

**Michel Grout
Patrick Salaün**

I NSTRUMENTATION INDUSTRIELLE

**Spécification et installation
des capteurs et vannes de régulation**

4^e édition

DUNOD

Illustrations intérieures : Alain et Ursula Bouteville-Sanders et Rachid Maraï

© Dunod, 2002, 2009, 2012, 2015, 2020 pour la nouvelle présentation

11, rue Paul Bert 92240 Malakoff

www.dunod.com

EAN 978-2-10-082047-4

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.

*Michel Grout est décédé au Havre le 6 juillet 2002 dans sa soixante-dixième année.
Il était retraité de Esso depuis 1990, après avoir exercé quarante années dans les métiers
de l'instrumentation à la raffinerie de Port-Jérôme, où il avait occupé successivement
des postes à l'entretien, aux projets et au technique.
Il a également déposé un brevet sur les systèmes de régulation sans fumée
des gaz brûlés aux torches hautes
qui lui a valu le prix du conseil supérieur des établissements classés
du Ministère de la qualité de la vie en 1975.
Michel Grout était unanimement reconnu comme un très grand expert
dans le domaine de l'instrumentation.
Outre ses qualités techniques, ceux qui l'ont connu se souviendront surtout
de ses qualités humaines, de sa grande disponibilité
et de son talent de pédagogue.*



TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	1
------------------------	---

CHAPITRE 1 - L'INSTRUMENTATION DANS LES PROCESSUS INDUSTRIELS .	3
---	---

1.1	Mission d'une entreprise	3
1.2	Activités dans une entreprise	3
1.3	Procédé industriel	5
1.4	Processus industriel	5
1.5	Schéma de tuyauterie et d'instrumentation	6
1.6	Hiérarchie des systèmes de contrôle	7
1.7	Grandeurs à contrôler	9
1.8	Régulation : terminologie et concepts	9
1.9	Actions correctives des régulateurs	12
1.10	Symbolisation	16
1.11	Repères d'identification	16

CHAPITRE 2 - CAPTEURS ET ACTIONNEURS : GÉNÉRALITÉS	21
--	----

2.1	Schéma fonctionnel d'une boucle de régulation	21
2.2	Capteurs et transmetteurs	22
2.2.1	Définitions	22
2.2.2	Échelle et étendue	23
2.2.3	Gammes de réglage et rangeabilité	24
2.2.4	Qualités métrologiques	25
2.2.5	Transmetteur intelligent	25
2.2.6	Signaux de sortie des transmetteurs électroniques . . .	29
2.2.7	Protocole HART	30
2.2.8	Réseaux de terrain	31

2.3	Les communications sans fil	34
2.3.1	Les standards	35
2.3.2	L'instrumentation sans fil	36
2.3.3	Les réseaux	38
2.4	Actionneurs	39
2.4.1	Définition	39
2.4.2	Exemples	39
2.4.3	Rôle du relais d'asservissement	39
2.4.4	Qualités intrinsèques des vannes de régulation.	40
2.4.5	Vanne régulatrice intelligente	41
2.5	Autres qualités requises des transmetteurs et des vannes régulatrices	42
2.6	Adaptation au processus	43
2.6.1	Conditions de service et conditions d'étude	43
2.6.2	Corrosion	44
2.7	Adaptation à l'environnement climatique et industriel	46
2.7.1	Degrés de protection procurés par les enveloppes des matériels électriques	46
2.7.2	Appareils électriques utilisables en atmosphère explosible	48
2.7.3	Équivalences des terminologies entre normes européennes et américaines	51
2.7.4	Norme américaine NEMA 250	51
2.7.5	Compatibilité électromagnétique (CEM)	58
2.7.6	Résistance aux radiations	65
2.8	Qualité de l'air ambiant des locaux techniques	65
2.8.1	Justification d'un système de conditionnement de l'air	65
2.8.2	Teneur en poussières	66
2.8.3	Teneurs en composés corrosifs gazeux	67
2.8.4	Température.	68
2.8.5	Humidité relative.	68
2.9	Sécurité fonctionnelle – Normes CEI 61508 et 61511	69
2.9.1	Norme CEI 61508	69
2.9.2	Norme CEI 61511	71

CHAPITRE 3 - MESURE DE LA PRESSION 73

3.1	Définition	73
3.2	Unités pratiques de pression – Table de conversion	73
3.3	Pression relative et pression absolue	73
3.4	Pression différentielle	76
3.5	Manomètres à colonne de liquide	77
3.5.1	Principe	77

3.5.2	Manomètre à tube en U	78
3.5.3	Manomètre à colonne	79
3.6	Manomètres à déformation mécanique	82
3.6.1	Manomètre à tube de Bourdon	82
3.6.2	Autres manomètres métalliques	82
3.7	Transmetteurs pneumatiques à déviation	85
3.7.1	Système buse-palette	85
3.7.2	Relais amplificateur	86
3.7.3	Principe du transmetteur à déviation	86
3.8	Transmetteurs pneumatiques à balance de forces	87
3.8.1	Capteur à membrane	87
3.8.2	Principe du transmetteur à balance de forces	88
3.9	Transmetteurs électroniques à microdéformation	88
3.9.1	Capteur à membranes	90
3.9.2	Principe du transmetteur électronique intelligent	91
3.9.3	Réalisation pratique	91
3.10	Séparateurs à membrane	93
3.10.1	Description	93
3.10.2	Applications	94
3.10.3	Influence du séparateur à membrane sur la mesure	96
3.11	Représentation symbolique des capteurs de pression	98
3.12	Étalonnage des capteurs de pression	98
3.12.1	Étalons fondamentaux ou primaires	98
3.12.2	Étalons secondaires	99
3.12.3	Balance manométrique	100
3.13	Annexes	101
3.13.1	Manomètres indicateurs normalisés	101
3.13.2	Feuilles de spécifications	103

CHAPITRE 4 - DÉBITMÈTRES À ÉLÉMENT PRIMAIRE

ET MANOMÈTRE DIFFÉRENTIEL SUR CONDUITES CYLINDRIQUES	107
--	-----

4.1	Définitions	108
4.1.1	Débit d'un fluide à travers une section de conduite	108
4.1.2	Débit masse q_m à travers une section de conduite	108
4.1.3	Débit volume q_v à travers une section de conduite	108
4.2	Paramètres d'écoulement dans les conduites cylindriques	108
4.2.1	Nombre de Reynolds	108
4.2.2	Régimes d'écoulement	108
4.2.3	Expression du débit volume dans une conduite	109
4.3	Mesure du débit par mesure de la vitesse d'écoulement	111
4.3.1	Principe	111
4.3.2	Rappel sur le théorème de Bernoulli	111

4.3.3	Mesure de la pression dynamique par tube de Pitot. .	111
4.3.4	Relation entre vitesse et pression dynamique	111
4.3.5	Formule pratique de calcul du débit.	111
4.3.6	Sonde Annubar	113
4.3.7	Guide pour l'utilisation d'un tube de Pitot ou d'une sonde Annubar	115
4.4	Mesure du débit par élément déprimogène	116
4.4.1	Principe d'un élément déprimogène.	116
4.4.2	Formule de calcul	118
4.4.3	À propos des étendues standardisées des transmetteurs	118
4.5	Éléments déprimogènes normalisés	120
4.5.1	Norme ISO 5167-1	120
4.5.2	Diaphragme à bord droit	120
4.5.3	Tuyères.	125
4.5.4	Tubes de Venturi	127
4.5.5	Limites d'emploi des éléments déprimogènes	130
4.5.6	Perte de charge dans les éléments déprimogènes . .	131
4.5.7	Longueurs droites minimales en amont et en aval de l'élément déprimogène.	132
4.6	Autres éléments déprimogènes	132
4.6.1	Diaphragme à bord arrondi	132
4.6.2	Diaphragme intégré	135
4.6.3	Élément déprimogène « en coin » (wedge element) . .	135
4.7	Coefficient d'un débitmètre	137
4.8	Débit exprimé en volume aux conditions de référence	138
4.9	Incertitude sur la mesure du débit par élément déprimogène . .	138
4.10	Coefficient de dilatation de l'orifice	139
4.11	Représentation symbolique des capteurs de débit	140
4.12	Annexes	140
4.12.1	Formule de calcul du débit avec un élément déprimogène – Démonstration	140
4.12.2	Calculs d'installations débitométriques à diaphragme et manomètre différentiel	141
4.12.3	Calculs de portées de débitmètres à diaphragme et manomètre différentiel	149
4.12.4	Feuille de spécification	155

CHAPITRE 5 - AUTRES DÉBITMÈTRES SUR CONDUITES CYLINDRIQUES

COMPARAISONS ENTRE DÉBITMÈTRES	157
--	-----

5.1	Méthodes de mesure du débit volume dans les conduites cylindriques	157
-----	---	-----

5.2	Mesure du débit volume par mesure de U connaissant S	157
5.2.1	Débitmètre à turbine	158
5.2.2	Débitmètre électromagnétique	161
5.2.3	Débitmètres à ultrasons.	163
5.2.4	Débitmètre à effet vortex.	168
5.3	Mesure du débit volume par mesure de S connaissant U	169
5.3.1	Principe	169
5.3.2	Réalisations pratiques	172
5.3.3	Ensembles indicateurs - régulateurs de débit	175
5.4	Mesure directe du débit volume	176
5.4.1	Débitmètre volumétrique étanche	176
5.4.2	Débitmètre à roues ovales à engrenages	177
5.5	Débitmètre massique	178
5.5.1	Principe	178
5.5.2	Réalisation pratique.	181
5.6	Utilisation des débitmètres en fonction du diamètre de la conduite et de la phase du fluide.	182
5.7	Précision des débitmètres	183
5.8	Caractéristiques diverses des débitmètres	183
5.9	Guide de sélection d'un débitmètre	184
5.10	Unités pratiques de débit.	187
5.11	Représentation symbolique des capteurs de débit	187
5.12	Annexes	189
5.12.1	Formules de correction pour rotamètres indicateurs . .	189
5.12.2	Feuilles de spécification	191

CHAPITRE 6 - MESURE DU NIVEAU	197
---	-----

6.1	Définitions	197
6.2	Détection et mesure du niveau	198
6.3	Unités de niveau	198
6.4	Méthodes de détection et de mesure usuelles pour liquides . .	198
6.4.1	Niveaux optiques	200
6.4.2	Niveaux à flotteur	203
6.4.3	Niveaux hydrostatiques	208
6.4.4	Niveaux électriques.	220
6.4.5	Niveaux à écho	225
6.4.6	Niveaux à absorption de rayonnement gamma	228
6.5	Méthodes de détection et de mesure usuelles pour pulvérulents	229
6.5.1	Niveaux électromécaniques.	229
6.5.2	Niveau pour catalyseur fluidisé	231
6.5.3	Autres méthodes	233

6.6	Système ATG pour stockages	233
6.6.1	Comparaison avec les jauges mécaniques	233
6.6.2	Principe HTG pour un réservoir ouvert	234
6.6.3	Principe HTG pour un réservoir sous pression	234
6.6.4	Principe Radar	237
6.6.5	Masse volumique et volume de stockage ramenés à 15 °C	237
6.7	Représentation symbolique des niveaux	238
6.8	Annexes	239
6.8.1	Feuilles de spécification	239
6.8.2	Étalonnage des niveaux à plongeur	241

CHAPITRE 7 - MESURE DE LA TEMPÉRATURE 245

7.1	Définitions	245
7.1.1	Température.	245
7.1.2	Thermomètre et pyromètre.	245
7.1.3	Thermomètres à contact et sans contact	245
7.2	Échelles conventionnelles usuelles	246
7.2.1	Échelle Celsius	246
7.2.2	Échelle Kelvin.	246
7.2.3	Échelle Fahrenheit.	246
7.2.4	Températures de référence	248
7.3	Méthodes de mesure usuelles	248
7.4	Thermomètres en verre à remplissage liquide	250
7.4.1	Thermomètres de laboratoire	250
7.4.2	Thermomètres industriels	250
7.5	Thermomètres à bulbe et manomètre	251
7.5.1	Thermomètre à dilatation de liquide	252
7.5.2	Thermomètre à tension de vapeur	253
7.5.3	Thermomètre à dilatation de gaz	253
7.6	Thermomètre à bilame	254
7.7	Couples thermoélectriques	255
7.7.1	Principe et utilisation pratique d'un couple thermo- électrique	255
7.7.2	Couples thermoélectriques normalisés	263
7.7.3	Mesure de la température de peau des tubes de four.	267
7.7.4	Mesure d'une différence de température.	267
7.8	Résistances thermoélectriques	270
7.8.1	Principe et définitions.	270
7.8.2	Résistance de platine (Pt) normalisée	271
7.8.3	Réalisation d'une sonde à résistance	271

7.8.4	Installation d'une sonde dans une canne thermométrique	271
7.8.5	Résistance de platine pour enroulements statoiriques	271
7.8.6	Raccordement électrique d'une résistance thermoelectrique	272
7.9	Transmetteurs de température	277
7.9.1	Transmetteur à montage direct	277
7.9.2	Transmetteur à montage sur rail	279
7.10	Gaine thermométrique	280
7.10.1	Utilisation	280
7.10.2	Réalisations	281
7.10.3	Exemples de réalisations	283
7.10.4	Calcul de résistance mécanique	284
7.11	Temps de réponse d'un capteur de température	285
7.11.1	Définitions	285
7.11.2	Temps de réponse des thermocouples	285
7.11.3	Temps de réponse des thermorésistances	287
7.11.4	Temps de réponse des sondes dans une gaine	287
7.12	Choix entre thermocouple et résistance thermométrique	287
7.13	Thermomètres optiques IR	288
7.13.1	Applications	288
7.13.2	Principes fondamentaux	289
7.13.3	Thermomètres à infrarouge monochromatique	292
7.13.4	Thermomètres à infrarouge bichromatique	295
7.14	Représentation symbolique des capteurs de température	297
7.15	Annexe : tables de conversion °C ↔ °F	297
CHAPITRE 8 - NOTIONS SUR LES ANALYSEURS INDUSTRIELS		301
8.1	Définitions	301
8.2	Rôle et justification des analyseurs industriels	302
8.3	Méthodes de classification des analyseurs industriels	303
8.3.1	Classification en fonction de l'application	303
8.3.2	Classification en fonction du principe de détection	303
8.3.3	Classification en fonction de la grandeur mesurée	304
8.4	Composition d'un système d'analyse en continu	306
8.4.1	Analyseur	306
8.4.2	Système d'analyse	306
8.5	Système de prélèvement et de transport de l'échantillon	309
8.5.1	Nécessité d'une boucle d'échantillonnage	309
8.5.2	Exemple de réalisation	309
8.5.3	Exigences relatives au prélèvement et au transport	310

8.6	Système de préparation de l'échantillon	314
8.6.1	Nécessité d'un système de préparation	314
8.6.2	Exemple de réalisation	315
8.6.3	Exigences relatives à la préparation de l'échantillon .	315
8.7	Système de contrôle de l'étalonnage	316
8.8	Adaptation au processus et à l'environnement	317
8.9	Bâtiment pour analyseurs.	317

CHAPITRE 9 - VANNES DE RÉGULATION – CONCEPTIONS 319

9.1	Classification des vannes de régulation.	319
9.2	Vannes de régulation à mouvement linéaire	319
9.2.1	Types de corps	321
9.2.2	Types de clapets pour corps droit réversible	326
9.2.3	Types de clapets pour corps droit non réversible et vanne d'angle.	328
9.2.4	Types de servomoteurs pneumatiques à membrane . .	329
9.2.5	Types de servomoteurs pneumatiques à double effet .	330
9.2.6	Position en cas de panne d'air selon les combinaisons des corps et des servomoteurs	332
9.3	Vannes de régulation à clapet semi-rotatif excentré	332
9.3.1	Conception du corps et du clapet	332
9.3.2	Servomoteurs pneumatiques pour vanne à clapet semi-rotatif	335
9.3.3	Position en cas de panne d'air	336
9.4	Vannes de régulation à papillon	337
9.4.1	Conception	337
9.4.2	Montages sur conduite	337
9.5	Vannes de régulation à boule	339
9.6	Vannes de régulation à trois voies	340
9.6.1	Applications	340
9.6.2	Vannes 3 voies à déplacement linéaire.	341
9.6.3	Vannes 3 voies papillon	342
9.7	Vannes à faible C_v	343
9.8	Accessoires	344
9.8.1	Relais d'asservissement	344
9.8.2	Commande manuelle	346
9.8.3	Vannes pneumatiques de commutation	347

CHAPITRE 10 - VANNES DE RÉGULATION – SPÉCIFICATIONS

ET CALCULS	351
10.1 Spécifications d'une vanne de régulation	351
10.2 Coefficient de débit	352
10.2.1 Définition	352
10.2.2 Coefficient de débit C_v	352
10.2.3 Coefficient de débit K_v	353
10.2.4 Relation entre C_v et K_v	353
10.2.5 Exemple de calcul	353
10.3 Caractéristiques de débit.	354
10.3.1 Définition et types de caractéristiques	354
10.3.2 Caractéristique linéaire	354
10.3.3 Caractéristique égal pourcentage	354
10.3.4 Caractéristique tout ou rien	355
10.3.5 Modification de caractéristique par relais d'asservissement.	356
10.3.6 Choix de la caractéristique de débit	356
10.4 Coefficient de réglage	357
10.5 Vitesses d'entrée et de sortie	358
10.5.1 Vitesse d'entrée	358
10.5.2 Vitesse de sortie	359
10.6 Classes d'étanchéité.	359
10.7 Perte de charge maximale admissible.	360
10.8 Position de la vanne en cas de panne d'air.	361
10.8.1 Règle à suivre	361
10.8.2 Réalisation	361
10.9 Méthode de calcul du C_v nominal	362
10.10 Écoulement en phase liquide	364
10.10.1 Variation de la pression statique dans la vanne	364
10.10.2 Cavitation et vaporisation	365
10.10.3 Calcul de la pression différentielle critique	367
10.10.4 Moyen pour éviter l'écoulement engorgé	368
10.10.5 Calcul du C_v en régime non engorgé.	370
10.10.6 Influence de la viscosité sur le C_v	370
10.10.7 Influence des convergents-divergents sur le C_v	370
10.11 Écoulement en phase gazeuse	371
10.11.1 Écoulement en régime non critique et en régime critique.	371
10.11.2 Calcul du C_v	372
10.11.3 Utilisation en régime critique	373
10.12 Écoulement biphasique	374

10.13	Le bruit dans les vannes de régulation	374
10.13.1	Niveau d'intensité acoustique	374
10.13.2	Nocivité du bruit.	375
10.13.3	Origine du bruit des vannes	376
10.13.4	Niveau sonore acceptable	376
10.13.5	Calcul prédictif du bruit	377
10.13.6	Moyens pour réduire le bruit	377
10.14	Gamme des dimensions nominales des vannes de régulation. .	378
10.15	Annexes	380
10.15.1	Fiche de calcul d'une vanne de régulation pour liquide	380
10.15.2	Fiche de calcul d'une vanne de régulation pour gaz .	383
10.15.3	Fiche de calcul d'une vanne de régulation pour vapeur .	386
10.15.4	Feuille de spécification pour vanne de régulation . .	386
10.15.5	Paramètres pour calculs en écoulement biphasique . .	390

CHAPITRE 11 - SCHÉMAS TYPES D'INSTALLATION

DES MATÉRIELS (TRANSMETTEURS ET VANNES RÉGULATRICES) 391

11.1	Introduction	391
11.2	Installation des capteurs – Règles à suivre	391
11.2.1	Prendre en compte les phénomènes physiques dans la liaison et le capteur	394
11.2.2	Protéger le capteur	394
11.2.3	Prévoir les facilités d'entretien	394
11.2.4	Assurer la sécurité et la protection de l'environnement	395
11.2.5	Penser à l'accessibilité	395
11.2.6	Copier avec précaution	395
11.3	Installation des capteurs – Types de montages	396
11.3.1	Montages de débitmètres en ligne.	397
11.3.2	Montages de niveaux en direct sur les capacités . . .	397
11.3.3	Montages en dérivation	398
11.3.4	Montages de thermocouples et sondes thermométriques	403
11.4	Installation des vannes de régulation	405
11.4.1	Tuyauterie	405
11.4.2	Manifold.	406
11.4.3	Dimensions des vannes de sectionnement et de bipasse	408
11.4.4	Vannes de purge.	408
11.4.5	Accessoires	409
11.5	Annexes	409
11.5.1	Manifolds et blocs manifolds pour transmetteurs montés en dérivation	409
11.5.2	Liquides tampons	413
11.5.3	Purgés continues.	418

11.5.4	Réchauffage et calorifugeage	426
11.5.5	Tubulures et raccords à compression pour tubulures.	435

CHAPITRE 12 - ALIMENTATION EN FLUIDE DE COMMANDE 441

12.1	Commande pneumatique.	441
12.1.1	Exigences à respecter	442
12.1.2	Système de production	443
12.1.3	Système de distribution.	446
12.1.4	Annexe : teneur en eau dans les gaz	449
12.2	Commande Hydraulique	454
12.2.1	Fluide hydraulique de commande	454
12.2.2	Système de production	454
12.2.3	Système de distribution.	456
12.2.4	Annexe : classe de propreté	456

CHAPITRE 13 - ALIMENTATIONS ÉLECTRIQUES 459

13.1	Exigences à respecter	459
13.2	Conception de la distribution BT	460
13.2.1	Principe	460
13.2.2	Régimes de neutre.	460
13.2.3	Principe de la protection du personnel selon le régime de neutre	462
13.2.4	Choix du régime de neutre	463
13.2.5	Classification des charges	463
13.2.6	Autres détails de conception	464
13.3	Interfaces de conditionnement ou de protection	465
13.3.1	Perturbations sur le réseau de distribution	465
13.3.2	Principales interfaces utilisées	466
13.4	Mises à la terre.	468
13.4.1	Utilité des mises à la terre	468
13.4.2	Mise à la terre des installations électriques	469
13.4.3	Mise à la terre des équipements électroniques	472
13.5	Vérifications initiale et périodique d'une installation.	473

CHAPITRE 14 - APPAREILS ÉLECTRIQUES POUR ATMOSPHÈRES EXPLOSIBLES UTILISÉS EN INSTRUMENTATION 475

14.1	Rappels.	475
------	------------------	-----

14.2	Surpression interne « p »	476
14.2.1	Définition	476
14.2.2	Principe	476
14.2.3	Réalisations couvertes par la norme ATEX	477
14.2.4	Règles pour les enveloppes à surpression interne . . .	478
14.2.5	Dispositifs de sécurité et dispositions de sécurité . . .	478
14.2.6	Exemple de réalisation avec débit continu du gaz de protection	479
14.3	Enveloppe antidéflagrante « d »	479
14.3.1	Définition	479
14.3.2	Principe	481
14.3.3	Précautions d'installation	482
14.4	Sécurité augmentée « e »	482
14.4.1	Définition	482
14.4.2	Principe	482
14.5	Sécurité intrinsèque « i »	482
14.5.1	Définition	482
14.5.2	Principe	482
14.5.3	Barrières de sécurité intrinsèque	485
14.5.4	Catégories de matériels électriques de sûreté « i » . .	488
14.5.5	Document descriptif et validité d'un système de sécurité intrinsèque	489
14.5.6	Câbles et câblages	490
CHAPITRE 15 - CÂBLAGES DES INSTRUMENTS		491
15.1	Liaisons entre capteurs, actionneurs et moyens de contrôle . . .	491
15.1.1	Architecture générale	491
15.1.2	Conception des liaisons	491
15.2	Câbles normalisés	494
15.3	Câbles d'extension et de compensation pour thermocouples . .	495
15.3.1	Spécifications	495
15.3.2	Protection contre les parasites	495
15.4	Câbles d'instrumentation	499
15.4.1	Spécifications	499
15.4.2	Protection contre les parasites	499
15.5	Réalisation « classique » des liaisons entre site et local technique	499
15.5.1	Schéma général	499
15.5.2	Boîtes de jonction	503
15.5.3	Borniers en local technique	505
15.5.4	Cheminements	506
15.5.5	Mise à la terre des écrans et des armures	508
15.5.6	Protection contre les effets indirects de la foudre	511

15.6	Câbles et câblages en sécurité intrinsèque.	513
15.6.1	Intégrité du système.	513
15.6.2	Borniers	514
15.6.3	Câbles à utiliser	514
15.6.4	Pose des câbles	514
15.6.5	Repérage des matériels et des câbles SI	515
15.6.6	Cas des réseaux de terrain	516
15.6.7	Cas des réseaux sans fil (wireless).	517

CHAPITRE 16 - ANNEXES	519
---------------------------------	-----

A.1	Alphabet grec (symboles)	519
A.2	Principales unités SI et unités pratiques	520
A.3	Propriétés de quelques éléments et corps composés.	521
A.4	Viscosité dynamique de quelques gaz	522
A.5	Propriétés de l'eau.	523
A.5.1	Masse volumique de l'eau.	523
A.5.2	Viscosité dynamique de l'eau.	524
A.5.3	Pression absolue de la vapeur	525
A.5.4	Masse volumique de la vapeur saturée.	526
A.5.5	Masse volumique de la vapeur surchauffée	527
A.5.6	Viscosité dynamique de la vapeur surchauffée	531
A.6	Propriétés des hydrocarbures	532
A.6.1	Masse volumique des hydrocarbures liquides.	532
A.6.2	Correction de la masse volumique des produits pétroliers selon ASTM D 1250	533
A.6.3	Viscosité cinématique des hydrocarbures liquides – Calcul	535
A.6.4	Viscosité dynamique de quelques hydrocarbures gazeux.	536
A.7	Masse volumique des gaz – Facteur de compressibilité.	537
A.8	Dimensions des tubes en acier sans soudure	540
A.9	Calcul des pertes de charge dans les conduites cylindriques . .	541

INDEX.	549
----------------	-----

A VANT-PROPOS

Alors que les régulateurs, les automates programmables et les systèmes numériques de contrôle-commande sont en général installés dans un environnement confortable, le plus souvent climatisé, les indicateurs et les transmetteurs de mesure ainsi que les vannes de régulation sont toujours installés sur le site de production et sont donc soumis aux mêmes conditions de pression et de température que les équipements constituant le processus de fabrication.

Ils subissent également les mêmes contraintes relatives à la nature des fluides du processus, telles que corrosion et érosion, et ils sont exposés aux intempéries, dans un environnement industriel sévère (poussières, atmosphère explosible, etc.). Ces matériels sont donc particulièrement agressés : leur spécification et leur installation ne doivent pas souffrir de la moindre médiocrité car de la qualité du matériel installé sur le site dépend la réussite d'une installation d'instrumentation industrielle.

Cet ouvrage s'adresse aux ingénieurs et aux techniciens chargés de mettre en œuvre les indicateurs et les transmetteurs ainsi que les vannes de régulation d'un système de contrôle, afin de les guider et les aider dans cette tâche délicate qui doit respecter de nombreuses spécifications techniques et une réglementation sévère.

Dans cette optique, l'ouvrage a été rédigé afin de permettre une approche la plus complète possible sur la conception et le choix des matériels installés sur le site, sur la façon de les raccorder au procédé, aux sources d'énergie et aux autres éléments du système de contrôle. Cette approche s'appuie toujours sur les *normes* et sur la *réglementation* à respecter.

En parcourant l'ouvrage, le lecteur peut d'abord trouver quelques rappels sur le rôle de l'instrumentation dans les processus industriels, sur le concept de la régulation et sur la symbolisation et l'identification de l'instrumentation.

Puis, il est mis en évidence que les transmetteurs et les vannes de régulation doivent, en plus de leurs qualités intrinsèques, présenter des qualités communes

les rendant *utilisables sur un site industriel* : adaptations au processus, à l'environnement climatique, à l'environnement industriel.

Les méthodes de mesure relatives à la pression, au débit, au niveau et à la température sont exposées tour à tour. Après le rappel des principes fondamentaux utilisés, la description technologique des matériels est complétée par les formules de calcul de ces matériels et par des *fiches de calcul* facilement transposables sur calculateur (fichiers Excel), afin que l'utilisateur utilise l'ouvrage comme un véritable outil de travail et non comme un catalogue... De même, l'utilisateur trouvera des *feuilles de spécification* pour chacun des matériels décrits.

Des notions sur les analyseurs industriels complètent les chapitres sur les transmetteurs : on sait en effet aujourd'hui que ces appareils doivent compléter les mesures classiques (pression, débit, niveau et température) pour des raisons économiques ou de protection de l'environnement.

Les vannes de régulation font l'objet de deux chapitres distincts mais complémentaires, l'un consacré aux technologies mises en œuvre, l'autre aux calculs et aux spécifications, avec *fiches de calcul* et *feuilles de spécification*. L'accent est particulièrement mis sur la position de sécurité des vannes en cas de panne d'air et sur les moyens à utiliser pour éviter la cavitation dans les vannes, phénomène fréquent et destructeur, souvent ignoré (volontairement ou non...) par les constructeurs dans leurs offres.

Après le choix du matériel en conformité avec les spécifications, ce matériel doit faire l'objet de *schémas types* d'installation. Les règles à suivre sont exposées afin de raccorder le matériel au procédé, en utilisant les moyens évitant des dysfonctionnements dus au fluide du procédé et à l'environnement industriel. Ce chapitre comprend des annexes très utiles sur les manifolds des transmetteurs, les liquides tampon, les purges continues et le réchauffage.

Enfin, le lecteur trouvera toutes les recommandations utiles aux spécifications de l'alimentation en air de commande, des alimentations électriques, des matériels électriques normalisés à utiliser en zones explosibles et des câbles et câblage de l'instrumentation.

Afin de faciliter les calculs recommandés dans les fiches de calcul, le lecteur trouvera en annexe des renseignements utiles sur les propriétés physiques des fluides les plus courants et sur le calcul des pertes de charge dans les conduites.

Remerciements

Les éditions Dunod et Monsieur Patrick Salaün remercient Monsieur Bruno Zelmat pour ses remarques pertinentes et ses suggestions de mise à jour dont il a été tenu compte dans l'élaboration de cette quatrième édition.

INSTRUMENTATION DANS LES PROCESSUS INDUSTRIELS

1.1 Mission d'une entreprise

Une entreprise industrielle est une unité économique de production dont la mission est d'assurer la *production de biens* (produits) adaptés aux besoins du marché, tout en assurant des *bénéfices* et la *pérennité* (état de ce qui dure toujours) de l'entreprise.

Les produits fournis doivent être conformes à des *spécifications* (qualités attendues) fixées par le client lui-même et/ou par une réglementation. De plus, la production doit être conforme aux quantités attendues, dans des délais contractuels.

La pérennité de l'entreprise ne peut être obtenue que si celle-ci se donne les moyens pour s'adapter en permanence :

- à l'*évolution des besoins* des clients,
- aux nouvelles *exigences de la réglementation*,
- à l'*amélioration de l'outil de production*, afin d'être capable de produire en qualité, quantité et délais, tout en étant compétitif par rapport à la concurrence.

L'entreprise ne peut plus se concevoir comme une entité uniquement guidée par la création de valeurs économiques, non intégrée dans le milieu dans lequel elle évolue. La prise en compte de l'environnement est devenue maintenant une nécessité, souvent contraignante (réglementation, normes...).

1.2 Activités dans une entreprise

Une entreprise, pour sa fonction principale de création de valeurs, peut se schématiser par trois activités complémentaires représentées par la *figure 1.1* :

- *Produire*,
- *Maintenir*,
- *Gérer*.

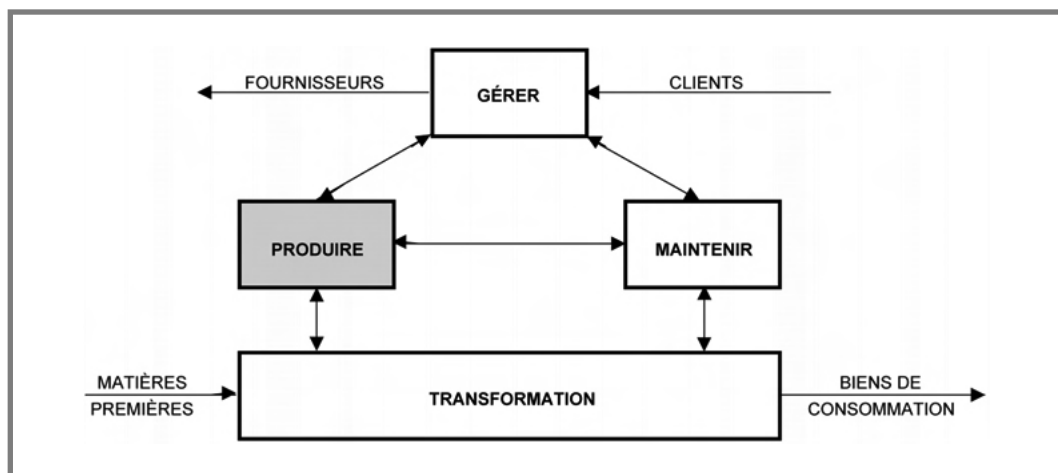


Figure 1.1 – Schéma fonctionnel d'une entreprise.

L'activité *Produire* consiste à transformer des matières premières et de l'énergie en biens de consommation, en respectant les spécifications des produits fabriqués. Le support de l'activité de production est constitué par un ensemble hommes-machines comprenant :

- le processus de fabrication des produits,
- le système de conduite du processus,
- le personnel de conduite.

L'activité *Maintenir* consiste à assurer la meilleure disponibilité de l'outil de production par des actions de maintenance curative et préventive à court, moyen et long terme. On entend par « outil de production » l'outil de transformation – le « processus » lui-même (tuyaux, ballons, turbines...) – et l'outil de pilotage de ce processus c'est-à-dire l'instrumentation (capteurs, actionneurs) et le système de contrôle-commande (automates, supervision...). Le support de l'activité de maintenance est essentiellement constitué par :

- les outils de surveillance et d'analyse (instrumentation, calculs...),
- le personnel de maintenance,
- les pièces de rechange et les outils nécessaires aux opérations d'entretien.

L'activité *Gérer* comporte deux activités distinctes :

- *Gérer techniquement,*
- *Gérer financièrement.*

Gérer techniquement consiste à :

- optimiser la quantité de matières premières et d'énergie à utiliser pour assurer la production,

- apprécier la disponibilité de l'outil de production afin de maîtriser les coûts de production et d'entretien.

Gérer financièrement consiste à trouver les marchés et les moyens à mettre en œuvre au sein de l'entreprise pour assurer la rentabilité et la pérennité de l'entreprise.

On conçoit aisément que ces trois activités doivent être parfaitement définies et coordonnées au sein de l'entreprise.

À ces activités, il convient également d'ajouter celles relatives :

- à la mise en œuvre (phases de démarrage, essais...),
- à la maîtrise de l'impact de la production sur son environnement (maîtrise des rejets...).

Dans le cadre du rôle de l'instrumentation dans l'entreprise, nous allons décrire principalement les *moyens nécessaires* à l'activité Produire, ce qui implique de définir les termes suivants :

- procédé industriel,
- processus industriel,
- système de conduite du processus.

1.3 Procédé industriel

C'est la *méthode à suivre* pour obtenir un produit et, pour prendre un exemple simple, on peut dire qu'un procédé s'apparente à une recette de cuisine...

Le procédé est immatériel et se présente sous la forme d'un texte accompagné de schémas explicatifs formant le « livre du procédé » (*process data book*). On y décrit les ingrédients à utiliser, les moyens matériels à prévoir, les opérations à exécuter et les conditions (pression, débit, température, etc.) à respecter pour obtenir le produit à fabriquer, en *quantité* (capacité de production) et en *qualité*.

Le procédé doit être matérialisé par une unité de production ou *processus*.

1.4 Processus industriel

Le terme *processus* désigne deux aspects d'une installation de production, l'un *descriptif*, l'autre *matériel* :

- Aspect descriptif : c'est l'ensemble des *opérations* détaillées d'élaboration d'un produit fini devant posséder des *caractéristiques imposées* dans les *limites de tolérances fixées*, selon un procédé déterminé.
- Aspect matériel : c'est l'*installation* proprement dite, comprenant tous les appareils nécessaires à la transformation des matières premières.

Noter qu'en anglais le terme *process* désigne à la fois le procédé et le processus.

1.5 Schéma de tuyauterie et d'instrumentation

Le processus est décrit dans un « schéma mécanique » souvent désigné sous le vocable anglais de P & ID (*Piping & Instrumentation Diagram* ou *Process and Instrumentation Diagram*) qui se traduit par « schéma de tuyauteries et instrumentation du processus » ou *schéma TI*.

Un tel schéma TI utilise des *symboles normalisés* représentant sans ambiguïté les différents composants du processus :

- les équipements propres au processus lui-même,
- les équipements nécessaires au contrôle du processus.

Les équipements propres au processus lui-même sont :

- les *équipements statiques* pour les opérations de transport et de stockage (tuyauteries, bacs),
- les *équipements dynamiques* pour les opérations de transformation (fours, tours de distillation, séparateurs, échangeurs, etc.).

Les équipements nécessaires au contrôle du processus et constituant l'*instrumentation* comportent :

- des prises de mesure (essentiellement de pression, débit, niveau, température) disposées sur les équipements,
- des instruments de mesure (indicateurs locaux, transmetteurs),
- des organes de contrôle (régulateurs),
- des organes de sécurité (alarmes, systèmes de commandes automatiques),
- des organes de commande permettant de moduler ou de sectionner les flux de matières (vannes motorisées de sectionnement, vannes régulatrices, pompes, ventilateurs, etc.),
- des organes de protection (soupapes).

Sur le seul plan de l'instrumentation, pendant le développement d'un projet, le schéma TI prend successivement des formes allant du plus simple au plus compliqué. Le schéma de la *figure 1.2* donne une représentation simplifiée d'un processus, l'instrumentation étant limitée aux concepts mais pas encore à la réalisation pratique.

Même s'il n'existe pas de symbolisation universelle (chaque industrie a souvent ses propres standards), le formalisme généralement utilisé (particulièrement en chimie) pour la représentation d'un schéma P&ID ou TI est issu du standard ANSI/ISA-5.1-1984, *Instrumentation Symbols and Identification* (révisée en 2009). Cette symbolique est présentée au paragraphe 1.10. En France, c'est la norme NF E 04-202 (ed. 1996) « Tuyauteries, composants de tuyauteries et appareils des processus industriels » qui est largement référencée, en particulier en génie chimique.

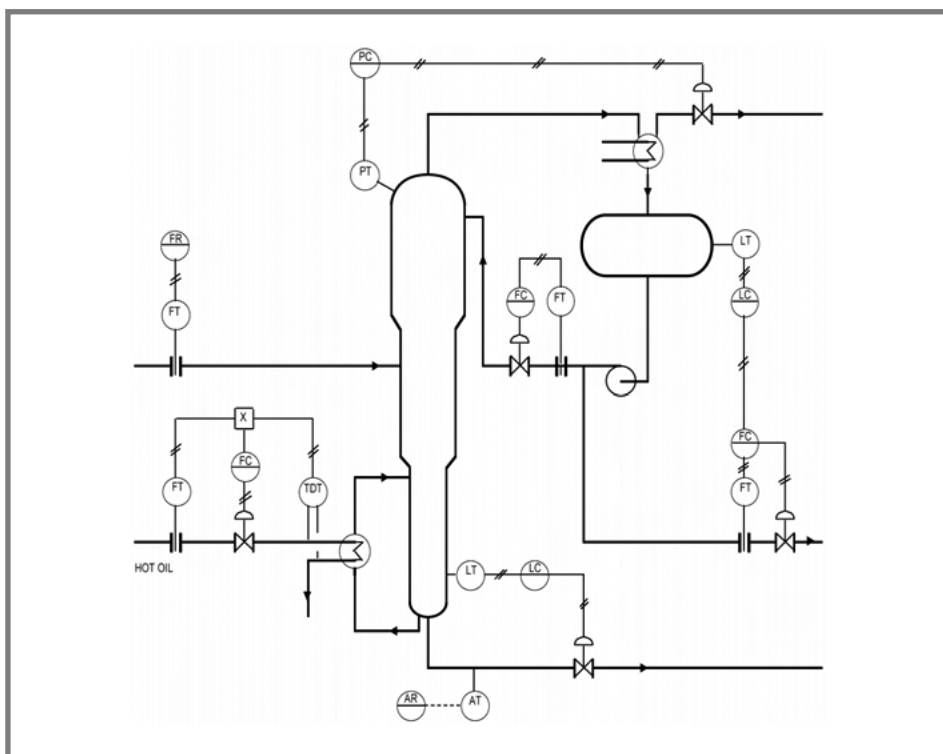


Figure 1.2 – Exemple de schéma TI.
Forme simplifiée montrant les bases du contrôle.

1.6 Hiérarchie des systèmes de contrôle

Les systèmes de contrôle-commande peuvent être hiérarchisés selon deux axes.

La première hiérarchisation, qui peut être considérée comme « verticale », s'appuie sur le concept de la pyramide CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) et propose 4 niveaux (*a minima*), chacun assurant un niveau de décision et disposant d'une visibilité adaptés à sa place dans la hiérarchie :

- *Niveau 0* : ensemble des équipements de terrain (capteur, actionneur...) permettant l'action et la prise d'informations sur le procédé. C'est le niveau de l'*instrumentation*.

- *Niveau 1* : ensemble des équipements réalisant les fonctions d'*acquisition* et les fonctions dites « réflexes », c'est-à-dire de *traitements* d'automatismes logiques et séquentiels, de *régulation*, de *protection* et de *restitution* des informations logiques et analogiques, en lien avec le niveau 0¹.
- *Niveau 2* : ensemble des équipements permettant de réaliser les fonctions de *conduite* et de *supervision* de l'unité de production, en lien direct avec le niveau 1.
- *Niveau 3* : ensemble des équipements qui apportent une aide à l'opérateur pour optimiser l'*exploitation* de son installation.

Le second axe privilégie la hiérarchie des fonctions de contrôle-commande selon leur criticité vis-à-vis du processus (*figure 1.3*) :

Niveau 1 : système de *conduite*

Niveau 2 : système de *protection*

Niveau 3 : système de *sécurité*

Le *niveau 1* comprend essentiellement l'instrumentation de contrôle du processus : capteurs (mesures), régulateurs, programmeurs, vannes régulatrices.

Ce niveau 1 assure la *conduite* soit de façon permanente (processus continu), soit selon une séquence par commandes programmées (processus de fabrication par *batch*) initialisée par l'opérateur.

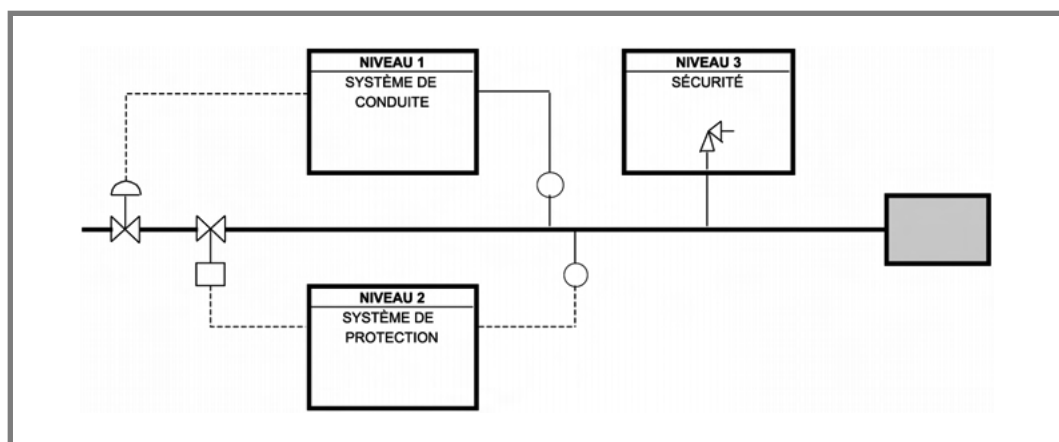


Figure 1.3 – Hiérarchie des systèmes de contrôle.

Le *niveau 2* comprend essentiellement une instrumentation de composition voisine de celle du niveau 1, mais totalement *indépendante* fonctionnellement de ce niveau.

1. Avec l'introduction de l'instrumentation intelligente et des bus de terrain type « peer to peer », cette distinction « niveau 0 » et « niveau 1 » est moins évidente.

Ce niveau 2 assure la *protection* du processus selon une fonction discontinue non systématique, c'est-à-dire non initialisée par l'opérateur, à partir d'informations de dépassement de seuils sur des paramètres critiques du processus.

Le *niveau 3* constitue la *protection ultime* du processus. Il ne contient pas d'instrumentation identique à celles des niveaux 1 et 2, mais des dispositifs fonctionnant sans énergie auxiliaire (soupapes, disques de rupture).

1.7 Grandeurs à contrôler

Les *principales* grandeurs physiques à contrôler (maîtriser) sur un processus industriel sont au nombre de quatre, désignées par une lettre majuscule (initiale du mot anglais) :

P (<i>PRESSURE</i>)	PRESSION
F (<i>FLOW</i>)	DÉBIT
L (<i>LEVEL</i>)	NIVEAU
T (<i>TEMPERATURE</i>)	TEMPÉRATURE

D'autres grandeurs physiques ou chimiques peuvent aussi être mesurées ou « analysées » (en particulier, pour la surveillance de l'environnement) :

A (<i>ANALYSIS</i>)	ANALYSE
------------------------------	---------

L'« analyse » effectuée peut être :

- la mesure d'une *qualité spécifique d'un corps* (masse volumique, viscosité, pression de vapeur, etc.),
- la *détection du changement d'état d'un corps* (solidification, vaporisation, etc.),
- la *composition chimique d'un corps* (en général partielle) ou la *teneur d'un seul composant dans un mélange*,
- le *pH* d'une solution (dissociation ionique).

1.8 Régulation : terminologie et concepts

Afin d'assurer le contrôle des grandeurs permettant le fonctionnement du processus, un certain nombre de *moyens* et une « *intelligence* » *adaptée* doivent être mis en œuvre.

La *figure 1.4* illustre une régulation de niveau dans un réservoir alimenté à un débit aléatoire.

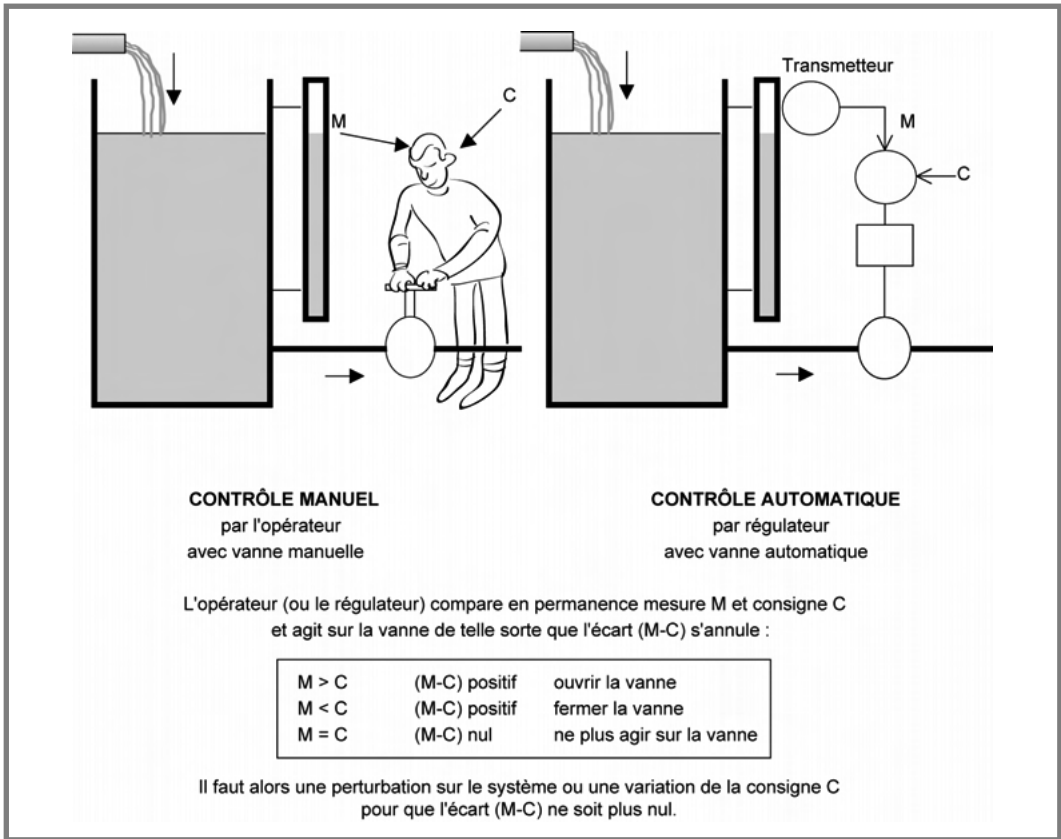


Figure 1.4 – Principe de la régulation.

Contrôle manuel

Dans la version de contrôle manuel par l'opérateur, les moyens à mettre en œuvre pour respecter une *consigne* sont :

- une *mesure* du niveau (niveau à glace),
- un *moyen de comparaison* entre mesure et consigne et l'élaboration d'une *action de correction* (perception visuelle et intelligence de l'opérateur pour respecter la consigne qui lui a été donnée),
- un *organe de réglage* (vanne manuelle),
- une *force motrice* permettant le fonctionnement de l'organe de réglage (force musculaire de l'opérateur).