

L'USINE NOUVELLE

SÉRIE | EEA

Michel Grout
Patrick Salaün

INSTRUMENTATION INDUSTRIELLE

Spécification et installation
des capteurs et vannes de régulation

2^e édition



DUNOD



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	28
2.2.7 Protocole Hart	29
2.2.8 Réseaux de terrain	30

2.3.2	Exemples	32
2.3.3	Rôle du relais d'asservissement	33
2.3.4	Qualités intrinsèques des vannes de régulation	33
2.3.5	Vanne régulatrice intelligente	34
2.4	Autres qualités requises des transmetteurs et des vannes régulatrices	36
2.5	Adaptation au processus	36
2.5.1	Conditions de service et conditions d'étude	36
2.5.2	Corrosion	38
2.6	Adaptation à l'environnement climatique et industriel	39
2.6.1	Degrés de protection procurés par les enveloppes des matériels électriques	40
2.6.2	Appareils électriques utilisables en atmosphère explosible	40
2.6.3	Équivalences des terminologies entre normes européennes et américaines	45
2.6.4	Norme américaine NEMA 250	45
2.6.5	Compatibilité électromagnétique (CEM)	52
2.7	Qualité de l'air ambiant des locaux techniques	59
2.7.1	Justification d'un système de conditionnement de l'air	59
2.7.2	Teneur en poussières	60
2.7.3	Teneurs en composés corrosifs gazeux	61
2.7.4	Température	62
2.7.5	Humidité relative	62
2.8	Sécurité fonctionnelle – Normes CEI 61508 et 61511	62
2.8.1	Norme CEI 61508	63
2.8.2	Norme CEI 61511	65
CHAPITRE 3 - MESURE DE LA PRESSION		
3.1	Définition	67
3.2	Unités pratiques de pression – Table de conversion	67
3.3	Pression relative et pression absolue	67
3.4	Pression différentielle	70
3.5	Manomètres à colonne de liquide	71
3.5.1	Principe	71
3.5.2	Manomètre à tube en U	72
3.5.3	Manomètre à colonne	73
3.6	Manomètres à déformation mécanique	76
3.6.1	Manomètre à tube de Bourdon	76
3.6.2	Autres manomètres métalliques	76

3.7.1	Système buse-palette	7
3.7.2	Relais amplificateur	8
3.7.3	Principe du transmetteur à déviation	8
3.8	Transmetteurs pneumatiques à balance de forces	8
3.8.1	Capteur à membrane	8
3.8.2	Principe du transmetteur à balance de forces	8
3.9	Transmetteurs électroniques à microdéformation	8
3.9.1	Capteur à membranes	8
3.9.2	Principe du transmetteur électronique intelligent	8
3.9.3	Réalisation pratique	8
3.10	Séparateurs à membrane	8
3.10.1	Description	8
3.10.2	Applications	8
3.10.3	Influence du séparateur à membrane sur la mesure	9
3.11	Représentation symbolique des capteurs de pression	9
3.12	Étalonnage des capteurs de pression	9
3.12.1	Étalons fondamentaux ou primaires	9
3.12.2	Étalons secondaires	9
3.12.3	Balance manométrique	9
3.13	Annexes	9
3.13.1	Manomètres indicateurs normalisés	9
3.13.2	Feuilles de spécifications	9

CHAPITRE 4 - DÉBITMÈTRES À ÉLÉMENT PRIMAIRE ET MANOMÈTRE DIFFÉRENTIEL SUR CONDUITES CYLINDRIQUES

4.1	Définitions	10
4.1.1	Débit d'un fluide à travers une section de conduite	10
4.1.2	Débit masse q_m à travers une section de conduite	10
4.1.3	Débit volume q_v à travers une section de conduite	10
4.2	Paramètres d'écoulement dans les conduites cylindriques	10
4.2.1	Nombre de Reynolds	10
4.2.2	Régimes d'écoulement	10
4.2.3	Expression du débit volume dans une conduite	10
4.3	Mesure du débit par mesure de la vitesse d'écoulement	10
4.3.1	Principe	10
4.3.2	Rappel sur le théorème de Bernoulli	10
4.3.3	Mesure de la pression dynamique par tube de Pitot	10
4.3.4	Relation entre vitesse et pression dynamique	10
4.3.5	Formule pratique de calcul du débit	10
4.3.6	Sonde Annubar	10
4.3.7	Guide pour l'utilisation d'un tube de Pitot ou d'une sonde Annubar	10

4.4.1	Principe d'un élément déprimogène	110
4.4.2	Formule de calcul	112
4.4.3	À propos des étendues standardisées des transmetteurs	112
4.5	Éléments déprimogènes normalisés	114
4.5.1	Norme ISO 5167-1	114
4.5.2	Diaphragme à bord droit	114
4.5.3	Tuyères	120
4.5.4	Tubes de Venturi	122
4.5.5	Limites d'emploi des éléments déprimogènes	124
4.5.6	Perte de charge dans les éléments déprimogènes	124
4.5.7	Longueurs droites minimales en amont et en aval de l'élément déprimogène	124
4.6	Autres éléments déprimogènes	125
4.6.1	Diaphragme à bord arrondi	125
4.6.2	Diaphragme intégré	127
4.6.3	Élément déprimogène « en coin » (wedge element)	128
4.7	Coefficient d'un débitmètre	131
4.8	Débit exprimé en volume aux conditions de référence	132
4.9	Incertitude sur la mesure du débit par élément déprimogène	132
4.10	Coefficient de dilatation de l'orifice	133
4.11	Représentation symbolique des capteurs de débit	134
4.12	Annexes	134
4.12.1	Formule de calcul du débit avec un élément déprimogène – Démonstration	134
4.12.2	Calculs d'installations débitométriques à diaphragme et manomètre différentiel	135
4.12.3	Calculs de portées de débitmètres à diaphragme et manomètre différentiel	143
4.12.4	Feuille de spécification	149

CHAPITRE 5 - AUTRES DÉBITMÈTRES SUR CONDUITES CYLINDRIQUES
COMPARAISONS ENTRE DÉBITMÈTRES 151

5.1	Méthodes de mesure du débit volume dans les conduites cylindriques	151
5.2	Mesure du débit volume par mesure de U connaissant S	151
5.2.1	Débitmètre à turbine	152
5.2.2	Débitmètre électromagnétique	155
5.2.3	Débitmètres à ultrasons	157
5.2.4	Débitmètre à effet vortex	160

5.3.1	Principe	153
5.3.2	Réalisations pratiques	153
5.3.3	Ensembles indicateurs - régulateurs de débit	153
5.4	Mesure directe du débit volume	154
5.4.1	Débitmètre volumétrique étanche	154
5.4.2	Débitmètre à roues ovales à engrenages	154
5.5	Débitmètre massique	155
5.5.1	Principe	155
5.5.2	Réalisation pratique	155
5.6	Utilisation des débitmètres en fonction du diamètre de la conduite et de la phase du fluide	156
5.7	Précision des débitmètres	157
5.8	Caractéristiques diverses des débitmètres	158
5.9	Guide de sélection d'un débitmètre	159
5.10	Unités pratiques de débit	160
5.11	Représentation symbolique des capteurs de débit	161
5.12	Annexes	162
5.12.1	Formules de correction pour rotamètres indicateurs	162
5.12.2	Feuilles de spécification	162

CHAPITRE 6 - MESURE DU NIVEAU

6.1	Définitions	163
6.2	Détection et mesure du niveau	163
6.3	Unités de niveau	164
6.4	Méthodes de détection et de mesure usuelles pour liquides	164
6.4.1	Niveaux optiques	164
6.4.2	Niveaux à flotteur	164
6.4.3	Niveaux hydrostatiques	164
6.4.4	Niveaux électriques	164
6.4.5	Niveaux à écho	164
6.4.6	Niveaux à absorption de rayonnement gamma	164
6.5	Méthodes de détection et de mesure usuelles pour pulvérulents	165
6.5.1	Niveaux électromécaniques	165
6.5.2	Niveau pour catalyseur fluidisé	165
6.5.3	Autres méthodes	165
6.6	Système HTG pour stockages	166
6.6.1	Comparaison avec les jauges mécaniques	166
6.6.2	Principe pour un réservoir ouvert	166
6.6.3	Principe pour un réservoir sous pression	166
6.6.4	Masse volumique et volume de stockage ramenés à 15 °C	166

CHAPITRE 7 - MESURE DE LA TEMPÉRATURE 237

7.1	Définitions	237
7.1.1	Température	237
7.1.2	Thermomètre et pyromètre	237
7.1.3	Thermomètres à contact et sans contact	237
7.2	Échelles conventionnelles usuelles	237
7.2.1	Échelle Celsius	238
7.2.2	Échelle Kelvin	238
7.2.3	Échelle Fahrenheit	238
7.2.4	Températures de référence	238
7.3	Méthodes de mesure usuelles	240
7.4	Thermomètres en verre à remplissage liquide	240
7.4.1	Thermomètres de laboratoire	242
7.4.2	Thermomètres industriels	242
7.5	Thermomètres à bulbe et manomètre	242
7.5.1	Thermomètre à dilatation de liquide	243
7.5.2	Thermomètre à tension de vapeur	244
7.5.3	Thermomètre à dilatation de gaz	245
7.6	Thermomètre à bilame	245
7.7	Couples thermoélectriques	246
7.7.1	Principe et utilisation pratique d'un couple thermoélectrique	247
7.7.2	Couples thermoélectriques normalisés	255
7.7.3	Mesure de la température de peau des tubes de four	259
7.7.4	Mesure d'une différence de température	259
7.8	Résistances thermoélectriques	259
7.8.1	Principe et définitions	262
7.8.2	Résistance de platine (Pt) normalisée	262
7.8.3	Réalisation d'une sonde à résistance	263
7.8.4	Installation d'une sonde dans une canne thermométrique	263
7.8.5	Résistance de platine pour enroulements statoriques	263
7.8.6	Raccordement électrique d'une résistance thermoélectrique	264
7.9	Transmetteurs de température	269
7.9.1	Transmetteur à montage direct	269
7.9.2	Transmetteur à montage sur rail	271

CHAPITRE 8 - NOTIONS SUR LES ANALYSEURS INDUSTRIELS

7.10.1	Utilisation	231
7.10.2	Réalisations	231
7.10.3	Exemples de réalisations	233
7.10.4	Calcul de résistance mécanique	233
7.11	Temps de réponse d'un capteur de température	237
7.11.1	Définitions	237
7.11.2	Temps de réponse des thermocouples	237
7.11.3	Temps de réponse des thermorésistances	237
7.11.4	Temps de réponse des sondes dans une gain	237
7.12	Choix entre thermocouple et résistance thermométrique	237
7.13	Thermomètres optiques IR	238
7.13.1	Applications	238
7.13.2	Principes fondamentaux	238
7.13.3	Thermomètres à infrarouge monochromatique	238
7.13.4	Thermomètres à infrarouge bichromatique	238
7.14	Représentation symbolique des capteurs de température	240
7.15	Annexe : tables de conversion °C ↔ °F	240
8.1	Définitions	247
8.2	Rôle et justification des analyseurs industriels	247
8.3	Méthodes de classification des analyseurs industriels	247
8.3.1	Classification en fonction de l'application	247
8.3.2	Classification en fonction du principe de détec	247
8.3.3	Classification en fonction de la grandeur mesu	247
8.4	Composition d'un système d'analyse en continu	247
8.4.1	Analyseur	247
8.4.2	Système d'analyse	247
8.5	Système de prélèvement et de transport de l'échantillon	247
8.5.1	Nécessité d'une boucle d'échantillonnage	247
8.5.2	Exemple de réalisation	247
8.5.3	Exigences relatives au prélèvement et au transp	247
8.6	Système de préparation de l'échantillon	247
8.6.1	Nécessité d'un système de préparation	247
8.6.2	Exemple de réalisation	247
8.6.3	Exigences relatives à la préparation de l'échanti	247
8.7	Système de contrôle de l'étalonnage	247
8.8	Adaptation au processus et à l'environnement	247
8.9	Bâtiment pour analyseurs	247

CHAPITRE 9 - VANNES DE RÉGULATION – CONCEPTIONS	311
9.1 Classification des vannes de régulation	311
9.2 Vannes de régulation à mouvement linéaire	311
9.2.1 Types de corps	313
9.2.2 Types de clapets pour corps droit réversible	318
9.2.3 Types de clapets pour corps droit non réversible et vanne d'angle	320
9.2.4 Types de servomoteurs pneumatiques à membrane	321
9.2.5 Types de servomoteurs pneumatiques à double effet	322
9.2.6 Position en cas de panne d'air selon les combinaisons des corps et des servomoteurs	324
9.3 Vannes de régulation à clapet semi-rotatif excentré	324
9.3.1 Conception du corps et du clapet	324
9.3.2 Servomoteurs pneumatiques pour vanne à clapet semi-rotatif	327
9.3.3 Position en cas de panne d'air	328
9.4 Vannes de régulation à papillon	329
9.4.1 Conception	329
9.4.2 Montages sur conduite	329
9.5 Vannes de régulation à boule	331
9.6 Vannes de régulation à trois voies	332
9.6.1 Applications	332
9.6.2 Vannes 3 voies à déplacement linéaire	333
9.6.3 Vannes 3 voies papillon	334
9.7 Vannes à faible C_v	335
9.8 Accessoires	336
9.8.1 Relais d'asservissement	336
9.8.2 Commande manuelle	338
9.8.3 Vannes pneumatiques de commutation	339
CHAPITRE 10 - VANNES DE RÉGULATION – SPÉCIFICATIONS ET CALCULS	343
SPÉCIFICATIONS	343
10.1 Spécifications d'une vanne de régulation	343
10.2 Coefficient de débit	344
10.2.1 Définition	344
10.2.2 Coefficient de débit C_v	344
10.2.3 Coefficient de débit K_v	345
10.2.4 Relation entre C_v et K_v	345
10.2.5 Exemple de calcul	345

10.3.1 Définition et types de caractéristiques	345
10.3.2 Caractéristique linéaire	345
10.3.3 Caractéristique égale pourcentage	345
10.3.4 Caractéristique tout ou rien	345
10.3.5 Modification de caractéristique par relais d'asservissement	345
10.3.6 Choix de la caractéristique de débit	345
10.4 Coefficient de réglage	345
10.5 Vitesses d'entrée et de sortie	345
10.5.1 Vitesse d'entrée	345
10.5.2 Vitesse de sortie	345
10.6 Classes d'étranchéité	345
10.7 Perte de charge maximale admissible	345
10.8 Position de la vanne en cas de panne d'air	345
10.8.1 Règle à suivre	345
10.8.2 Réalisation	345
CALCULS	345
10.9 Méthode de calcul du C_v nominal	345
10.10 Écoulement en phase liquide	345
10.10.1 Variation de la pression statique dans la vanne	345
10.10.2 Cavitation et vaporisation	345
10.10.3 Calcul de la pression différentielle critique	345
10.10.4 Moyen pour éviter l'écoulement engorgé	345
10.10.5 Calcul du C_v en régime non engorgé	345
10.10.6 Influence de la viscosité sur le C_v	345
10.10.7 Influence des convergents-divergents sur le C_v	345
10.11 Écoulement en phase gazeuse	345
10.11.1 Écoulement en régime non critique et en régime critique	345
10.11.2 Calcul du C_v	345
10.11.3 Utilisation en régime critique	345
10.12 Écoulement biphasique	345
10.13 Le bruit dans les vannes de régulation	345
10.13.1 Niveau d'intensité acoustique	345
10.13.2 Nocivité du bruit	345
10.13.3 Origine du bruit des vannes	345
10.13.4 Niveau sonore acceptable	345
10.13.5 Calcul prédictif du bruit	345
10.13.6 Moyens pour réduire le bruit	345
10.14 Gamme des dimensions nominales des vannes de régulation	345

10.15.1	Fiche de calcul d'une vanne de régulation pour liquide	372
10.15.2	Fiche de calcul d'une vanne de régulation pour gaz	375
10.15.3	Fiche de calcul d'une vanne de régulation pour vapeur	378
10.15.4	Feuille de spécification pour vanne de régulation	378
10.15.5	Paramètres pour calculs en écoulement biphasique	382

CHAPITRE 11 - SCHEMAS TYPES D'INSTALLATION DES MATERIELS (TRANSMETTEURS ET VANNES REGULATRICES) 383

11.1	Introduction	383
11.2	Installation des capteurs – Règles à suivre	383
11.2.1	Prendre en compte les phénomènes physiques dans la liaison et le capteur	386
11.2.2	Protéger le capteur	386
11.2.3	Prévoir les facilités d'entretien	386
11.2.4	Assurer la sécurité et la protection de l'environnement	387
11.2.5	Penser à l'accessibilité	387
11.2.6	Copier avec précaution	387
11.3	Installation des capteurs – Types de montages	388
11.3.1	Montages de débitmètres en ligne	389
11.3.2	Montages de niveaux en direct sur les capacités	389
11.3.3	Montages en dérivation	389
11.3.4	Montages de thermocouples et sondes thermométriques	395
11.4	Installation des vannes de régulation	398
11.4.1	Tuyauterie	398
11.4.2	Manifold	398
11.4.3	Dimensions des vannes de sectionnement et de bipasse	398
11.4.4	Vannes de purge	400
11.4.5	Accessoires	400
11.5	Annexes	400
11.5.1	Manifolds et blocs manifolds pour transmetteurs montés en dérivation	400
11.5.2	Liquides tampons	404
11.5.3	Purges continues	409
11.5.4	Réchauffage et calorifugeage	417
11.5.5	Tubulures et raccords à compression pour tubulures	426

CHAPITRE 12 - ALIMENTATION EN AIR DE COMMANDE 43

12.1	Exigences à respecter	43
12.2	Système de production	43
12.2.1	Capacité de production d'air de commande	43
12.2.2	Schéma d'un système de production	43
12.3	Système de distribution	43
12.3.1	Réseau de distribution d'air de commande	43
12.3.2	Alimentation d'un consommateur local	43
12.3.3	Alimentation d'un tableau (local ou en salle de contrôle)	43
12.4	Annexe : teneur en eau dans les gaz	44

CHAPITRE 13 - ALIMENTATIONS ÉLECTRIQUES 44

13.1	Exigences à respecter	44
13.2	Conception de la distribution BT	44
13.2.1	Principe	44
13.2.2	Régimes de neutre	44
13.2.3	Principe de la protection du personnel selon le régime de neutre	44
13.2.4	Choix du régime de neutre	44
13.2.5	Classification des charges	44
13.2.6	Autres détails de conception	45
13.3	Interfaces de conditionnement ou de protection	45
13.3.1	Perturbations sur le réseau de distribution	45
13.3.2	Principales interfaces utilisées	45
13.4	Mises à la terre	45
13.4.1	Utilité des mises à la terre	45
13.4.2	Mise à la terre des installations électriques	45
13.4.3	Mise à la terre des équipements électroniques	45
13.5	Vérifications initiale et périodique d'une installation	45

CHAPITRE 14 - APPARELS ÉLECTRIQUES POUR ATMOSPHÈRES EXPLOSIBLES UTILISÉS EN INSTRUMENTATION 46

14.1	Rappels	46
14.2	Suppression interne « p »	46
14.2.1	Définition	46
14.2.2	Principe	46
14.2.3	Réalisations couvertes par la norme	46

14.2.4	Règles pour les enveloppes à surpression interne . . .	464
14.2.5	Dispositifs de sécurité et dispositions de sécurité . . .	464
14.2.6	Exemple de réalisation avec débit continu du gaz de protection	465
14.3	Enveloppe antidéflagrante « d »	465
14.3.1	Définition	465
14.3.2	Principe	467
14.3.3	Précautions d'installation.	468
14.4	Sécurité augmentée « e »	468
14.4.1	Définition	468
14.4.2	Principe	468
14.5	Sécurité intrinsèque « i »	468
14.5.1	Définition	468
14.5.2	Principe	468
14.5.3	Barrières de sécurité intrinsèque	471
14.5.4	Catégories de matériels électriques de sûreté « i »	474
14.5.5	Document descriptif et validité d'un système de sécurité intrinsèque	475
14.5.6	Câbles et câblages	476

CHAPITRE 15 - CÂBLAGES DES INSTRUMENTS 477

15.1	Liaisons entre capteurs, actionneurs et moyens de contrôle	477
15.1.1	Architecture générale	477
15.1.2	Conception des liaisons	477
15.2	Câbles normalisés	480
15.3	Câbles d'extension et de compensation pour thermocouples	481
15.3.1	Spécifications.	481
15.3.2	Protection contre les parasites	481
15.4	Câbles d'instrumentation	485
15.4.1	Spécifications.	485
15.4.2	Protection contre les parasites	485
15.5	Réalisation « classique » des liaisons entre site et local technique	485
15.5.1	Schéma général	485
15.5.2	Boîtes de jonction	485
15.5.3	Borniers en local technique	491
15.5.4	Chemineaux	491
15.5.5	Mise à la terre des écrans et des armures	494
15.5.6	Protection contre les effets indirects de la foudre	497
15.6	Câbles et câblages en sécurité intrinsèque	499
15.6.1	Intégrité du système	499
15.6.2	Borniers	500

15.6.3	Câbles à utiliser	
15.6.4	Pose des câbles	
15.6.5	Repérage des matériels et des câbles SI	
15.6.6	Cas des réseaux de terrain	

ANNEXES

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

INDEX