

Patrick Prouvost

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

Instrumentation et régulation

en 30 fiches

2^e édition

DUNOD

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^{er} 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

5 rue Laromiguière, 75005 Paris

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-072691-2

ISSN 1778 4514

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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

Fiche 1	Contrôle des procédés industriels	1
Fiche 2	Représentations d'un procédé	6
Fiche 3	Grandeurs physiques et unités	13
Fiche 4	Métrologie	18
Fiche 5	Caractéristiques métrologiques des instruments de mesure	25
Fiche 6	Capteur-transmetteur	30
Fiche 7	Environnement industriel des instruments	38
Fiche 8	Résistances thermoélectriques ou RTD	45
Fiche 9	Thermocouples	52
Fiche 10	Hydrostatique et hydrodynamique	60
Fiche 11	Capteurs de pression	64
Fiche 12	Mesures de niveau hydrostatiques	70
Fiche 13	Mesures de niveau intrusives	74
Fiche 14	Mesures de niveau non intrusives	79
Fiche 15	Mesures de débit par pression différentielle	85
Fiche 16	Mesures de débit par méthode directe	90
Fiche 17	Vannes de régulation	96
Fiche 18	Positionneurs	104
Fiche 19	Boucle de régulation	110
Fiche 20	Caractéristiques des procédés	114
Fiche 21	Qualités d'une régulation	119
Fiche 22	Régulateur PID	125
Fiche 23	Méthodes de réglage PID	132
Fiche 24	Méthode du modèle de référence	135
Fiche 25	Réglage : méthode du régleur	139
Fiche 26	Réglage de Ziegler et Nichols en boucle fermée	141
Fiche 27	Méthode de Broïda-Dindeleux, procédés autoréglants	144
Fiche 28	Méthode de Broïda-Dindeleux, procédés intégrateurs	148
Fiche 29	Régulations PID complexes 1	150
Fiche 30	Régulations PID complexes 2	153

Préface

Créé en 1985, le baccalauréat professionnel a pour objectif une insertion du jeune dans la vie active. Depuis cette année, la généralisation du baccalauréat professionnel sur une durée de trois ans est mise en œuvre. La poursuite d'étude, pour ces élèves dans les sections de techniciens supérieurs, représentait 22 % en 2004 et ce taux va progresser rapidement. Pour autant les compétences terminales et savoirs associés en BTS restent identiques, dans ces conditions les méthodes pédagogiques doivent s'adapter à ce nouveau public.

La collection Express BTS des Éditions Dunod répond à ces contraintes d'évolution. En effet, les élèves, durant leur cursus en baccalauréat professionnel, travaillent sur des systèmes réels complexes à l'aide de fiches de manipulations, de procédures d'interventions pour la maintenance, le réglage, la mise en service des produits industriels. L'ouvrage de Patrick Prouvost s'intègre parfaitement dans cette démarche, il permet en particulier d'assurer une continuité pédagogique indispensable pour une réussite des étudiants en STS.

Dans le cadre de l'instrumentation et de la régulation, les modèles de connaissances sont difficiles à établir au niveau des STS. Il est beaucoup plus simple de travailler à l'aide d'identifications pratiques en s'appuyant sur des modèles de comportement.

En revanche, il est nécessaire de procéder avec méthode et précision. Sur ce point, le travail de Patrick Prouvost est remarquable, l'auteur place immédiatement le lecteur dans une réalité professionnelle précise. Ce livre, indispensable aux étudiants intéressés par la régulation, est composé de 30 fiches techniques qui synthétisent en trois ou quatre pages une description fidèle de chaque situation professionnelle.

L'auteur offre en complément des exercices incluant des solutions détaillées pour aider à l'assimilation de la problématique exposée.

Je félicite Patrick Prouvost pour la recherche des procédures, la qualité rédactionnelle des fiches. L'ouvrage constitue un référentiel qui va se révéler indispensable aux techniciens supérieurs de l'instrumentation et de la régulation.

Claude BERGMANN
Inspecteur général de l'Éducation nationale
en Sciences et Techniques industrielles
Paris, 2010

Contrôle des procédés industriels

I 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.

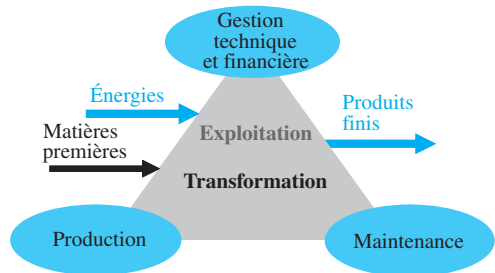


Figure 1.1 Entreprise industrielle

Exemple d'un fabricant 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, T1 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.

- **Procédé continu et discontinu**

Le procédé est **continu** lorsque le fonctionnement normal de l'installation n'est jamais interrompu pour fabriquer un produit.

Exemple de procédé continu

Un four de verrerie, fabriquant des bouteilles de champagne, contenant 300 tonnes de verre fondu à 1 500 °C fonctionne 24 h sur 24, et tous les jours de l'année. Son démarrage est en effet à la fois complexe et long et il n'est donc prévu de l'arrêter tous les 4 à 5 ans que pour le changement complet des briques réfractaires usées par le verre très abrasif.

Le procédé est *discontinu* ou « *batch* » quand le produit fini est obtenu par une fabrication de type continu mais en une quantité prédéterminée (lot ou *batch*) pour un cycle. C'est-à-dire que la même unité de fabrication est fréquemment (jusqu'à plusieurs fois par jour) amenée à changer de type de produit. Les procédés *batch* sont très répandus dans les industries des cosmétiques et pharmaceutiques.

II Contrôle industriel

Pour garantir les qualités et les quantités du produit fabriqué, il est nécessaire de déployer des moyens d'observation, de réflexion et d'action sur le procédé ; c'est le rôle du *contrôle industriel* englobant les domaines de l'instrumentation et de la régulation.

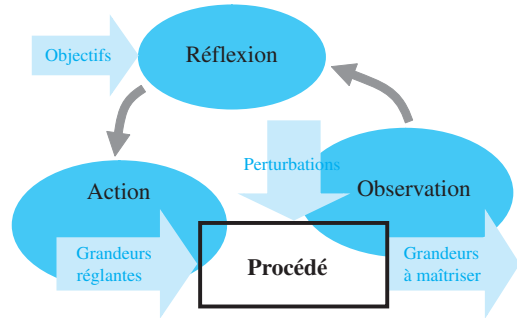


Figure 1.2 Contrôle industriel

- **Instrumentation**

L'*instrumentation* est un domaine comprenant les méthodes d'implantation, de réglages et d'exploitation de tous les appareils de mesure, de calcul et d'action nécessaires à la maîtrise du processus industriel, y compris les aspects de protection et de sécurité.

L'instrumentation liée à l'*observation* est assurée par les capteurs, transmetteurs et indicateurs qui fournissent les mesures continues et les détecteurs délivrant une information binaire.

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.

III 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 ou 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.

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).

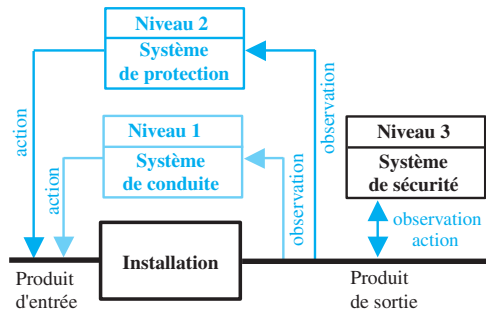


Figure 1.3
Hiérarchie des systèmes de contrôle

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.

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 $85\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le seuil haut (TSH) est configuré dans l'automate à $96\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le seuil bas (TSL) est configuré dans l'automate à $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le tarage de la soupape de sûreté thermique est de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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.

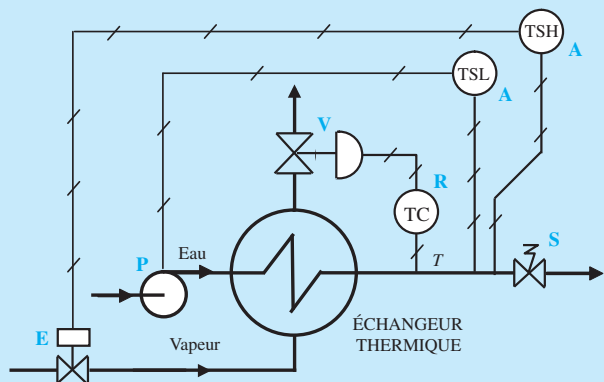


Schéma PCF (cf. fiche 2)

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 .

$T(^{\circ}\text{C})$	78	107	98	91	55
Niveau 1, 2 ou 3					

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				
3.	$T(^{\circ}\text{C})$	78	107	98	91	55
	Niveau 1, 2 ou 3	1	3	2	1	2

Représentations d'un procédé

I 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.

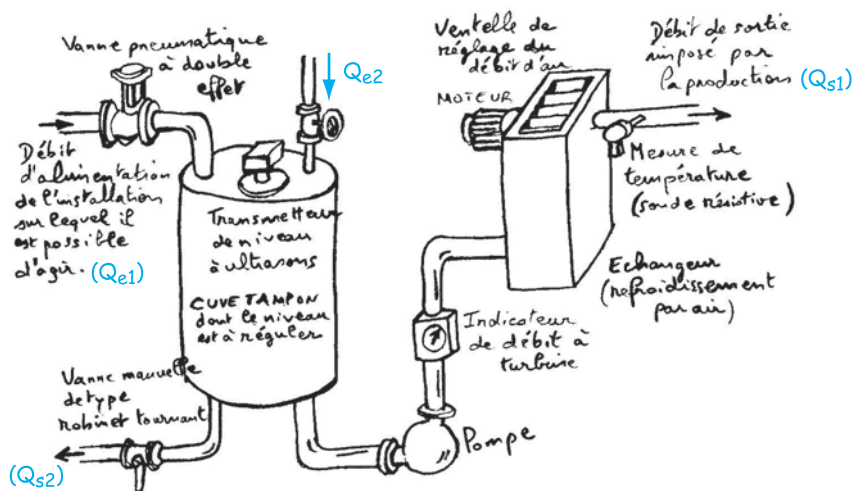


Figure 2.1 Représentation libre d'un procédé industriel : cuve de stockage

II 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.

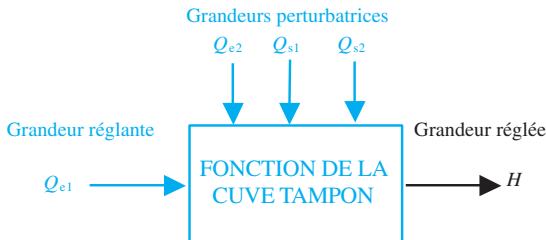


Figure 2.3 Schéma fonctionnel simplifié n°2

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.

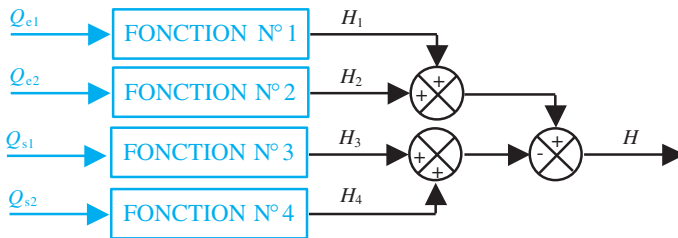


Figure 2.4 Schéma fonctionnel détaillé de la cuve de stockage

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 et appelées **fonctions de transfert**.

III 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...

IV 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).