

**TOUT EN  
FICHES**

**Patrick Prouvost**

Agrégé en génie mécanique  
Professeur en BTS  
au lycée Georges Brière  
de Reims

L'ESSENTIEL DE

# INTRUMENTATION ET RÉGULATION

**BTS**

**DUNOD**

Direction artistique : Élisabeth Hébert

Illustration de couverture : AdobeStock\_45774440

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2010, 2015, 2021

11, rue Paul Bert 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-082233-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>Fiche 1</b>	Contrôle des procédés industriels	1
<b>Fiche 2</b>	Représentations d'un procédé	7
<b>Fiche 3</b>	Grandeurs physiques et unités	16
<b>Fiche 4</b>	Métrologie	22
<b>Fiche 5</b>	Caractéristiques métrologiques des instruments de mesure	30
<b>Fiche 6</b>	Capteur-transmetteur	36
<b>Fiche 7</b>	Environnement industriel des instruments	45
<b>Fiche 8</b>	Résistances thermoélectriques ou RTD	54
<b>Fiche 9</b>	Thermocouples	63
<b>Fiche 10</b>	Hydrostatique et hydrodynamique	73
<b>Fiche 11</b>	Capteurs de pression	78
<b>Fiche 12</b>	Mesures de niveau hydrostatiques	85
<b>Fiche 13</b>	Mesures de niveau intrusives	90
<b>Fiche 14</b>	Mesures de niveau non intrusives	96
<b>Fiche 15</b>	Mesures de débit par pression différentielle	102
<b>Fiche 16</b>	Mesures de débit par méthode directe	108
<b>Fiche 17</b>	Vannes de régulation	115
<b>Fiche 18</b>	Positionneurs	125
<b>Fiche 19</b>	Boucle de régulation	132
<b>Fiche 20</b>	Caractéristiques des procédés	137
<b>Fiche 21</b>	Qualités d'une régulation	143
<b>Fiche 22</b>	Régulateur PID	150
<b>Fiche 23</b>	Méthodes de réglage PID	159
<b>Fiche 24</b>	Méthode du modèle de référence	163
<b>Fiche 25</b>	Réglage : méthode du règleur	168
<b>Fiche 26</b>	Réglage de Ziegler et Nichols en boucle fermée	170
<b>Fiche 27</b>	Méthode de Broïda-Dindeleux, procédés autoréglants	173
<b>Fiche 28</b>	Méthode de Broïda-Dindeleux, procédés intégrateurs	178
<b>Fiche 29</b>	Régulations PID complexes 1	180
<b>Fiche 30</b>	Régulations PID complexes 2	184



## 1. Procédé et processus industriels

### ■ Entreprise industrielle

Une *entreprise industrielle* est une unité économique de production ayant pour objet la transformation de matières premières ou l'exploitation de sources d'énergie.

Les produits réalisés doivent être conformes à un cahier des charges stipulant les qualités exigées par le client ou établies par la réglementation.

Elle est organisée en trois activités étroitement liées : production, maintenance et gestion technique et financière.

Cet ouvrage se limite ici au pôle production par les notions de procédé industriel et de processus industriel, essentielles pour aborder le contrôle industriel.

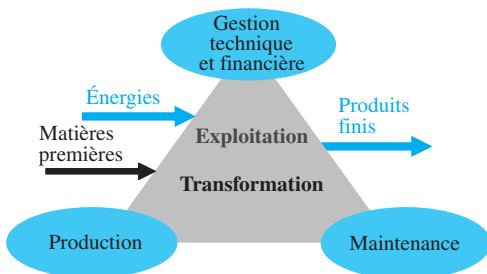


Figure 1.1 Entreprise industrielle

### EXEMPLE D'UN MANUFACTURIER DE PNEUMATIQUES POUR UN CLIENT, CONSTRUCTEUR AUTOMOBILE

Conformité à la demande du client au sujet de la forme des sculptures, du coefficient de frottement, des indices de charge et de vitesse, et à la conformité de réglementation dimensionnelle, comme la profondeur minimale des sculptures (article R314-1 du Code de la route).

### ■ Procédé industriel

#### EXEMPLE

Pour réaliser un plat culinaire, et le réussir, on suit une recette qui indique les ingrédients et leurs quantités, mais également les ustensiles nécessaires, les précautions à prendre, l'ordre et les temps à respecter lors du mélange, de la cuisson ou du refroidissement.

L'analogie avec ce cas pratique et une production industrielle est immédiate : un ***procédé industriel*** est la méthode à suivre pour élaborer un produit conforme au cahier des charges, comprenant un texte explicite accompagné de schémas détaillés. Comme dans une recette de cuisine, on y indique les matières premières, les moyens matériels nécessaires, les différentes étapes, et les conditions telles que température ou humidité à respecter dans le but d'obtenir le produit final. C'est le livre du procédé, ou « *process data book* », qui contient cette méthode, essentielle à l'entreprise industrielle, tenue très secrète comme le sont les recettes des grands parfumeurs.

Le terme anglais « ***process*** » désigne aussi bien le procédé que le processus, et c'est aussi pourquoi le terme générique ***procédé*** est souvent employé en pratique.

## Processus industriel

Le ***processus industriel*** comprend l'installation de production avec tout le matériel nécessaire à la transformation des matières premières, et l'ensemble descriptif de toutes les opérations détaillées pour aboutir au produit fini selon un procédé fixé.

### EXEMPLE D'UN FOUR DE TRAITEMENT THERMIQUE DE PIÈCES MÉTALLIQUES

L'installation de production comprend le four, les parties concernant le chauffage et le refroidissement, ainsi que les matériels permettant la prise et le dépôt des pièces à traiter.

L'ensemble descriptif précise : l'ouverture de la porte, la mise en place des pièces dans le four, la fermeture de la porte, la vitesse de montée en température, la température du palier et la durée de son maintien, la vitesse du refroidissement forcé, la température finale et la durée de son maintien, l'arrêt du refroidissement, l'ouverture de la porte, puis le retrait des pièces.

La partie matérielle du processus est représentée par un schéma normalisé (PCF ou PFS, TI ou PID : cf. [fiche 2](#)), véritable outil universel de communication entre les différents services de conception, d'installation, de fabrication, d'instrumentation et d'automatique.



L'instrumentation permettant *l'action* concerne les organes de réglage tels que les vannes régulatrices, les ventilateurs, les pompes, les résistances de puissance électrique, et les pré-actionneurs comme les convertisseurs de signaux, les positionneurs, et les variateurs de vitesse.

Toutes les cartes d'entrées et de sorties des régulateurs et des automates programmables industriels (API) font partie de l'instrumentation.

### Régulation

La *régulation* constitue l'étape, délicate, de la *réflexion* du contrôle industriel puisqu'elle doit garantir un fonctionnement du processus conforme à l'objectif fixé. Or, lorsqu'un écart par rapport à cet objectif survient, la régulation doit annuler ou amoindrir cet écart en suivant les lois d'évolution du procédé définies par le concepteur.

La régulation sans instrumentation n'est pas envisageable, mais l'instrumentation sans régulation est possible.

## 3. Hiérarchie des systèmes de contrôle

Un système de contrôle performant doit garantir la qualité du produit ou du service, mais également des économies d'énergies et de matières premières et de semi-finies, sans négliger la sécurité du personnel et des installations.

La gestion du risque de tout processus industriel induit une organisation des *systèmes de contrôle hiérarchisés* en trois niveaux d'intervention (figure 1.3).

*Niveau 1* : ce niveau de système assure la *conduite* du processus, continu ou discontinu, en fonctionnement normal et comprend l'instrumentation et la régulation ou l'automatisme.

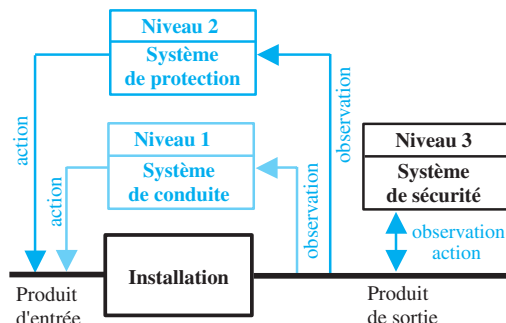


Figure 1.3 Hiérarchie des systèmes de contrôle



**Niveau 2** : ce niveau assure la *protection* du processus selon une fonction discontinue à partir d'informations prédéfinies de dépassement de seuils critiques pour le processus. L'information de dépassement peut être donnée par un détecteur (information binaire) ou par un capteur (information continue), mais l'instrumentation est indépendante de celle du niveau 1. Les actionneurs sont généralement de type tout ou rien (électrovanne ou vérin).

Le niveau 1 redevient fonctionnel lorsque le niveau 2 le permet, après une autorisation automatique ou validée par l'opérateur.

**Niveau 3** : c'est le niveau de sécurité le plus haut en cas de défaillance d'un ou plusieurs éléments du processus. Les dispositifs, indépendants des niveaux 1 et 2, doivent pouvoir se déclencher sans énergie auxiliaire comme les soupapes de sécurité, les disques de rupture, ou les fusibles thermiques.

Une soupape de sûreté de pression est tarée pour se déclencher à une valeur définie, et se remet en position initiale lorsque la pression revient en dessous de cette pression de tarage. Le niveau 1 est donc de nouveau opérationnel si le niveau 2 l'est aussi. En revanche, un disque de rupture cède sous la pression prévue et il faut installer un nouveau disque avant de revenir au niveau 1.

## EXERCICE 1 Échangeur thermique

Description du processus : l'eau d'alimentation d'un ballon de chaudière industrielle doit être préchauffée à une température de 85 °C. Dans ce but, de l'eau froide est chauffée dans l'échangeur thermique où circule de la vapeur provenant, par économie, du dégagement exothermique d'un réacteur (figure 1.4).

La consigne du régulateur de température (TC) est réglée à 85 °C ± 2 °C.

Le seuil haut (TSH) est configuré dans l'automate à 96 °C.

Le seuil bas (TSL) est configuré dans l'automate à 60 °C.

Le tarage de la soupape de sûreté thermique est de 110 °C ± 5 °C.

La pompe a un régime normal de fonctionnement, et un autre régime, moitié du débit normal, piloté à distance par l'automate. L'électrovanne est normalement ouverte, mais fermée sur ordre de l'automate.

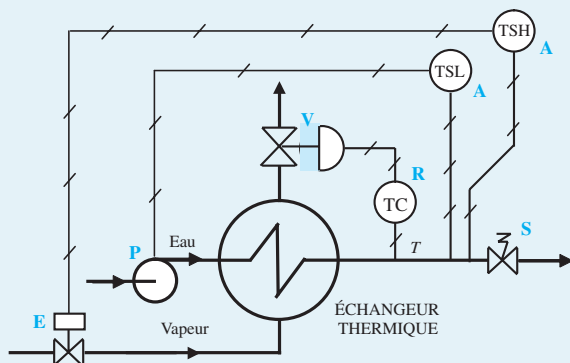


Schéma PCF (cf. fiche 2)

**Instruments**

- A : automate (API)
- E : électrovanne
- P : pompe à 2 débits
- R : régulateur TC
- S : soupape thermique
- V : vanne régulatrice

Figure 1.4 Échangeur thermique

1. Ce procédé est-il de type batch ou continu ?
2. Préciser les instruments intervenant pour chaque niveau hiérarchique d'intervention de ce processus.
3. Indiquer le niveau actif (1, 2 ou 3) en fonction de la température T.

<b>T (°C)</b>	78	107	98	91	55
<b>Niveau 1, 2 ou 3</b>					

**Solution**

1. C'est un processus continu puisqu'il n'y a pas de système de démarrage et d'arrêt, permettant un fonctionnement cyclique. En outre, l'alimentation en eau d'un ballon de chaudière ne peut correspondre à un processus batch car une chaudière industrielle est une unité dont le démarrage est long et complexe.

2. Niveau 1 R commande V en continu

Niveau 2 A (TSL) baisse le débit de P, ou A (TSH) ferme E

Niveau 3 S s'ouvre

<b>3. T (°C)</b>	78	107	98	91	55
<b>Niveau 1, 2 ou 3</b>	1	3	2	1	2

## 1. Représentations normalisées

Il existe plusieurs *représentations normalisées* fournissant un outil universel de communication entre les diverses instances concernées par la conception, la fabrication et la mise en œuvre d'équipements de régulation, de mesure et d'automatisme des procédés industriels. Ces différentes représentations sont :

- le schéma fonctionnel spécifique à l'analyse du procédé ;
- les plans de circulation de fluides et d'instrumentation qui décrivent le processus ;
- le schéma d'interconnexion décrivant les raccordements entre tous les instruments du processus.

Une représentation libre et personnelle d'une installation industrielle peut engendrer incompréhensions ou confusions.

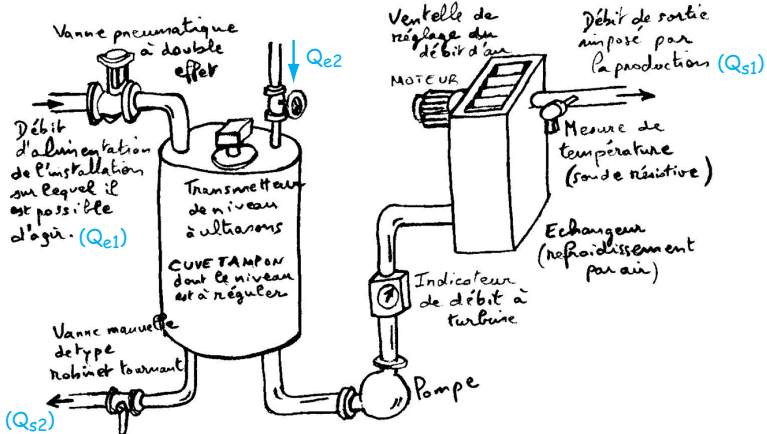


Figure 2.1 Représentation libre d'un procédé industriel : cuve de stockage

## 2. Schéma fonctionnel

Pour contrôler un procédé, un travail d'analyse est indispensable pour recenser les grandeurs physiques à maîtriser, et celles ayant une influence sur le procédé. Un *schéma fonctionnel* est une représentation de la synthèse de cette analyse décrivant les fonctions entre ces grandeurs physiques, sans aucune notion de matériel.

### Terminologie employée

- **Grandeur réglée** : grandeur à maîtriser.
- **Grandeur incidente** : grandeur ayant une influence sur la grandeur réglée.
- **Grandeur réglante** : grandeur incidente choisie pour agir sur le procédé afin de modifier la grandeur réglée par des critères techniques ou économiques.
- **Grandeur perturbatrice** : toute grandeur incidente autre qu'une grandeur réglante.

### Schéma fonctionnel simplifié

Dans un schéma fonctionnel simplifié, toutes les grandeurs sont représentées par des flèches, à gauche pour les grandeurs incidentes et à droite pour les grandeurs à maîtriser. La fonction reliant ces grandeurs est inscrite dans un rectangle.

#### EXEMPLE

Schéma fonctionnel simplifié de la cuve de stockage vue en figure 2.1.



Figure 2.2 Schéma fonctionnel simplifié n° 1

Pour distinguer la grandeur réglante des grandeurs perturbatrices, le schéma fonctionnel peut prendre la forme montrée en figure 2.2.

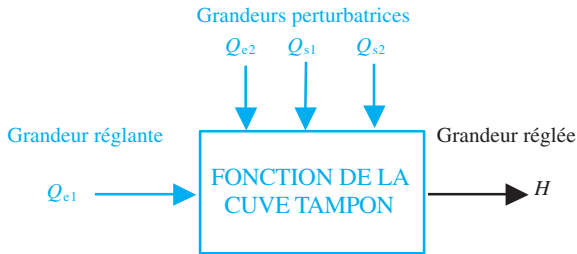


Figure 2.3 Schéma fonctionnel simplifié n° 2

### LIMITE DU SCHÉMA FONCTIONNEL SIMPLIFIÉ

Le schéma fonctionnel simplifié ne met pas en évidence l'influence de chaque grandeur incidente sur la grandeur réglée. Par exemple, on ne montre pas qu'une augmentation du débit  $Q_{e1}$  se traduira par une augmentation du niveau  $H$ , ni qu'une augmentation du débit  $Q_{s1}$  se traduira par une diminution du niveau  $H$ .

### Schéma fonctionnel détaillé

Le procédé étudié est décomposé en plusieurs procédés élémentaires qui représentent l'influence de chacune des grandeurs incidentes sur la grandeur réglée.

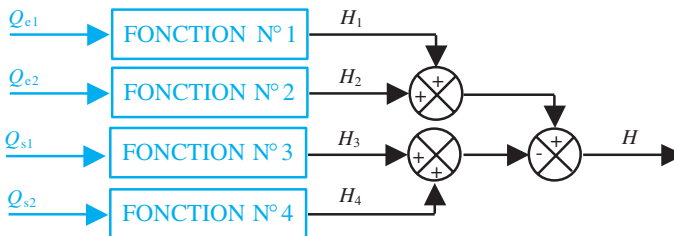


Figure 2.4 Schéma fonctionnel détaillé de la cuve de stockage

Dans la figure 2.4, la fonction n° 1 a comme grandeur d'entrée  $Q_{e1}$  et comme grandeur de sortie  $H_1$ , indiquant l'influence du débit  $Q_{e1}$  sur le niveau  $H$ .

Le niveau  $H$  est « le résultat » de la somme algébrique des niveaux  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ ,  $H_4$ . Le sens d'action de chaque grandeur incidente sur la grandeur à maîtriser est indiqué, et la lecture de ce schéma donne :  $H = (H_1 + H_2) - (H_3 + H_4)$ .

Lors de l'étude approfondie d'une régulation, les fonctions sont exprimées mathématiquement avec la variable  $p$  de la transformée de Laplace : le rapport de la fonction de sortie  $S(p)$  sur la fonction  $E(p)$ . Ce rapport se note fonction de transfert.

### 3. Norme de représentation symbolique

#### ■ Norme Afnor E 04-203

La norme française expérimentale, Afnor E 04-203 publiée en août 1987, est titrée :

« Fonctions de régulation, de mesure et d'automatisme des processus industriels *Représentation symbolique* »

Elle a des correspondances internationales (ISO 3511/1-1977), allemande (DIN 19 227 blatt 1-1973), ou encore américaine (ISA-S5.1-1984) traitant du même sujet.

Elle est articulée en quatre parties :

- E 04-203-1 : Principes de base ;
- E 04-203-2 : Capteurs, signaux, dispositifs réglants ;
- E 04-203-3 : Transducteurs et dispositifs de traitement des signaux ;
- E 04-203-4 : Symboles détaillés complémentaires pour les schémas d'interconnexion d'instruments.

#### ■ Extrait des parties 2 et 3

##### OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION

La présente norme expérimentale présente la symbolisation des dispositifs de traitement des signaux émis par un capteur ou reçus par un organe de réglage.

Elle comporte des symboles destinés à la communication des fonctions de mesure, de régulation et d'automatisme entre spécialistes des instruments et autres techniciens impliqués dans la conception des réservoirs, des conduites, des machines tournantes... de leur disposition et de leur mise en œuvre.

Les symboles sont utilisés pour la représentation de l'instrumentation sur les schémas suivants :

- plan de Circulation des Fluides (PCF) ou *Process Flow Sheet* (PFS) ;
- plan de Tuyauterie et d'Instrumentation (TI) ou *Piping and Instrument Diagram* (PID)

La présentation de cette norme a été pensée, d'une part pour répondre à la pratique internationale (symboles ISA présentés en Forme 1, éventuellement complétée) et, d'autre part, pour pouvoir faire le lien avec la normalisation internationale ou nationale existante ou différente le cas échéant (symboles représentés en Forme 2).

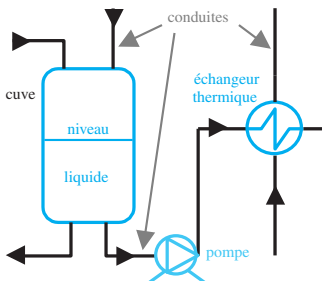
Il est conseillé d'utiliser les symboles d'une même forme sur un même schéma. L'exécution des schémas s'effectue conformément aux normes NF E 04-520, NF E 04-521...

## 4. Plan de circulation des fluides

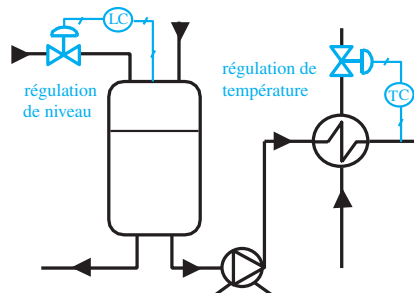
Le **Plan de Circulation des Fluides** (PCF, ou bien PFS : *Process Flow Sheet*) est un schéma de représentation symbolique avec :

- les cuves, les réacteurs chimiques, les échangeurs thermiques, les colonnes à distiller ;
- les conduites, représentées par un trait continu épais ;
- la nature, gaz ou liquide, et le sens d'écoulement des fluides ;
- les organes de puissance tels que pompes, agitateurs, résistances de chauffage ;
- l'indication des grandeurs physiques utiles : débit, pression, température...

Le plan PCF peut aussi faire apparaître les boucles de régulation sans préciser le détail des instruments ou des stratégies de régulation complexes (figure 2.6).



**Figure 2.5** PCF de la figure 2.1



**Figure 2.6** Plan PCF, régulations incluses

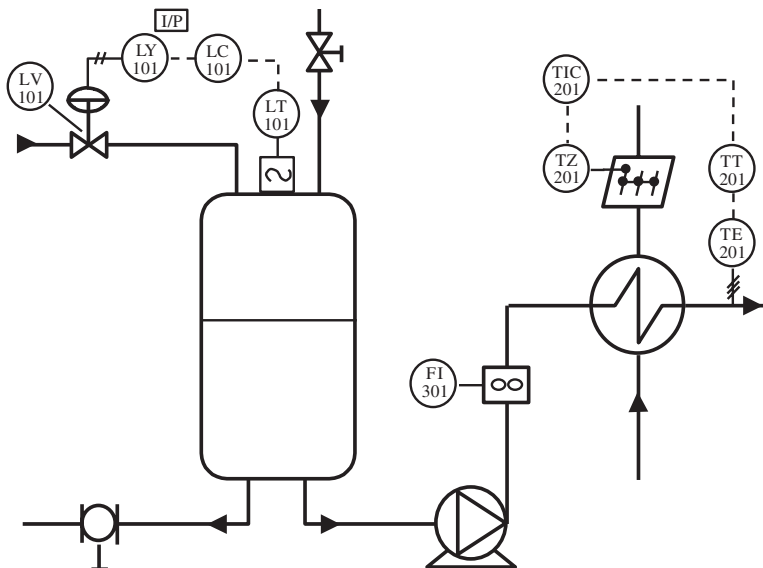
## 5. Plan de tuyauterie et d'instrumentation

### Présentation

Le **plan de Tuyauterie et d'Instrumentation** (TI, ou bien PID : *Piping and Instrument Diagram*) complète le plan de circulation des fluides en lui ajoutant :

- les appareils de mesure ; capteurs, transmetteurs, indicateurs ;
- les appareils de contrôle ; régulateurs et opérateurs de calcul ;
- les actionneurs comme les vannes de réglage ;
- les liaisons d'information entre ces appareils.

#### EXEMPLE



**Figure 2.7** Plan de tuyauterie et d'instrumentation du procédé de la figure 2.1

Les instruments 101 forment une boucle de régulation de niveau, et ceux notés 201 une boucle de régulation de température (cf. fiche 19). L'instrument 301 est un indicateur de débit.



## Principes de base

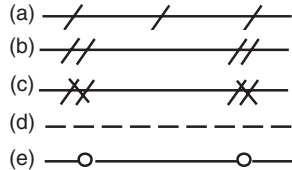
**Point de mesure** : le symbole est un trait fin relié à une ligne (canalisation) ou au contour d'une unité du procédé.



**Instrument** : le symbole comprend un cercle dessiné en trait fin d'une dizaine de millimètres de diamètre et d'un codet indiquant la propriété mesurée et la fonction (voir [tableau extrait de la norme](#)).



**Signaux** : (a) le symbole général est une liaison avec traits fins inclinés à environ 60°. La liaison matérialise le transfert d'information mais pas le support matériel. Des symboles particuliers à la nature de la liaison sont décrits dans la partie 2 de la norme, par exemple : signal pneumatique analogique (b) ; signal pneumatique binaire (c) ; signal électrique analogique (d) ; bus numérique (e)



## Codets

### EXTRAIT DE LA NORME E 04-203-1 CONCERNANT LES CODETS

**1.5.1. Codets d'instrumentation** – La fonction de l'instrumentation doit être identifiée par les codets du tableau suivant (tableau 2.1) inscrits à l'intérieur du cercle symbolisant l'instrument : ces cercles doivent être inscrits selon les règles suivantes :

1.5.1.1. Le premier codet désignant la variable mesurée ou initiale est choisi conformément aux signifiants de la colonne 2. S'il est nécessaire de le compléter, lui adjoindre un codet correspondant aux signifiants de la colonne 3.

1.5.1.2. Les codets supplémentaires seront choisis parmi les signifiants de la colonne 4.

1.5.1.3. Lorsque plusieurs codets sont ajoutés, ils doivent être placés l'un à la suite de l'autre dans l'ordre I, R, C, T, Q, S, Z, A (cela ne s'applique pas aux codets correspondant à la colonne 3).

**1.5.2. Codets qualitatifs** – Lorsqu'il est nécessaire d'indiquer Haut(e) ou Bas (se), Très Haut(e) ou Très Bas (se), les codets qualificatifs H ou L, HH ou LL... peuvent être associés au symbole de l'instrument.

**EXEMPLES :** codets établis à partir du tableau 2.1, d'une sonde de température et d'un enregistreur d'une proportion de débit.

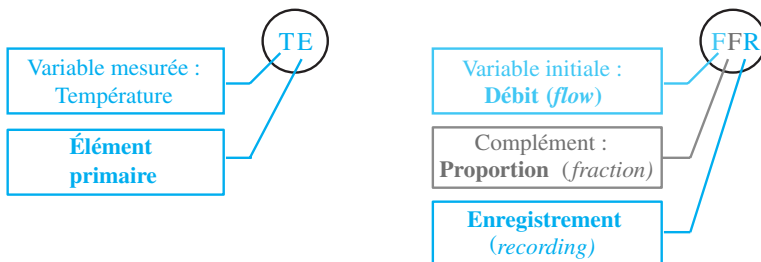




Tableau 2.1. Codets servant à identifier les fonctions des instruments. Extrait du tableau de la norme

Codet	Signifiant		Signifiant suivant	
	Variable mesurée ou variable initiale	Complément	Affichage	Action
1	2	3	4	
A	Analyse		Alarme	
B	Combustion		État	
C	Conductivité			Régulation
D	Masse volumique	Différence		
E	Tension		Élément primaire	
F	Débit	Proportion		
H	Commande manuelle			
I	Courant		Indication	
L	Niveau		Signalisation	
			Lumineuse	
P	Pression		Point d'essai	
S	Vitesse	Sécurité		Commutation
T	Température			Transmission
Z	Position, longueur	Coordonnée		Actionneur

**EXEMPLES DE CODETS :**

Transmetteur indicateur  
d'humidité (*moisture*) 

Commande manuelle de  
régulation avec indicateur 

Alarme très haute  
sur un niveau



ou



HH

**EXERCICE 1 Dix codets**

1. Que signifient les codets suivants : TE, TAL, FIZ, PDT, AIC ?
2. Donner les codets des instruments suivants : un indicateur de différence de température, un thermostat, un variateur de vitesse de pompe, une sécurité de débit très bas, un transmetteur de niveau.

**Solution**

1. TE : élément primaire de température ou sonde de température ; TAL : alarme basse de température ; FIZ : actionneur de débit avec indicateur ; PDT : transmetteur de pression différentielle ; AIC : régulateur d'analyse avec indicateur.
2. Indicateur de différence de température : TDI ; thermostat : TS ; variateur de vitesse de pompe : SZ ; sécurité de débit très bas : FSLL ; transmetteur de niveau : LT.

Les hommes ont montré, notamment à travers leurs échanges commerciaux, leur volonté d'harmoniser leurs références dimensionnelles pour que leurs transactions n'aient aucune ambiguïté.

## 1. Vocabulaire international

La norme NF X 02-001 est à la base des définitions suivantes. La normalisation française tient compte dans l'élaboration de ses normes d'une indispensable approche européenne, voire mondiale.

### ■ Grandeur physique

On appelle *grandeur physique* tout attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.

Les grandeurs qui peuvent se comparer mutuellement forment des ensembles. Les niveaux, les hauteurs, les diamètres, les épaisseurs, les longueurs d'onde par exemple font partie d'un même ensemble.

Le symbole d'une telle grandeur est écrit en italique : une hauteur  $h$ .

### ■ Unité de mesure

Dans un ensemble de grandeurs, on appelle *unité de mesure* une grandeur particulière choisie comme grandeur de référence.

Le symbole d'une unité est écrit en caractère droit, pour le mètre : m.

### ■ Valeur numérique d'une grandeur physique

La valeur d'une grandeur appartenant à un ensemble donné de grandeurs peut être exprimée par le produit de l'unité par un nombre. Ce nombre est appelé la *valeur numérique* de la grandeur exprimée avec cette unité.

La valeur numérique est la mesure de la grandeur considérée et elle n'a de sens que si l'on indique l'unité choisie. À savoir que le produit de la valeur numérique par l'unité est toujours indépendant de l'unité.

**EXEMPLE**

La pression atmosphérique normale est :  $p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$ .  $p_0$  est le symbole de la grandeur physique : pression.

101 325 est la valeur numérique de la pression exprimée en pascal, et Pa est le symbole de l'unité de longueur : le pascal.

En changeant d'unité, le météorologue en annonçant une pression atmosphérique en hectopascal modifie la valeur numérique de cette grandeur physique :  $p_0 = 1\,013,25 \text{ hPa}$ .

*Remarques* : le symbole du pascal n'a pas de majuscule car c'est un nom commun provenant de la transformation du nom de Blaise Pascal. Attention à l'exception à la règle grammaticale du pluriel des noms en « al » ; on ne dit pas « des pascaux » !

**Grandeurs de base ou fondamentales**

Les grandeurs physiques sont liées entre elles par des équations exprimant des lois physiques. Il est donc possible de décrire le monde physique par un système de grandeurs et d'équations entre ces grandeurs.

Certaines grandeurs sont considérées comme indépendantes les unes des autres : ce sont les **grandeurs de base** ou **fondamentales** à partir desquelles on peut définir d'autres grandeurs au moyen d'équations.

Les grandeurs de base de la norme ISO 31 (série de normes NF X 02-200) sont au nombre de 7 : longueur, masse, temps, courant électrique, température, quantité de matière et intensité lumineuse.

**Grandeur dérivée**

Une **grandeur dérivée** est une grandeur définie, dans un système de grandeurs, par une équation en fonction de grandeurs de base.

**EXEMPLE**

Le débit-volume  $q_v$  est une grandeur dérivée définie comme le quotient du volume  $v$  par un temps  $t$ . Le volume  $v$  est aussi une grandeur dérivée puisqu'il s'exprime en  $\text{m}^3$ . L'unité du débit-volume  $q_v$  est donc  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

**2. Système international d'unités**

Le choix d'un système d'unités est *a priori* arbitraire ; cependant, pour un système donné de grandeurs et d'équations, il est préférable de choisir un système

d'unités dans lequel les équations entre valeurs numériques ont exactement la même forme que les équations entre grandeurs.

Un système d'unités défini de cette manière est dit cohérent par rapport au système de grandeurs et d'équations considéré. Le **Système International d'unités**, appelé SI, est un système cohérent d'unités, adopté par la 11<sup>e</sup> Conférence générale des poids et mesures (CGPM) en 1960.

Le SI comprend des unités de base et des unités dérivées, y compris les unités supplémentaires.

Tableau 3.1

Grandeur physique	Unité de base	Symbole de l'unité	Dimension de base
Longueur	mètre	m	L
Masse	kilogramme	kg	M
Temps	seconde	s	T
Courant électrique	ampère	A	I
Température thermodynamique	kelvin	K	$\Theta$
Quantité de matière	mole	mol	N
Intensité lumineuse	candela	cd	J

La loi du 4 juillet 1837 rend obligatoire le « système métrique » en France, et le décret n° 61-501 du 3 mai 1961 modifié (pris en application de directives européennes) définit comme unités légales les unités du Système International, et définit chacune de ces unités.

### Unités dérivées

Les **unités dérivées** du SI sont généralement exprimées en fonction des unités de base. Certaines unités dérivées possèdent un nom et un symbole spécial. Celles-ci peuvent à leur tour être utilisées pour exprimer d'autres unités dérivées.

#### EXEMPLE

La pression est le quotient de la force par l'aire. Le pascal (Pa), unité de pression, correspond à un newton (N) par mètre carré ( $m^2$ ). On écrit :  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot m^{-2}$ . Le newton est aussi une unité dérivée.

## LIEN ENTRE UNITÉS SI ET CELLES EMPLOYÉES DANS D'AUTRES PAYS (UK, USA)

Les unités d'origine étrangère, notamment anglo-saxonne, sont interdites en France, mais il est souvent utile de les connaître car elles sont encore présentes dans de nombreux pays.

### EXEMPLE

Le psi (*pound-force per square inch*) est une unité de pression encore très utilisée dans le monde anglo-saxon. À la station-service, par exemple, le manomètre du compresseur d'air comprimé indique la pression sur deux échelles ; le bar et le psi. Le psi correspond à une pression engendrée par une force, développée par une masse de 1 livre anglaise (453,6 g), appliquée sur une superficie de 1 pouce (25,4 mm) au carré soit 645,16 mm<sup>2</sup>.

$$1 \text{ psi} = 1 \text{ lbf} \cdot \text{in}^{-2} \text{ (livre-force par pouce carré)} = 6\,894,76 \text{ Pa}$$

### Dimension

Les grandeurs  $A$  et  $B$  sont dites homogènes s'il existe un réel  $\alpha$  tel que  $A = \alpha \cdot B$ . Ces grandeurs ont alors même **dimension**.

À chaque grandeur de base du système ISO 31, on associe une dimension de base (tableau 3.1). Pour trouver la dimension d'une grandeur dérivée, on exprime la relation de cette grandeur en fonction de grandeurs de base. La dimension de la grandeur dérivée est un produit des dimensions des grandeurs de base.

### EXEMPLE

Pour obtenir la dimension d'une puissance  $P_h$  hydraulique, on exprime la relation de la puissance par le produit de grandeurs dérivées que sont ici la masse-volumique  $\rho$ , le débit-volume  $q_v$  et la pression  $p$ , qui elles-mêmes peuvent s'exprimer par des grandeurs de base :

$$\dim(P_h) = \dim(\rho \cdot q_v \cdot p) = \dim(\rho) \cdot \dim(q_v) \cdot \dim(p)$$

$$\dim(P_h) = \text{L}^2 \cdot \text{M} \cdot \text{T}^{-3}, \text{ signifiant que 1 watt (W) est égal à } 1 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$$

**EXERCICE 1 Mises au point**

1. Compléter le tableau suivant, sachant qu'une livre anglaise vaut 453,59237 g, qu'un pouce (inch) vaut 25,4 mm et qu'un gallon (USA) vaut 3,78541 L.

Nom Symbole	Grandeur Dimension	Conversion en unités de base
gallon (USA) par minute gal (USA) · min <sup>-1</sup>		1 gal (USA) · min <sup>-1</sup> = cm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>
inch of water inH <sub>2</sub> O	pression	1 inH <sub>2</sub> O = Pa
livre-force par pouce carré lbf · in <sup>-2</sup> ou psi		1 lbf · in <sup>-2</sup> = Pa

2. Vrai ou faux ? Pourquoi ?

Vrai	Faux
	Une constante ne possède jamais d'unité.
	La densité est souvent exprimée en g · cm <sup>-3</sup> , en kg · m <sup>-3</sup> ou en g · L <sup>-1</sup> .
	La puissance d'un moteur électrique est P = 750 W ou P = 750 m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> .
	Le diamètre interne d'une vanne de régulation est une grandeur physique de base.
	L'eau chaude est une grandeur physique de base.
	Une pression peut s'exprimer en colonne d'eau ou même en colonne de mercure.

**Solution**

1. Compléter le tableau suivant :

Nom Symbole	Grandeur Dimension	Conversion en unités de base
gallon (USA) par minute gal (USA) · min <sup>-1</sup>	débit-volume L <sup>3</sup> · T <sup>-1</sup>	1 gal (USA) · min <sup>-1</sup> = 63,09 cm <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup>
inch of water inH <sub>2</sub> O	pression L <sup>-1</sup> · M · T <sup>-2</sup>	1 inH <sub>2</sub> O = 2,49 × 10 <sup>2</sup> Pa
livre-force par pouce carré lbf · in <sup>-2</sup> ou psi	pression L <sup>-1</sup> · M · T <sup>-2</sup>	1 lbf · in <sup>-2</sup> = 6 894,76 Pa



## 2. Vrai ou faux ? Pourquoi ?

- Une constante ne possède jamais d'unité.

**Faux** : certaines constantes sont sans unité comme le nombre  $\pi$ , et d'autres en sont munies comme la constante molaire des gaz  $R$  qui s'exprime en  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .  
Information :  $R = 8,314510 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

- La densité est souvent exprimée en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  ou en  $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ .

**Faux** : les 3 unités proposées sont celles de masses volumiques. La densité est le quotient de deux masses volumiques, sa dimension est 1 et elle est donc sans unité.

- La puissance d'un moteur électrique est  $P = 750 \text{ W}$  ou  $P = 750 \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ .

**Vrai** :  $\dim(P) = \text{L}^2 \cdot \text{M} \cdot \text{T}^{-3}$  ou watt (W).

- Le diamètre interne d'une vanne de régulation est une grandeur physique de base.

**Vrai** : oui, le diamètre fait partie de la famille des longueurs.

- L'eau chaude est une grandeur physique de base.

**Faux** : l'eau chaude (ou froide) est un élément qui se caractérise par des grandeurs comme sa température, sa viscosité ou encore son  $\rho H$ .

- Une pression peut s'exprimer en colonne d'eau ou même en colonne de mercure.

**Faux** : une colonne d'eau (ou de mercure) est un objet et n'est donc pas une unité. La pression peut s'exprimer d'une façon conventionnelle en hauteur de colonne d'eau (ou de mercure). C'est un abus de langage. L'emploi du Pascal est recommandé.