentation émise dans la boucle. Si elle ne correspond pas à la valeur nominale indiquée dans la notice de l'appareil (entre 18 et 35 Volt selon les matériels), renouvelez le test en ayant déconnecté la chaîne de mesure car cette chute de tension d'alimentation peut aussi résulter d'une mise en court-circuit accidentelle de la chaîne de mesure.	Injection accidentelle d'un courant ou d'une tension parasite trop fort dans la boucle d'entrée (manœuvre accidentelle, foudre, électricité statique). Mise en court-circuit de l'alimentation de la boucle si celle-ci n'est pas protégée contre ce type d'accident (protection alors supposée montée en externe).
Mauvais contact, ouverture de la chaîne d'entrée	Vérifiez l'état des borniers et connections. Si exercer des pressions sur les borniers ou connectiques, ou bouger légèrement les fils, rétabli, même très temporairement, le fonctionnement correct de la chaîne d'entrée, la présence d'un mauvais contact est avérée.	Toute action mécanique, vibratoire ou autre.
Surcharge d'une boucle de courant d'entrée.	La surcharge d'une boucle de courant par rapport à la tension d'alimentation de la boucle, engendrera un plafonnement de la valeur du signal 4-20 mA.	Rajout d'un élément récepteur supplémentaire dans la boucle (enregistreur, centrale d'acquisition, indicateur, etc...) qui la met en surcharge, ce qui peut n'avoir d'effet que lorsque le courant atteindra une valeur importante.
Défaillance de la chaîne de mesure elle-même.	cf partie MESURE	cf partie MESURE

LES SORTIES :

Défaut	Mise en évidence	Causes possibles
Défaillance du convertisseur numérique/analogique (CNA)	Mettre le régulateur en manuel et vérifiez avec un multimètre la cohérence du signal émis par rapport à la valeur commandée en manuel. Plutôt que d'insérer le multimètre dans la chaîne de mesure, il est préférable de déconnecter celle-ci et de mesurer directement le signal brut de sortie. On évitera ainsi de prendre en compte des problèmes liés à la boucle de commande.	Injection accidentelle d'un courant (ou d'une tension parasite) trop fort dans la boucle de commande (manœuvre accidentelle, foudre, électricité statique) Surchauffe du composant CNA (ventilation défaillante ou insuffisante).
Mauvais contact,	Vérifiez l'état des borniers et	Toute action mécanique, vibratoire ou autre.

ouverture de la chaîne de commande.	connections. Si exercer des pressions sur les borniers ou connectiques, ou bouger légèrement les fils, rétabli, même très temporairement, le fonctionnement correct de la chaîne de commande, la présence d'un mauvais contact est avérée.	
Surcharge d'une boucle de courant de sortie.	La surcharge d'une boucle de courant par rapport à la tension maximale admissible par la sortie, engendrera un plafonnement de la valeur du signal de commande 4-20 mA.	Rajout d'un élément récepteur supplémentaire dans la boucle (enregistreur, centrale d'acquisition, indicateur, etc...) qui la met en surcharge, ce qui peut n'avoir d'effet que lorsque le courant atteindra une valeur importante. Défaillance d'un élément récepteur (souvent un positionneur de vanne) ayant pour effet une augmentation de son impédance. cf partie MESURE
Défaillance de la chaîne de commande elle-même (convertisseur, positionneur, vanne).	cf partie MESURE	cf partie MESURE

L'ALIMENTATION :

Défaut	Mise en évidence	Causes possibles
Défaillance de l'alimentation	Arrêt total de l'appareil (mis hors tension)	- Tension extérieure défaillante ou entachée de pic de tension, ou d'harmoniques. - Défaillance d'un des éléments du bloc alimentation : le transformateur, les composants redresseurs, ou simplement un fusible s'il en est équipé.

Une défaillance du bloc alimentation ou de simples dysfonctionnements partiels de ce dernier, peuvent entraîner une décharge de la batterie de sauvegarde des mémoires. Cette batterie peut aussi, avec l'âge, défaillir d'elle-même. Il s'en suit une perte des paramètres. Selon leurs valeurs, les nouveaux paramètres ainsi initialisés peuvent provoquer des défauts qui peuvent être interprétés à tort comme des défaillances d'entrées, de sorties ou de conduite-affichage (exemples : échelles de mesures ou d'affichages à 0, valeur maximale de la sortie à 0, forçage en manuel).

LA FACE AVANT

Défaut	Mise en évidence	Causes possibles
Défaillance de l'affichage digital ou de la consignation d'état (led)	Arrêt total d'éléments d'affichages. Discordance entre les valeurs affichées et la valeur réelle. Une seule des barres d'un digit d'un afficheur peut être seule défailante créant, par exemple, l'affichage d'un 5 au lieu d'un 6 ou d'un 9. Certains régulateurs numériques ont une fonction test de l'affichage face avant.	- Vieillessement du composant ou défaillance des limandes et autres connexions interne du régulateur. - Ambiance agressive (température, humidité ou acidité de l'air, etc...) - Tension extérieure défailante ou entachée de pic de tension.
Défaillance de boutons	Bouton(s) inopérant(s).. Attention ! : par configuration programmation ou paramétrage des boutons peuvent être inhibés volontairement et de façon permanente ou occasionnelle	- Vieillessement du bouton et de son contact électrique. - Ambiance agressive (température, humidité ou acidité de l'air, etc...) - Actions répétées ou trop violentes sur les boutons qui accentuent fortement le vieillissement.

11.4 Maintenance préventive

Il est difficile, voire impossible, de prévenir la panne d'un régulateur numérique, celle-ci étant très rarement précédée de signes précurseurs aisément perceptibles. On peut toutefois :

- 1) Procéder à un relevé et à une consignation générale de tous les paramètres de tous les régulateurs, car, selon la panne que peut avoir un appareil (exemple : panne d'alimentation), cette opération peut s'avérer totalement impossible. Pour cela on peut utiliser les fiches ou les tableaux étiquettes auto-collantes, souvent fournis dans cet objectif, par le constructeur.
- 2) Procéder, en particulier à la mise en route de l'installation, à des relevés des différentes valeurs physiques représentatives du procédé régulé, lors d'états stables à différentes allures et points de fonctionnement. Ce tableau de valeurs nominales de référence permettra d'identifier les problèmes liés au procédé, ceux-ci entraînant souvent, par contre-coup, des problèmes au niveau de la boucle de régulation (changement de comportement du procédé vu sous l'angle « régulation »).
- 3) Sur les boucles dont la qualité métrologique de la chaîne de mesure est importante (impératif de précision de la mesure), procéder régulièrement à une recalibration de l'entrée analogique concernée. Une recalibration de la sortie est, elle aussi possible, mais la dérive de la sortie analogique de commande porte souvent beaucoup moins à

conséquences au niveau de la boucle de régulation, que la dérive d'entrée analogique de la mesure.

- 4) Procéder systématiquement à une petite enquête, après chaque panne, afin d'en déterminer ses causes probables ou possibles et y remédier.

Chapitre IV

TRAVAUX DIRIGES / AUTOEVALUATION

1- Autoévaluation

1- Convertir les unités suivantes :

50 mm H ₂ O	bar
1 bar	PSI
200 mbar	PSI
500 kpa	bar
5000 l/min	m ³ /h

2- Donner la signification des symboles suivants :

FT :

PI :

LV :

PIT :

TT :

LIC :

TIC :

3- Quel est le rôle d'un transmetteur ?

4- Quels sont les paramètres qu'on doit régler sur un transmetteur ?

5- On donne la plaque signalétique d'un transmetteur :

Maxi W.P.	250 bar
SPAN	0-83 / 2480 mbar
Output	4-20 mA
Supply	10.5 – 55 VDC
U max	55 VDC
CAL	0 – 2480 mbar
Tag - Nr	PT 051

a- calculer la rangeabilité de ce transmetteur.

b- Est-il possible de faire le réglage de l'échelle suivante : 0 - 4 bar ?

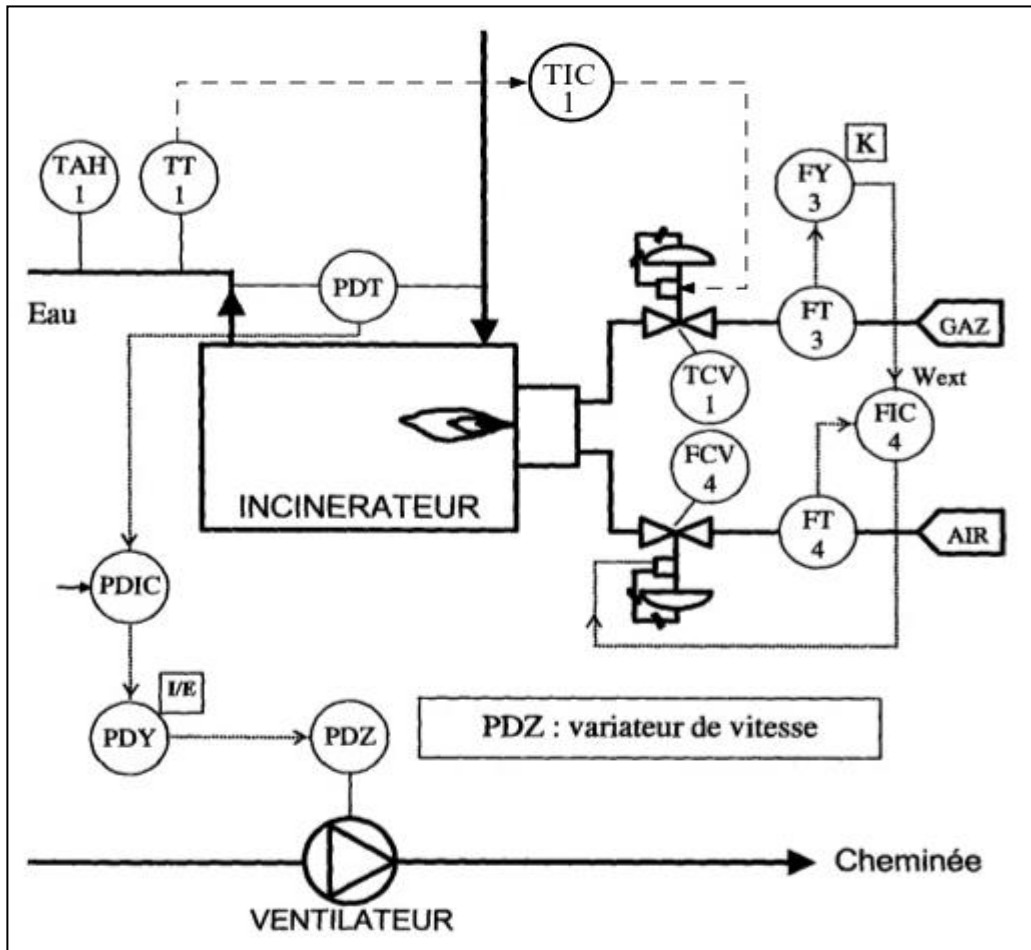
c- On utilise ce transmetteur pour régler une échelle de pression différentielle de 0 à 1,5 bar. Compléter le tableau suivant :

Entrée transmetteur (ΔP)	Sortie transmetteur (mA)
0,5 bar	
1 bar	
	16 mA

6- Quels sont les techniques de mesure de la température ?

7- Donner l'expression du débit pour un débitmètre à diaphragme.

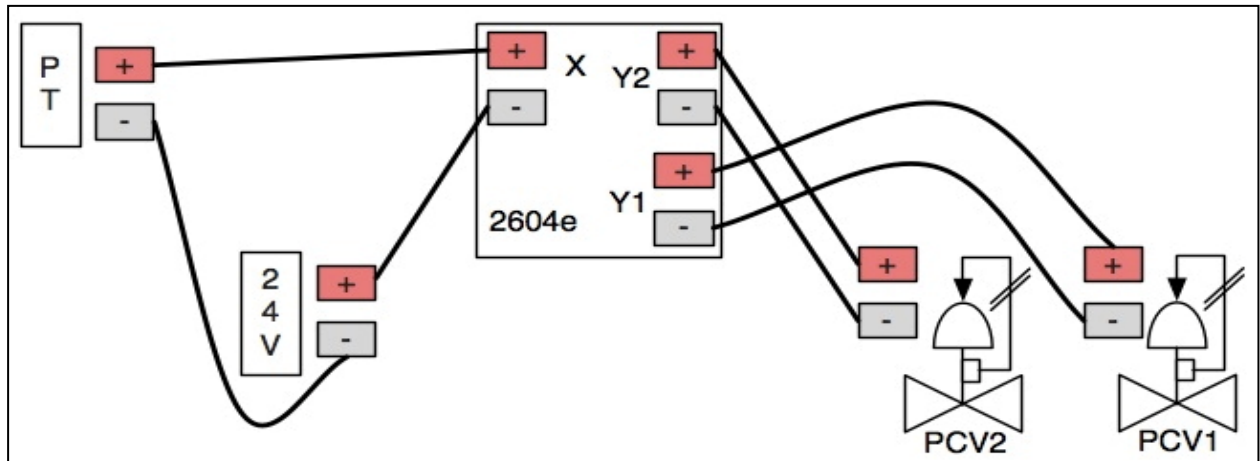
- 8- Pour les capteurs de températures :
- Quelle est la différence entre un thermocouple et une PT100.
 - Quels sont les avantages de la mesure de température par pyrométrie.
- 9- Un transmetteur 4-20 mA a été étalonné pour une plage de mesure de 0 à 100 °C. Le fonctionnement normal de l'installation nécessite une température de 75 °C.
- Quelle doit alors être la valeur du courant de sortie du transmetteur ?
- 10- On donne le schéma d'une installation industrielle:



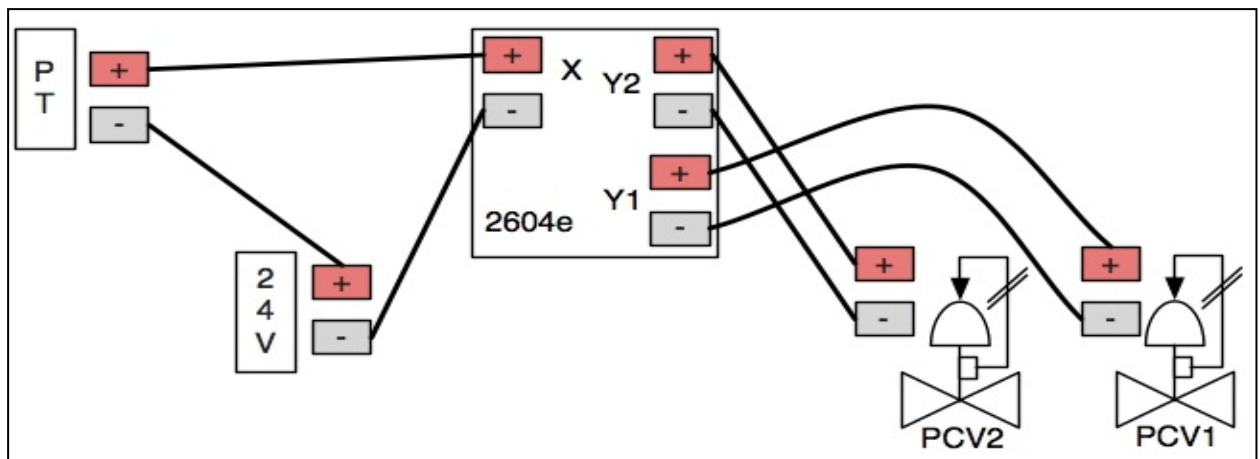
TAH est :

- un transmetteur analyseur d'hydrogène
- un transmetteur actif haut
- un transmetteur de PH
- une alarme haute de température

11- Le montage ci-dessus est-il correct ?



12- Le montage ci-dessus est-il correct ?

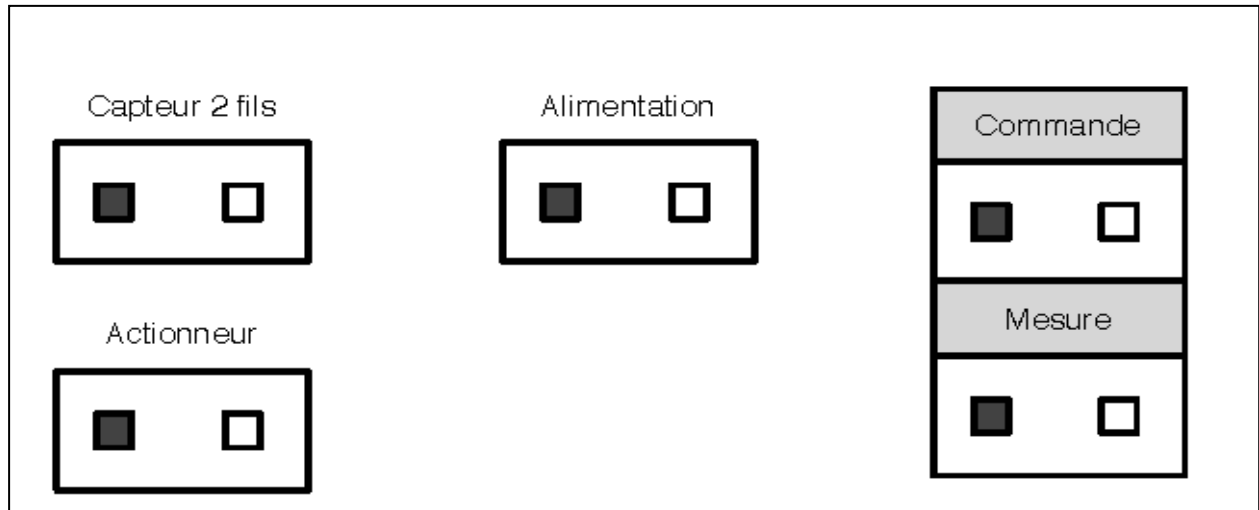


13- Compléter les schémas de câblage suivant:

Schéma 1:

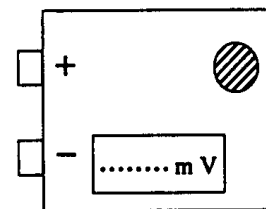
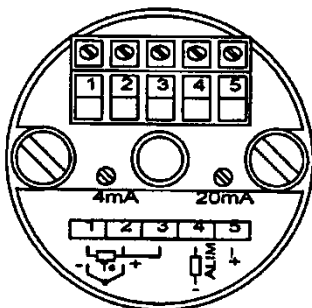


Schéma 2:

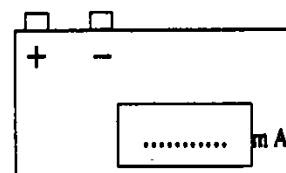
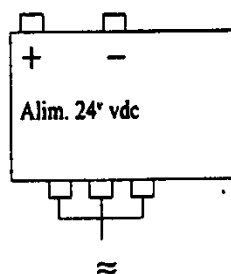


14- On désire vérifier un convertisseur de température. Cette vérification se fait en atelier où la température ambiante est de 20°C et au moyen d'un générateur de mV sans dispositif de compensation de soudure froide. Le convertisseur doit être utilisé pour une entrée thermocouple Type K et une sortie 4 ; 20 mA.

- Faire le branchement en complétant le schéma ci-dessous.
- Compléter la table de réglage sachant que l'échelle est de 0 à 200°C.



Générateur millivolt

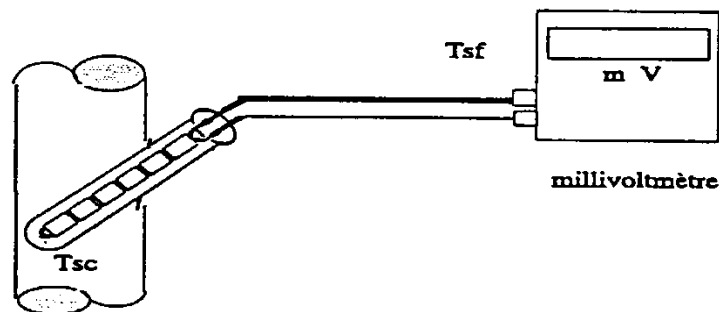


milliampèremètre

Température (°C)	Entrée (mV)	Sortie en mA
0		
50		
100		
150		
200		

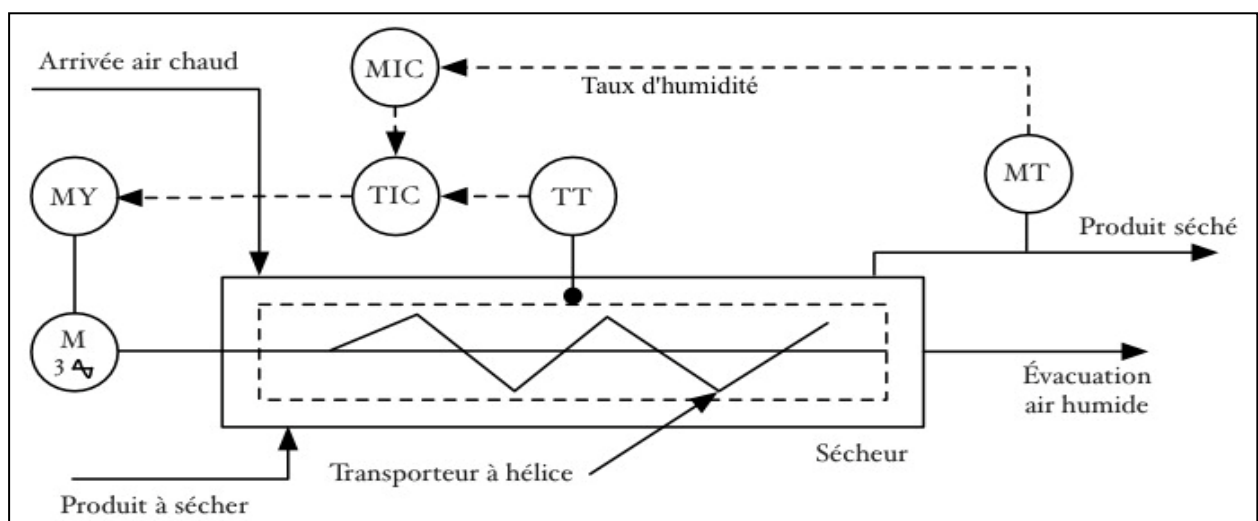
15- On considère le circuit de mesure de température représenté ci-dessous.
En utilisant la table du thermocouple, déterminer la température T_{sc} de la jonction chaude de ce dernier sachant que :

- le couple est de type K
- la température ambiante $T_{sf} = 24\text{ °C}$ est uniforme dans l'environnement de la ligne de raccordement et du millivoltmètre.
- le millivoltmètre indique la tension $V = 23,7\text{ mV}$

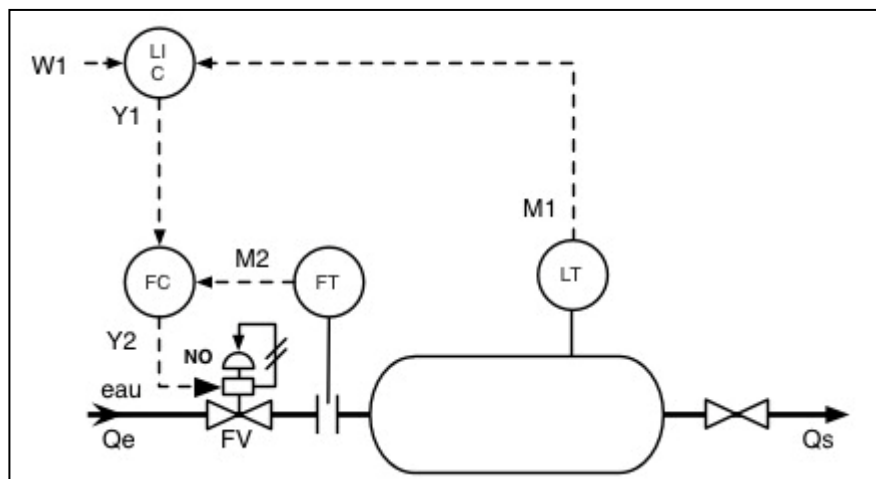


16- Donner le sens d'action

- du régulateur TIC
- du régulateur MIC

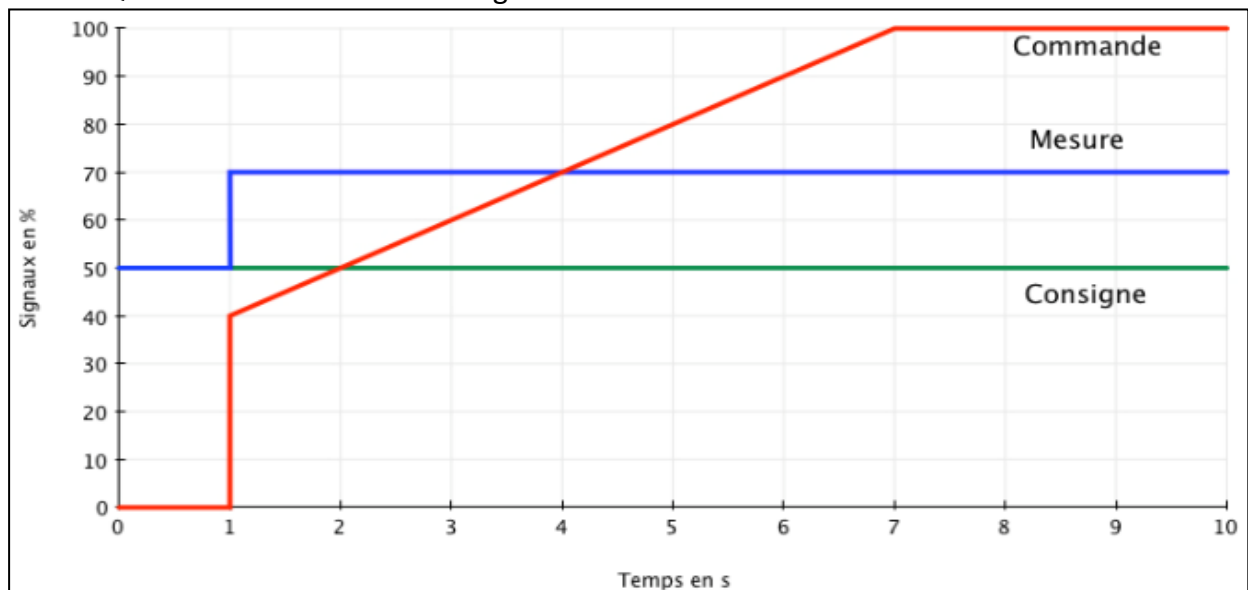


17- Donner le sens d'action du régulateur FC

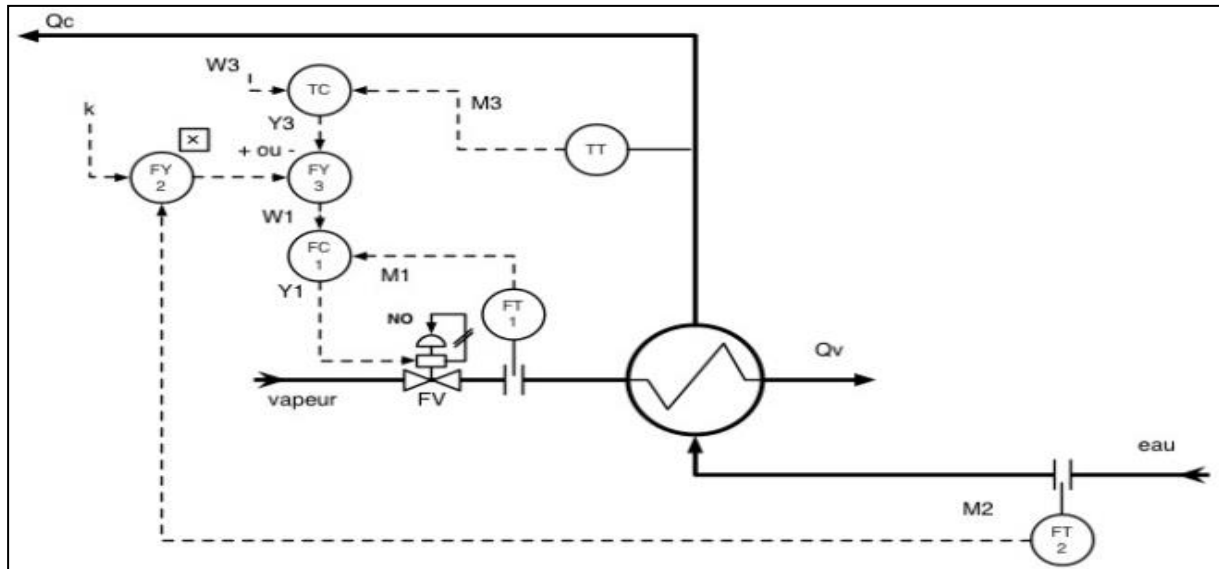


18- Dans un régulateur, si on a $Y=K_p(W-X)$, alors c'est un régulateur avec une action directe (vrai ou faux).

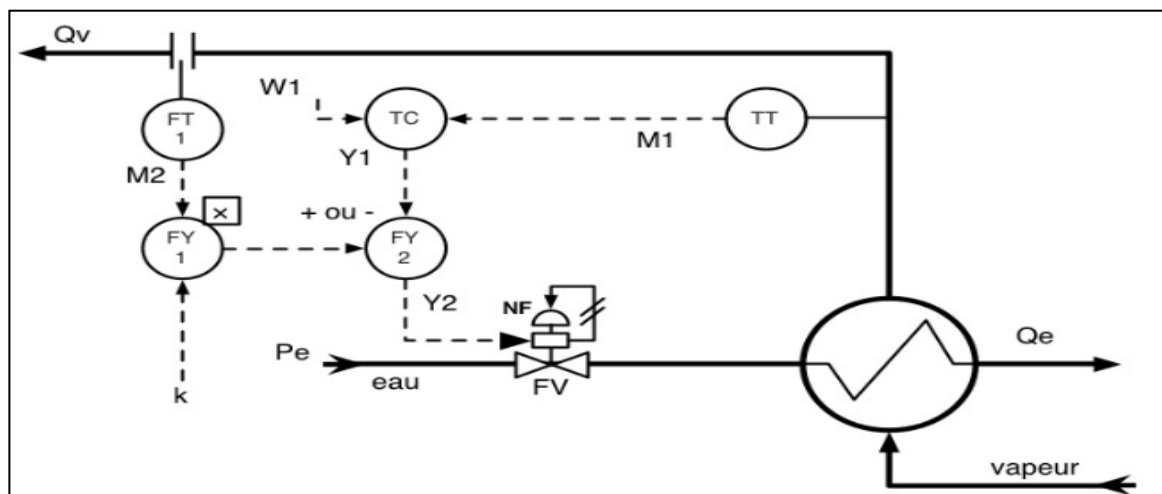
19- On observe la sortie d'un régulateur en réponse à un échelon de mesure.
Quel est le sens d'action du régulateur ?



20- Donner le sens d'action de FC1.

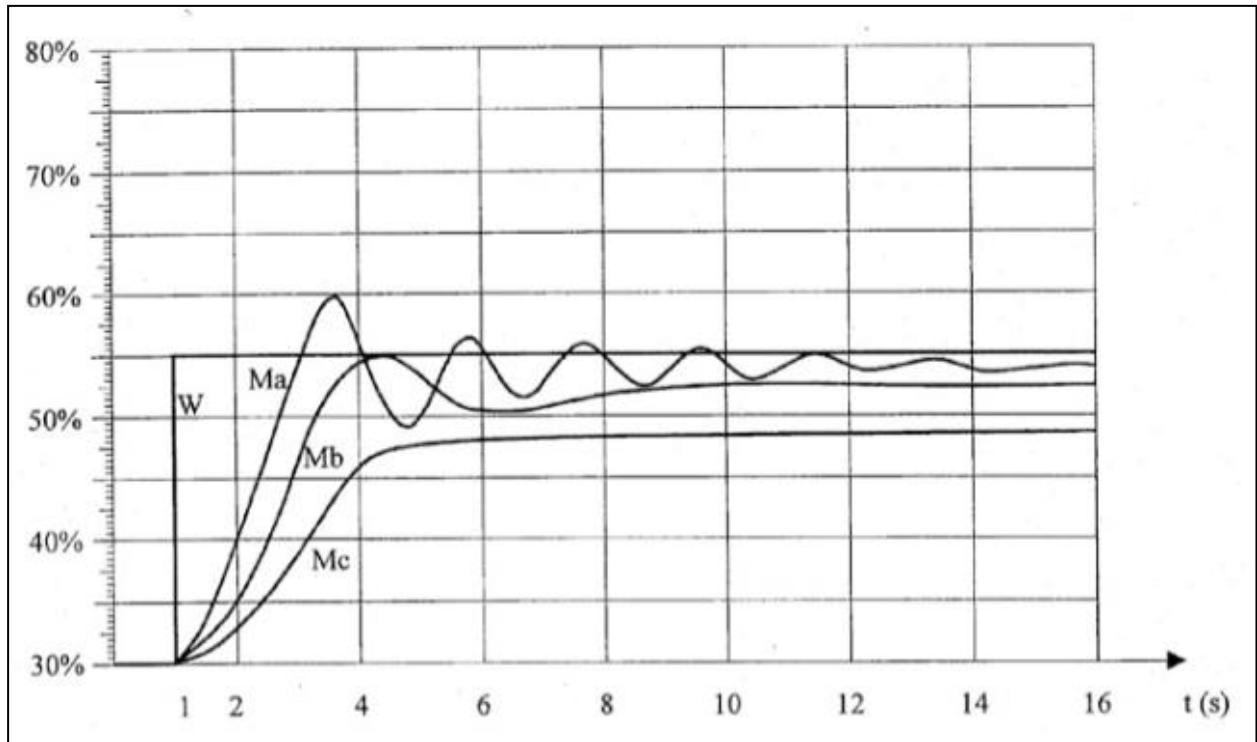


21- Donner le sens d'action du régulateur TC.

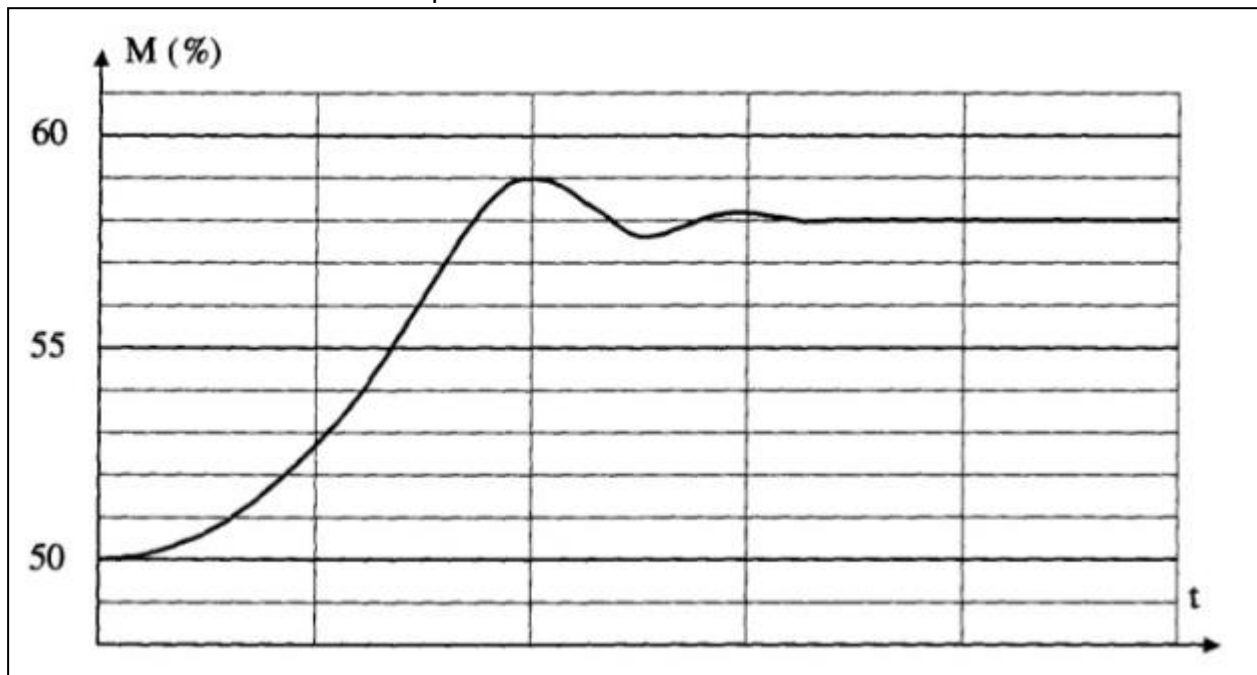


22- On donne la réponse indicielle d'un système.

- Quelle est la valeur du dépassement en % de Mb si Mb se stabilise à 52% ?
- Quelle est la valeur du dépassement en % de Ma, si Ma se stabilise à 54% ?

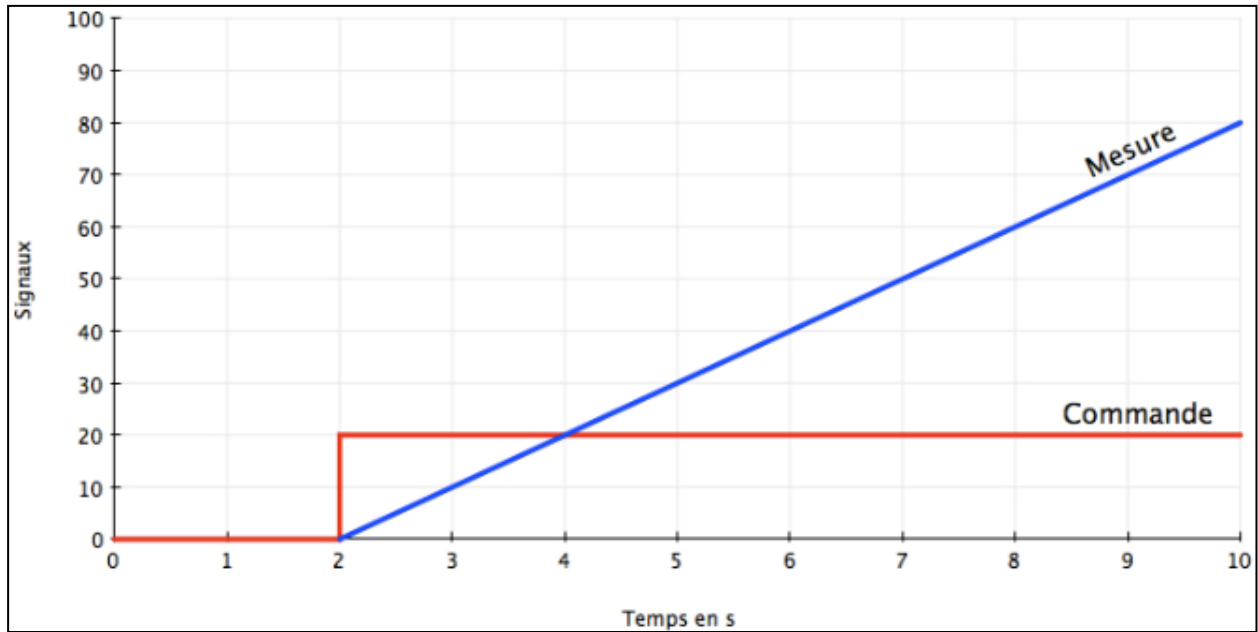


23- Quelle est la valeur du dépassement en % ?



24- On observe la sortie d'un procédé en réponse à un échelon de commande.

a. Le procédé est : (naturellement stable ou instable)

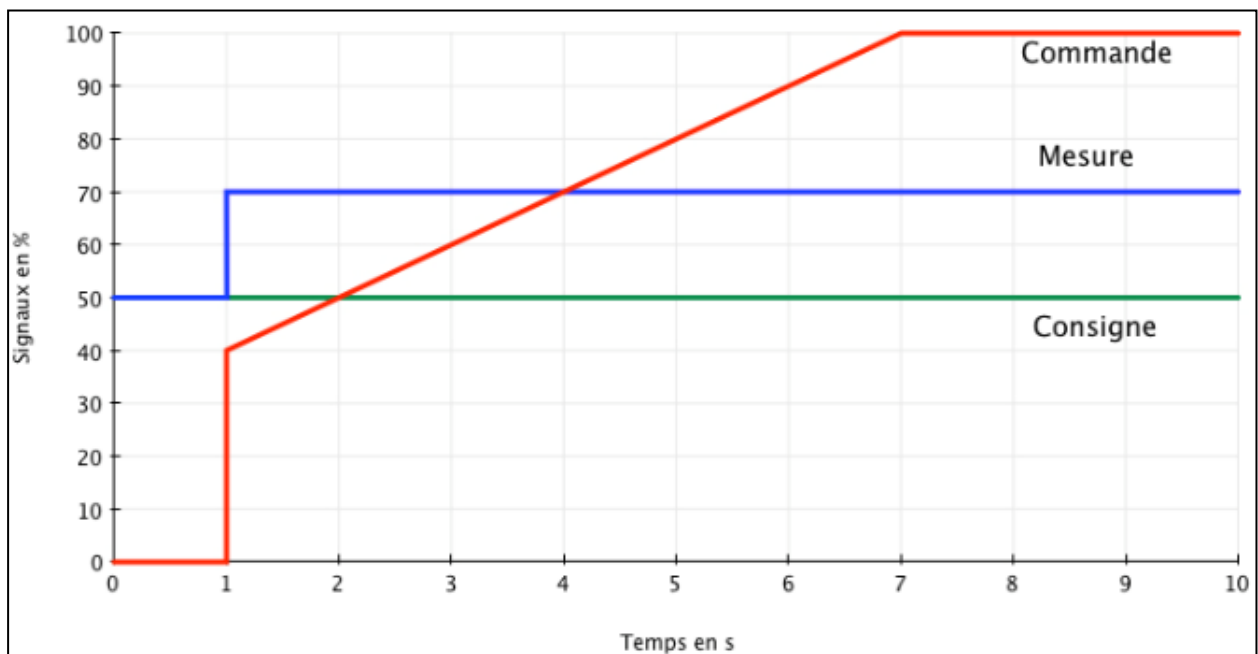


b. Quelle est la valeur de la constante de temps d'intégration ?

25- On observe la sortie d'un régulateur en réponse à un échelon de mesure.

Le régulateur est mixte.

Quelle est la valeur de X_p ?



26- On donne l'expression du signal de commande d'un régulateur PID.

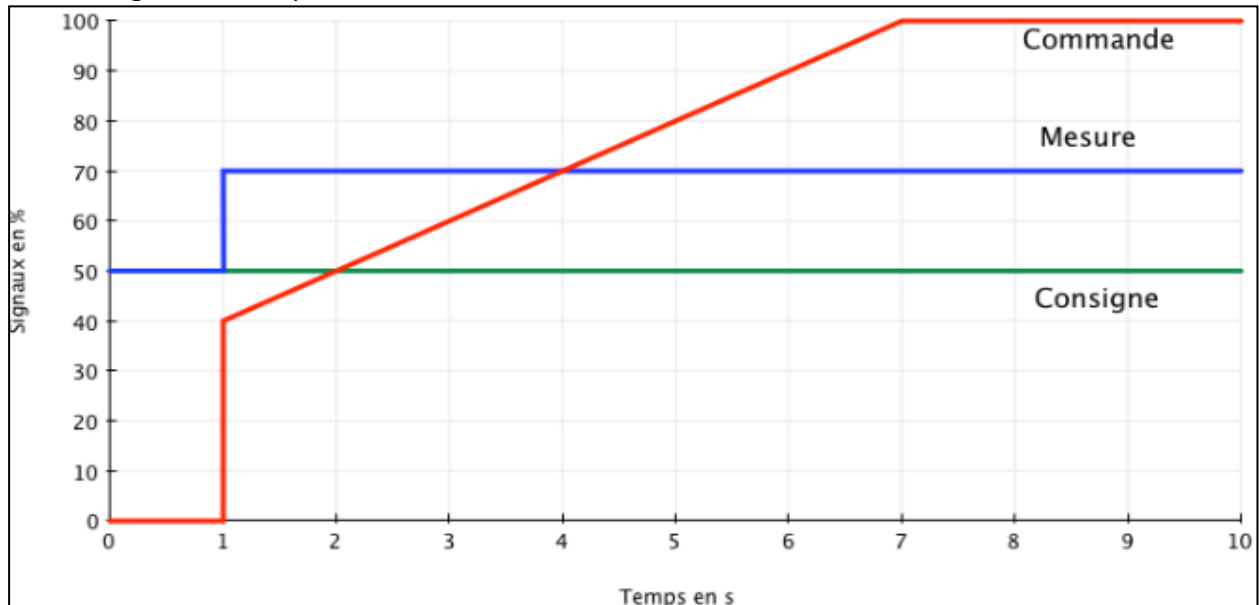
$$Y(t) = K_p \cdot \left(1 + \frac{T_d}{T_i}\right) \cdot \varepsilon + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon \cdot dt + T_d \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Quelle est la structure du régulateur (série, parallèle, mixte).

27- Pour annuler l'erreur statique, il faut ajouter une action intégrale (Vrai ou Faux).

28- Dans une boucle de régulation avec régulateur PID, plus T_d est grand, plus le dépassement sera important en boucle fermée (vrai ou faux).

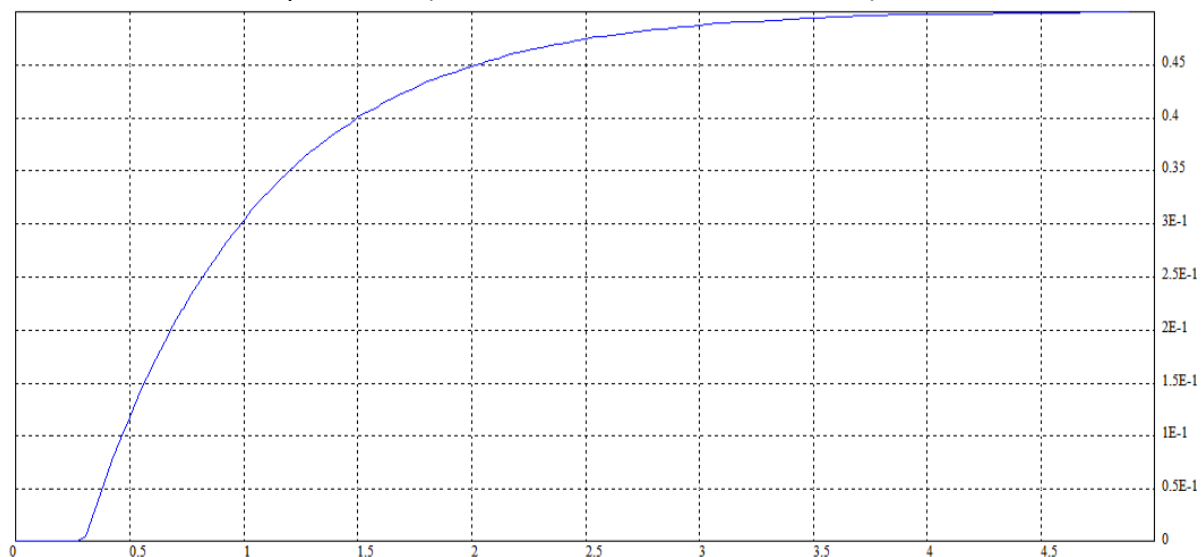
29- On observe la sortie d'un régulateur en réponse à un échelon de mesure. Le régulateur est parallèle. Quelle est la valeur de T_i ? Donner la valeur en secondes.



30- Plus T_i est grand, plus le système est stable (vrai / faux)

31- Sur la sortie d'un procédé en boucle fermée, on remarque qu'il présente des oscillations. Sur quel paramètre du régulateur doit-on agir et comment le modifier.

32- On donne la réponse indicielle d'un procédé en boucle ouverte pour un échelon d'entrée d'amplitude 1 : (échelle des abscisses en seconde).



- a) Quel est le type de procédé étudié ?
- b) A partir de la réponse indicielle, Identifier la fonction de transfert $(G(p) = G_s \cdot \frac{e^{-Rp}}{1+Tp})$ du système en utilisant la méthode de brodia.
- c) Calculer le rapport $\frac{T}{R}$ et déduire le type de régulation qui convient avec le système.
- d) Calculer les paramètres du régulateur sachant qu'il possède une structure série.

33- Sur la sortie d'un procédé en boucle fermée, on remarque qu'il présente un retard.

Sur quel paramètre du régulateur doit-on agir et comment le modifier.

34- La maintenance préventive, se fait (avant /après/pendant) la panne ?

35- La maintenance corrective, se fait (avant /après/pendant) la panne ?

2- Bibliographie

- [1] Michel Grout, Patrick Salaun, « **Instrumentation industrielle - 4e édition** », Dunod –
Septembre 2020
- [2] Georges Asch, Loïc Blum, Jacques Fouletier, Pierre Desgoutte, Bernard Créton et al.,
« **Les capteurs en instrumentation industrielle - 8e édition**», Dunod -Novembre 2017
- [3] Patrick Prouvost, « **Instrumentation et régulation en 30 fiches**», Dunod - 2015
- [4] Simon Moreno, Edmond Peulot, « **La pneumatique dans les systèmes automatisés de
production**», Delagrave édition – Octobre 2001
- [5]<http://dptgeii.iutsd.univ-lorraine.fr/cours/lpsarii/IM.html>
- [6]<https://www.ifptraining.fr/>
- [7]<http://gatt.fr/CIRA/cours.php>
- [8]http://mbaudin.free.fr/maintenance/methode_diagnostic_de_panne.pdf