

Jean-Marie Valance • Bernard Poussery

**LE CARNET
DU RÉGLEUR
MESURES ET RÉGULATION**

19^e ÉDITION

DUNOD

LES + EN

LIGNE



Pour aller plus loin et mettre toutes les chances de votre côté, des ressources complémentaires sont disponibles sur le site www.dunod.com.

Connectez-vous à la page de l'ouvrage (grâce aux menus déroulants, ou en saisissant le titre, l'auteur ou l'ISBN dans le champ de recherche de la page d'accueil). Sur la page de l'ouvrage, sous la couverture, cliquez sur le lien « LES + EN LIGNE ».

Illustration de couverture : DifferR/Shutterstock.com

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, 2007, 2009, 2011, 2014, 2017, 2022

© Valance pour les 13 premières éditions

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083685-7

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

| | |
|--|------------|
| L'histoire du <i>Carnet du Régleur</i> | XV |
| Avant-propos de l'édition initiale | XVII |
| Introduction | XIX |
| Comment utiliser le carnet ? | XX |
| 1 Préliminaires | 1 |
| 1.1 Un peu de calcul | 1 |
| 1.1.1 Les unités composées et le changement d'unités | 1 |
| 1.1.2 La règle de trois | 2 |
| 1.1.3 Fonction linéaire | 5 |
| 1.1.4 Construction graphique | 5 |
| 1.2 Le rappel indispensable des unités | 8 |
| 1.2.1 Définitions des unités de base | 8 |
| 1.2.2 Quelques unités dérivées | 9 |
| 1.3 Un peu de physique | 10 |
| 1.3.1 Forces et moments de force | 10 |
| 1.3.2 L'atome et les rayonnements | 11 |
| 1.4 Un peu d'électricité | 13 |
| 2 Notions générales | 15 |
| 2.1 Les instruments et le procédé | 15 |
| 2.1.1 Notions de capteurs-transmetteurs | 15 |
| 2.2 Les différents types d'instruments | 16 |
| 2.3 Organisation des chaînes de mesure | 17 |
| 2.4 Les signaux en instrumentation | 18 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5 Le raccordement électrique des instruments 4-20 mA | 19 |
| 2.5.1 Capteur 2 fils (capteur passif) | 19 |
| 2.5.2 Capteur 4 fils (capteur actif) | 20 |
| 2.5.3 Capteur 3 fils | 21 |
| 2.6 Interface HART | 21 |
| 2.6.1 Paramétrage | 23 |
| 2.6.2 Interface de communication HART (pockette) | 26 |
| 2.6.3 PC et logiciels de configuration | 29 |
| 2.7 Bus de terrain | 36 |
| 2.7.1 Le protocole Profibus | 36 |
| 2.7.2 Fieldbus Foundation | 37 |
| 2.8 Les transmetteurs sans fils | 39 |
| 3 Pression | 41 |
| 3.1 Définition | 41 |
| 3.2 Mécanique | 43 |
| 3.3 Définitions des différentes pressions | 43 |
| 3.3.1 La pression atmosphérique | 43 |
| 3.3.2 La pression relative | 44 |
| 3.3.3 La pression absolue | 44 |
| 3.3.4 La pression statique | 44 |
| 3.3.5 La pression dynamique | 44 |
| 3.3.6 La pression totale | 45 |
| 3.4 Hydrostatique | 45 |
| 3.4.1 La pression s'exerce perpendiculairement aux surfaces | 45 |
| 3.4.2 Sur la même horizontale, il y a la même pression (dans un liquide qui ne circule pas) | 45 |
| 3.4.3 Théorème de Pascal | 45 |
| 3.5 Les instruments de mesurage des pressions | 47 |
| 3.5.1 Colonnes de liquide | 47 |
| 3.5.2 Instruments métalliques | 49 |
| 3.5.3 Capteurs de pression | 51 |
| 3.5.4 Transmetteur numérique « intelligent » ou « smart » | 56 |
| 3.5.5 Raccordement électrique des transmetteurs de pression | 58 |
| 3.5.6 Pressostats | 59 |

| | |
|--|-----------|
| 3.6 Les moyens d'ajustage en mesurage de pression | 59 |
| 3.6.1 Simuler | 60 |
| 3.6.2 Mesurer | 60 |
| 3.6.3 Ajuster | 60 |
| 3.7 Implantation des capteurs de pression | 61 |
| 4 Débits des fluides | 63 |
| 4.1 Caractéristiques des fluides | 63 |
| 4.1.1 Masse volumique des liquides | 63 |
| 4.1.2 Masse volumique des gaz | 63 |
| 4.1.3 Densité | 64 |
| 4.2 Viscosité | 66 |
| 4.2.1 Viscosité dynamique | 67 |
| 4.2.2 Viscosité cinématique | 67 |
| 4.2.3 Relation viscosité dynamique vs viscosité cinématique | 67 |
| 4.2.4 Détermination de la viscosité | 68 |
| 4.2.5 Autres unités de viscosité | 68 |
| 4.3 Régimes d'écoulement | 68 |
| 4.4 Perte de charge | 73 |
| 4.5 Définitions des débits | 73 |
| 4.5.1 Débit volumique | 74 |
| 4.5.2 Débit massique | 74 |
| 4.6 Mesurage des débits | 75 |
| 4.6.1 Classification des méthodes | 75 |
| 4.6.2 Mesure des débits volumiques | 76 |
| 4.7 Débitmétrie des gaz – Correction en pression et en température | 100 |
| 4.8 Débitmètres massiques | 103 |
| 4.8.1 Introduction | 103 |
| 4.8.2 Débitmètres massiques à force de Coriolis | 104 |
| 4.8.3 Débitmètres massiques thermiques | 109 |
| 4.9 Longueurs droites amont et aval | 111 |
| 4.10 Choix d'une solution de débitmétrie | 112 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.11 | Contrôleurs de débit | 112 |
| 4.11.1 | Débitmètres à cible (solution mécanique) | 113 |
| 4.11.2 | Contrôleur électromagnétique (solution électronique) | 113 |
| 4.11.3 | Contrôleur de débit à partir d'un débitmètre à flotteur | 113 |
| 4.12 | Compteurs volumétriques | 114 |
| 4.12.1 | Compteur à roues ovales | 114 |
| 4.12.2 | Autre type de compteur : les compteurs à pistons rotatifs | 114 |
| 4.13 | Calculs relatifs aux débits | 115 |
| 4.13.1 | Calcul du diamètre d'une conduite | 115 |
| 4.13.2 | Calculs usuels sur les débits mesurés par organes déprimogènes | 115 |
| 4.13.3 | Calcul des organes déprimogènes | 118 |
| 4.14 | Calcul de débit gazeux | 118 |
| 4.14.1 | Quantité de gaz | 118 |
| 5 | Mesure des masses volumiques, pH et conductivité | 121 |
| 5.1 | Mesure des masses volumiques | 121 |
| 5.1.1 | Introduction | 121 |
| 5.1.2 | Mesure par source radioactive | 121 |
| 5.1.3 | Capteurs à tubes vibrants | 122 |
| 5.1.4 | Densimètre à diapason | 126 |
| 5.1.5 | Mesure de la masse volumique des gaz : densimètre à cylindre vibrant | 126 |
| 5.1.6 | Mesure par ultrasons, détection d'interface | 127 |
| 5.2 | Introductions à la pH métrie | 128 |
| 5.2.1 | Introduction | 128 |
| 5.2.2 | Notions théoriques | 128 |
| 5.2.3 | Principe de la mesure | 132 |
| 5.2.4 | Vérification et étalonnage | 143 |
| 5.3 | Mesure de conductivité | 144 |
| 5.3.1 | Notions fondamentales | 144 |
| 5.3.2 | Mesure de la conductivité d'une solution | 144 |
| 5.3.3 | Unité de conductivité | 145 |
| 5.3.4 | Dispositif de mesure de conductivité | 148 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3.5 | Étalonnage et entretien | 153 |
| 5.3.6 | Principe d'un conductimètre | 156 |
| 5.3.7 | Mise en œuvre d'une mesure de conductivité | 156 |
| 6 | Températures | 159 |
| 6.1 | Spécificités et difficultés | 159 |
| 6.1.1 | Première difficulté (ou premier sujet de réflexion) | 159 |
| 6.1.2 | Deuxième difficulté (deuxième sujet de réflexion) | 160 |
| 6.1.3 | Troisième difficulté (troisième sujet de réflexion) | 160 |
| 6.2 | Échanges thermiques | 160 |
| 6.3 | Unités | 161 |
| 6.3.1 | Étalons primaires | 163 |
| 6.3.2 | Contrôle des capteurs | 163 |
| 6.3.3 | Principes physiques utilisés pour les capteurs de températures | 164 |
| 6.4 | Organisation d'une chaîne de mesure de température | 164 |
| 6.5 | Principes des thermocouples | 165 |
| 6.5.1 | Effets thermoélectriques | 165 |
| 6.5.2 | Application de l'effet Seebeck à la mesure de température | 166 |
| 6.5.3 | Principaux types de thermocouple | 172 |
| 6.5.4 | Réalisation des thermocouples | 173 |
| 6.5.5 | Raccordement des thermocouples | 175 |
| 6.5.6 | Récepteurs spécifiques associés aux couples thermoélectriques | 176 |
| 6.5.7 | Contrôle des thermocouples et ajustage des récepteurs | 178 |
| 6.6 | Sondes à résistances | 180 |
| 6.6.1 | Notions de résistivité | 180 |
| 6.6.2 | Principe des sondes à résistance | 180 |
| 6.6.3 | Mesure de la résistance | 184 |
| 6.6.4 | Exploitation de l'information délivrée par la sonde platine | 185 |
| 6.6.5 | Travail du régleur | 186 |
| 6.6.6 | Comparaison thermocouple/Pt100 | 187 |
| 6.6.7 | Logiciel mesure des températures | 187 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.7 | Convertisseurs numériques | 188 |
| 6.8 | Mesurage optique des températures | 190 |
| 6.8.1 | Pyromètres optiques et thermomètres à infrarouge | 190 |
| 6.8.2 | Les pyromètres optiques | 195 |
| 6.8.3 | Autres appareils | 200 |
| 6.9 | Corrigés des exercices de la page 171 | 201 |
| 7 | Niveaux | 203 |
| 7.1 | Généralités | 203 |
| 7.2 | Présentation des techniques de mesurage | 204 |
| 7.2.1 | Mesurage de d | 204 |
| 7.2.2 | Mesurage de h | 204 |
| 7.2.3 | Niveau à flotteur | 205 |
| 7.2.4 | Plongeurs soumis à la poussée d'Archimède | 206 |
| 7.2.5 | Appareils utilisant des plongeurs | 207 |
| 7.3 | Mesurages de niveaux par mesurage de pression | 209 |
| 7.3.1 | Méthode hydrostatique ou mesurage direct | 210 |
| 7.3.2 | Mesurage par insufflation | 213 |
| 7.4 | Mesurage de niveaux par sonde capacitive | 215 |
| 7.5 | Mesure de niveau par ultrasons | 217 |
| 7.5.1 | Principe | 217 |
| 7.5.2 | Configuration d'un capteur | 217 |
| 7.5.3 | Positionnement du capteur | 218 |
| 7.5.4 | Points importants | 218 |
| 7.5.5 | Domaines d'application | 219 |
| 7.5.6 | Limitations d'application | 219 |
| 7.5.7 | Intérêts de la mesure de niveau par ultrasons | 219 |
| 7.5.8 | Difficultés de la mesure de niveau par ultrasons | 219 |
| 7.6 | Mesure de niveau radar | 220 |
| 7.6.1 | Introduction | 220 |
| 7.6.2 | Principe général de la mesure | 220 |
| 7.6.3 | Technologie des radars sans contact | 221 |
| 7.7 | Technologie des radars à impulsions guidées | 226 |
| 7.7.1 | Principe de fonctionnement | 226 |

| | |
|--|------------|
| 7.7.2 Les différents modèles de sonde | 227 |
| 7.7.3 Installation | 227 |
| 7.7.4 Avantages | 228 |
| 7.7.5 Domaines d'application | 228 |
| 7.7.6 Limites d'application | 228 |
| 7.8 Comparaison mesure par ultrasons contre mesure par radar | 228 |
| 7.9 Mesure de niveaux par rayons gamma (γ) | 229 |
| 7.9.1 Principe | 229 |
| 7.9.2 Quelques définitions parfois absentes des notices | 229 |
| 7.10 Technologie des détecteurs de niveau | 230 |
| 7.10.1 Systèmes vibrants | 231 |
| 7.10.2 Palette rotative | 231 |
| 7.10.3 Détecteur capacitif | 231 |
| 7.10.4 Barrière micro-ondes | 232 |
| 8 Implantation des capteurs | 233 |
| 8.1 Introduction | 233 |
| 8.2 Montage des transmetteurs | 234 |
| 8.2.1 Sur les liquides | 234 |
| 8.2.2 Sur les gaz | 234 |
| 8.2.3 Sur la vapeur | 234 |
| 8.3 Moyens de protection des capteurs | 235 |
| 8.4 Utilisation de bloc manifold | 237 |
| 9 Les organes de réglage : vannes régulatrices ou pompes à vitesse variable | 239 |
| 9.1 Introduction | 239 |
| 9.2 Vannes régulatrices - Introduction | 239 |
| 9.3 Principaux constructeurs de vannes de régulation | 240 |
| 9.4 Technologie des vannes de régulation | 240 |
| 9.4.1 Les différents modèles de vanne régulatrice | 241 |
| 9.4.2 Les actionneurs des vannes de régulation | 245 |
| 9.4.3 Positionneur | 249 |

| | |
|---|------------|
| 9.5 Calcul d'une vanne automatique | 253 |
| 9.5.1 Introduction au calcul | 253 |
| 9.5.2 Principe du dimensionnement d'une vanne de régulation | 254 |
| 9.5.3 Définition du C_v | 254 |
| 9.6 Caractéristiques de débit d'une vanne régulatrice | 257 |
| 9.6.1 Caractéristiques de débit « intrinsèque » | 258 |
| 9.6.2 Caractéristiques de débit « vanne installée » ou « caractéristique réelle » | 262 |
| 9.6.3 Autorité de la vanne | 263 |
| 9.6.4 Règle du choix de la caractéristique | 267 |
| 9.7 Entretien des vannes | 270 |
| 9.7.1 Réglages | 271 |
| 9.7.2 Mode opératoire | 271 |
| 9.8 Cavitation | 271 |
| 9.8.1 Introduction | 271 |
| 9.8.2 Cas de la cavitation | 272 |
| 9.8.3 Coefficient caractérisant la cavitation | 272 |
| 9.9 Vannes de régulation en « Split Range » ou échelle partagée | 276 |
| 9.9.1 Introduction | 276 |
| 9.9.2 Réacteur discontinu avec une réaction exothermique | 277 |
| 9.9.3 Une régulation dans un bac de neutralisation | 278 |
| 9.10 Pompes centrifuges entraînées en vitesse variable | 279 |
| 9.10.1 Rappel | 280 |
| 9.10.2 Courbe de pompe centrifuge | 280 |
| 9.10.3 Point de fonctionnement | 280 |
| 9.10.4 Modification de la vitesse de rotation en utilisant un variateur de vitesse | 282 |
| 9.10.5 Paramétrage des limites de vitesse du variateur | 285 |
| 9.10.6 Avantages et inconvénients de la variation de débit à l'aide d'une pompe centrifuge entraînée à vitesse variable | 285 |
| 9.11 Conclusion | 285 |
| 10 Accessoires | 287 |
| 10.1 L'air instrument | 287 |
| 10.1.1 Production et traitement de l'air comprimé | 288 |
| 10.1.2 Détendeurs | 290 |

| | |
|---|------------|
| 10.2 Alimentation et câblage électrique | 290 |
| 10.3 Isolation galvanique | 291 |
| 10.4 Éléments de technologie pneumatique | 292 |
| 10.4.1 Détection et amplification pneumatique | 293 |
| 10.5 Les convertisseurs P/I et I/P (Pression/Intensité et Intensité/Pression) | 297 |
| 10.5.1 Rôle | 297 |
| 10.5.2 Schéma de principe d'un convertisseur P/I | 297 |
| 10.5.3 Schéma de principe d'un convertisseur I/P | 299 |
| 10.6 Les instruments de calcul (opérateurs analogiques ou numériques) | 299 |
| 10.6.1 Règles d'écriture en « échelle normalisée » | 300 |
| 10.6.2 Calcul en « échelle normalisée » | 300 |
| 11 Régulateur et boucle de régulation | 303 |
| 11.1 Introduction | 303 |
| 11.2 Besoin de régulation | 303 |
| 11.3 Constitution d'une boucle de régulation | 304 |
| 11.4 Le régulateur | 305 |
| 11.4.1 Schéma de principe d'un régulateur PID | 306 |
| 11.4.2 Modes de fonctionnement d'un régulateur Auto/Manu | 307 |
| 11.4.3 Sens d'action d'un régulateur | 307 |
| 11.5 Objectifs d'une boucle de régulation | 309 |
| 11.6 Les actions PID (proportionnelle, intégrale et dérivée) | 310 |
| 11.6.1 Fonction proportionnelle | 310 |
| 11.6.2 La fonction intégrale | 315 |
| 11.6.3 Fonction dérivée | 319 |
| 11.7 Configuration d'un régulateur numérique | 329 |
| 11.8 Vérification du fonctionnement d'un régulateur | 330 |
| 12 Procédé | 333 |
| 12.1 Introduction | 333 |
| 12.2 Étude du procédé en vue de la régulation | 333 |
| 12.3 Réponse du procédé | 334 |
| 12.4 Procédé naturellement stable et procédé naturellement instable | 335 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 12.5 | Obtention des réponses des procédés | 336 |
| 12.6 | Étude des réponses des procédés naturellement stables | 336 |
| 12.6.1 | Gain statique | 337 |
| 12.6.2 | Constante de temps | 337 |
| 12.6.3 | Temps de réponse | 337 |
| 12.7 | Étude des réponses des procédés naturellement instables | 339 |
| 12.8 | Identification de procédé | 340 |
| 12.9 | Identification en mode automatique | 340 |
| 12.9.1 | Procédés naturellement stables | 341 |
| 12.9.2 | Procédés naturellement instables | 342 |
| 12.10 | Limites | 342 |
| 13 | Schémas de régulation et mise en œuvre | 343 |
| 13.1 | Schémas fonctionnels | 343 |
| 13.1.1 | Régulation en « boucle fermée » | 343 |
| 13.1.2 | Automatisme en « chaîne ouverte » | 343 |
| 13.1.3 | Régulation mixte (« boucle fermée » + « chaîne ouverte ») | 344 |
| 13.1.4 | Régulation cascade | 344 |
| 13.2 | Régulation discontinue | 345 |
| 13.2.1 | Action « Tout ou Rien » (discontinue) | 345 |
| 13.2.2 | Régulation flottante (discontinue) | 345 |
| 13.3 | Calculs des réglages PID | 345 |
| 13.3.1 | Régulation proportionnelle | 345 |
| 13.3.2 | Action P + I | 347 |
| 13.3.3 | Action dérivée | 347 |
| 13.4 | Mise en service d'une régulation | 347 |
| 13.4.1 | Instructions de mise en service d'une boucle simple | 347 |
| 13.4.2 | Mise en service d'une régulation mixte | 349 |
| 13.4.3 | Mise en service d'une régulation cascade | 349 |
| 13.5 | Cas particuliers | 350 |
| 13.6 | Régulation numérique et Système numérique de contrôle commande (SNCC) | 350 |

| | |
|---|------------|
| 14 Notions complémentaires | 353 |
| 14.1 Notions de métrologie | 353 |
| 14.1.1 Définitions | 353 |
| 14.1.2 Incertitudes de mesure | 358 |
| 14.1.3 Démarches de l'instrumentiste | 360 |
| 14.2 Instrumentation en zone ATEX | 367 |
| 14.2.1 Définition d'une atmosphère explosive (ATEX) | 367 |
| 14.2.2 Comment une ATEX peut-elle exploser ? | 368 |
| 14.2.3 Modes de protection des matériels ATEX | 369 |
| 14.2.4 Directives européennes ATEX | 371 |
| 14.3 Les sécurités instrumentées et le SIL (<i>Safety Integrated Level</i>) | 373 |
| 14.3.1 Le risque industriel | 373 |
| 14.3.2 La norme IEC 61511 | 374 |
| 14.3.3 L'approche probabiliste du risque (LOPA) | 374 |
| 14.3.4 La conception de la fonction SIL | 376 |
| 14.3.5 La mise en œuvre d'un système de sécurité instrumenté | 377 |
| 14.3.6 La maintenance du système de sécurité instrumenté | 378 |
| 14.3.7 Les avantages de l'approche IEC 61511 pour les sécurités | 379 |
| 14.4 Notions sur les ultrasons | 379 |
| 14.5 Application de la loi de Coriolis à la débitmètrie | 381 |
| Index | 389 |

Annexes (les annexes sont à télécharger sur le site www.dunod.com)

| |
|---|
| A.1 Alphabet grec |
| A.2 Unités |
| A.3 Unités USA |
| A.4 Puissance et énergie |
| A.5 Décibel (dB) |
| A.6 Bruit |
| A.7 Compatibilité électromagnétique (CEM) |
| A.8 Désignation des tubes |
| A.9 Perte de charge |

- A.10 Dilatation des métaux
- A.11 Eau
- A.12 Masses volumiques et caractéristiques de divers solides
- A.13 Masses volumiques des liquides
- A.14 Masses volumiques des gaz
- A.15 g, coefficient d'accélération de la pesanteur
- A.16 Humidité (mesure d')
- A.17 Humidité de l'air « point de rosée »
- A.18 Indice de protection (IP)
- A.19 Log et log
- A.20 Trigonométrie
- A.21 Moyennes arithmétiques, géométriques, quadratiques
- A.22 Notations du calcul opérationnel
- A.23 Fonction de transfert du 1^{er} ordre
- A.24 Analyse liquide – Quelques notions
- A.25 Résistivité et conductivité d'un liquide
- A.26 Constante diélectrique
- A.27 Poussée d'Archimède
- A.28 Pouvoirs calorifiques
- A.29 Représentation conventionnelle et repérage des instruments
- A.30 Teintes conventionnelles
- A.31 Table de référence des Sondes Platine Pt 100
- A.32 Table de référence des couples J
- A.33 Table de référence des couples K
- A.34 Table de référence des couples N
- A.35 Table de référence des couples T
- A.36 Table de référence des couples S
- A.37 Table de référence des couples E
- A.38 Table de référence des couples B
- A.39 Température de fusion
- A.40 Transmission de chaleur
- A.41 Exemples de calcul
- A.42 Équation du transmetteur
- A.43 Profil de vitesse

L'histoire du *Carnet du Régleur*

Michel Feuillent, Jacques Guinet, Bernard Poussery, Co-auteurs du Carnet du Régleur, tiennent à rendre un grand hommage à Jean-Marie Valance, le « père » de cette bible de la profession.

Ce livre a une histoire : celle d'un homme Jean-Marie Valance, celle de jumeaux Jean-Marie et son frère Jean-Claude, celle d'un couple : Jean-Marie et Corinne, celle de trois collègues et amis Jacques Guinet, Michel Feuillent et moi-même.

Jean-Marie Valance était un homme d'expérience. Il commença sa carrière d'ingénieur comme régleur en instrumentation dans les différentes centrales nucléaires où la société Comsip était chargée de la régulation et des automatismes.

En 1969, Daniel Dindeleux alors Directeur de l'Institut de Régulation et d'Automatisation d'Arles, le recrute comme Ingénieur Formateur. Jean Marie dispensait les cours en instrumentation et régulation, à différents niveaux. Au début des années 80, il prend conscience qu'il n'existe, dans la littérature technique française, aucun ouvrage de vulgarisation sur les techniques de mesures industrielles et de régulation. Il décide donc de combler ce manque.

Son livre, il l'imagine pratique. Il doit apporter les réponses aux questions que se posent les techniciens instrumentistes (les régleurs) dans la pratique quotidienne de leur métier. L'ouvrage doit être à portée de main... et dans la caisse à outils.

Jean-Marie se met alors en quête d'un éditeur. Sans même avoir vu le livre, les éditeurs techniques contactés valident immédiatement le projet. Un seul point de blocage : le prix envisagé. Jean-Marie le trouve trop élevé, il ne souhaite pas que le prix soit un obstacle.

Il abandonne son poste d'ingénieur-formateur pour se mettre en travailleur indépendant comme auteur, éditeur...

Pour obtenir les fonds nécessaires à son entreprise, il vend une partie de ses biens personnels.

Son frère jumeau, pharmacien de son état, a apporté une large contribution... Leur collaboration était symbolisée par un dessin, situé en 4^e de couverture, représentant deux petits bonshommes qui se tiennent par la main.

Jean-Marie était bien connu dans le métier, il introduit des pages de publicité pour couvrir les frais de réalisation. Tous les grands noms de l'instrumentation répondront favorablement à sa demande.

Lors de la première édition, Jean-Marie a dû tout créer. Les moyens informatiques de l'époque étaient balbutiants. Pour les textes, ce n'était pas compliqué : Jean-Marie connaissait l'histoire par cœur. Mais, la frappe des équations n'était pas très conviviale, et surtout le dessin des figures. Jean-Marie a ciselé avec patience (et humour) toutes les illustrations.... Ça a été un vrai travail de moine.

Le livre a vu le jour.

Les ouvrages de cette première édition se sont vendus par le bouche-à-oreille.

Les choses se sont ensuite mieux organisées. Corinne était présente sur les salons professionnels, elle s'occupait également de l'avant-vente ainsi que des différents aspects commerciaux.

À chaque édition, pour tenir compte de l'évolution des techniques de mesure et de régulation, le *Carnet du Régleur* était mis à jour, amélioré, complété. En 2003, l'état de santé de Jean-Marie s'étant dégradé, il n'eut plus la capacité d'actualiser l'ouvrage. Corinne a alors sollicité deux amis : Jacques Guinet et Michel Feuillent. Ils ont travaillé en restant le plus fidèle possible à son esprit qui était de faire du *Carnet du Régleur* « l'élément indispensable de la boîte à outils du régleur ».

Jusqu'à la 17^e édition, Jacques et Michel ont assuré l'évolution du livre. Tâche plus difficile qu'il n'y paraît : il fallait respecter l'état d'esprit du *Carnet* tout en intégrant de nouveaux chapitres.

En 2007, pour la 14^e édition, Corinne confie la réalisation de l'ouvrage aux Éditions Dunod. Cette évolution a permis de rénover complètement le graphisme et la mise en page. Le *Carnet* a connu une véritable cure de jouvence.

Pour ma part, j'ai commencé à collaborer au *Carnet*, sans que mon nom n'apparaisse, à partir de 2004 (13^e édition). Ma contribution était modeste.

C'est à partir de la 17^e que j'apparais comme co-auteur, le 4^e, Jacques et Michel m'ayant demandé d'assurer la relève.

Lors de la 18^e édition, Jacques et Michel m'ont laissé « les clés du camion » ! Je tiens à remercier Corinne, Jacques et Michel de la confiance qu'ils m'ont accordée.

De la 1^{re} édition (1984) à la 18^e, le *Carnet du Régleur* s'est vendu à plus de 40 000 exemplaires (sans compter les éditions « pirates »... il existerait une même version russe).

Aujourd'hui, j'ai le plaisir de vous présenter cette 19^e édition. Cette version a été mise à jour, le nombre de pages a été augmenté, de nouveaux thèmes ont été introduits. Pour gagner la place nécessaire, les annexes seront à télécharger depuis le site Internet de Dunod.

Le *Carnet* a été le compagnon de route de ma vie professionnelle, je souhaite au lecteur qu'il en soit de même pour lui.

Jacques Guinet et Michel Feuillent, ainsi que Daniel Dindeleux, ont été mes maîtres, ils m'ont communiqué leur passion du métier et m'ont fait partager leur expérience.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Claude Tourniaire, Laurent Roy, Michel Feuillent et Alain Lundahl pour l'aide qu'ils m'ont apportée.

Bernard POUSSERY
Ingénieur CNAM
4^e co-auteur du *Carnet du Régleur*

Avant-propos de l'édition initiale

C'était dans les années 1950 ; élève de l'enseignement technique, j'étais, pendant les vacances scolaires, en stage dans l'usine de produits chimiques où travaillait mon père. « Nous nous sommes occupés de la puissance », a-t-il dit en parlant de sa génération, « la vôtre fera le système nerveux de tout cela, elle s'occupera de l'information ».

Après le diplôme, Comsip m'a permis de démarrer dans le métier comme je le souhaitais : en déplacement, les outils à la main. En 1969, j'ai rencontré Daniel Dindeleux dans une baraque de chantier en Arles : l'Institut de Régulation démarrait.

Daniel Dindeleux m'a appris comment d'une théorie même compliquée, on peut tirer une pratique simple et quotidienne. Lorsque nous l'avons quitté, treize ans après, l'IRA était connu un peu partout dans le monde. La formation continue était devenue une nécessité pour suivre l'évolution technologique.

Et ça continue ! Vite, très vite...

De nombreux capteurs sont dits « intelligents » car ils prennent en compte certaines variations de leur environnement, la température par exemple (le terme est plutôt surprenant : il n'est pas utilisé pour les plantes qui font cela depuis toujours...).

La multiplication des micro-ordinateurs permet de traiter, en grand nombre et quasi instantanément, toutes sortes d'informations. Ce traitement peut s'effectuer pratiquement n'importe où grâce aux réseaux (y compris à très grandes distances avec la télématique).

Il fallait insister sur les techniques de base qui demeurent utiles, voilà l'esprit du *Carnet du régleur*. J'espère qu'il rendra service à tous ceux qui, dans leur métier, côtoient l'appareillage de mesure et de régulation.

À tous ceux-là : bon courage.

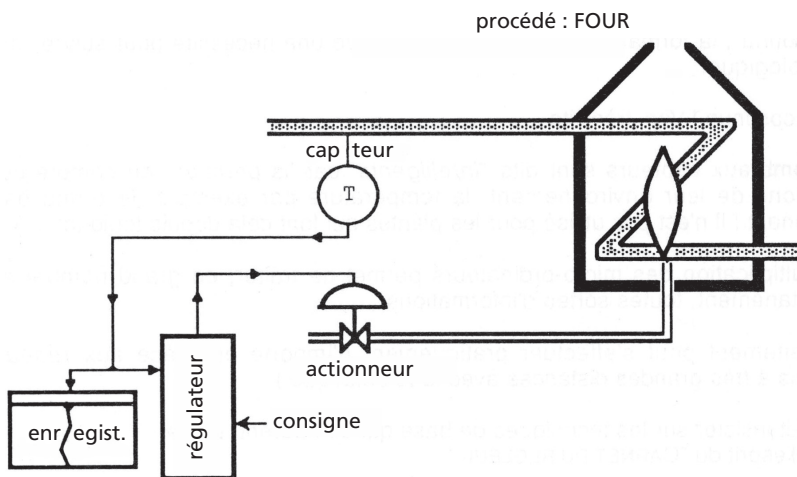
Cordialement,

Jean-Marie VALANCE
Ingénieur ENSCM/ENSMM
Régleur, animateur de formation,
auteur, éditeur...

Introduction

Pour construire une boucle de régulation, comme le montre la figure ci-dessous, pour réguler la température de produit sortant d'un four, il faut :

- ▶ **Obtenir des informations** sur l'état du procédé (pression, débit, température, niveau, etc.) qui devront être envoyées aux autres appareils de la boucle. Ceci fait l'objet des chapitres 3 à 7 concernant les mesures : **Pressions, Débits, Masse volumique, Températures et Niveaux**.
- ▶ **Mettre en place les instruments et les raccorder électriquement**, ces aspects sont traités au chapitre 2 **Notions générales** et au chapitre 8 **Implantation des capteurs**.
- ▶ **Indiquer, enregistrer, transformer** les signaux, toutes ces fonctions sont étudiées dans le chapitre 10 **Accessoires**.
- ▶ **Agir sur le procédé** pour modifier son état, c'est le rôle des actionneurs : cela est traité au chapitre 9 sur les **Vannes** et les pompes à vitesse variable.
- ▶ **Comparer** la valeur de la grandeur mesurée à la valeur souhaitée par l'exploitant (consigne) et **commander** l'actionneur en fonction de l'écart entre ces deux valeurs, c'est le rôle du **régulateur** vu au chapitre 11.



- ▶ Pour modifier la grandeur mesurée, il faut **connaître** la façon dont elle évolue quand on agit sur la grandeur de réglage, c'est l'étude du **Procédé** au chapitre 12.

- ▶ **Choisir** le (ou les) régulateur(s), étudier les réglages permettant d'obtenir, quelles que soient les perturbations, une grandeur réglée stable et proche de la consigne, c'est l'art de la **Régulation** abordée au chapitre 13.

Les **Préliminaires** (chapitre 1) paraîtront fastidieux mais il est indispensable de les connaître pour comprendre les explications des chapitres qui suivent.

Des **indications complémentaires** et quelques chiffres, souvent utiles, sont donnés au chapitre 14 et en **annexes**.

Comment utiliser le carnet ?

1. Il est possible de lire le carnet comme un cours ; dans ce cas, il faut prévoir plusieurs semaines : un texte technique n'est pas un roman !
2. L'accès à un sujet précis est facile en utilisant la table des matières ou l'index.
3. Vous pouvez aussi procéder comme bon vous semble... après tout c'est vous qui lisez !

Le carnet ne peut pas être un catalogue de solutions immédiates aux problèmes de mesures et régulation mais il peut aider le régleur en instrumentation à chercher des solutions et il doit servir d'outil, parmi d'autres, pour l'acquisition de connaissances dans la pratique de l'instrumentation, dans l'art du mesurage et dans les techniques de régulation.

Dans ce livre, comme dans la pratique industrielle, il y a des choses simples et d'autres plus compliquées : il n'est pas nécessaire d'avoir compris toutes les choses compliquées pour tirer profit des choses simples !

Remarques

R1

Certaines **méthodes de calcul** paraissent longues et fastidieuses ; en fait, ce sont les explications très détaillées qui sont longues ; les méthodes elles-mêmes sont simples, rapides et sûres, sinon elles ne seraient pas dans le carnet... ! Les calculs sont facilités par les logiciels que téléchargeables sur www.dunod.com

R2

Normalisation : nous reconnaissons tous l'importance de la normalisation dans notre activité professionnelle comme dans la vie quotidienne (si la visserie n'était pas normalisée ? Quel cauchemar !).

Alors pourquoi ne pas participer à cet effort collectif en modifiant (un peu) nos habitudes pour cette nécessité ?

- Utiliser les unités SI ou dire « l'ajustage d'un transmetteur » (le mettre au juste !) ne complique pas trop le travail, et quel avantage d'utiliser ce vocabulaire international défini par les normes !
- « Étalonnage » est en principe réservé à ceux qui disposent d'un « étalon » officiel.
- « Ajustage » n'est pas facile d'emploi pour ceux qui (comme l'auteur) en ont fait à la lime, pourtant l'expression « mise au juste d'un instrument de mesure » ne manque pas de charme.

R3

Capteurs-transmetteurs : dans les appareils de mesure, il y a généralement une partie capteur et une partie transmetteur. Il est souvent important de distinguer ces deux parties. L'appellation de ces appareils devrait être « capteur-transmetteur » mais c'est un peu long ; en pratique, il est utilisé un seul de ces termes, étant entendu qu'un capteur qui ne transmet rien n'intéresse personne en régulation, pas plus qu'un transmetteur qui ne capte rien !

R4

Électronique/numérique : la technologie du matériel numérique appartient au domaine très général de l'électronique, mais la différence entre les instruments « analogiques » (mA, mV) et les instruments « numériques » (chiffres) est tellement importante que l'on considérera deux familles distinctes : « la régulation électronique » dans laquelle l'information circule sous la forme d'un courant standard (4-20 mA) et la « régulation numérique » où la transmission est faite par des impulsions représentant des nombres.

R5

Choix des unités pour un calcul : lorsqu'il n'y a que deux grandeurs en présence, on peut choisir les unités les plus commodes pour le calcul ; avec trois grandeurs ou plus, il n'y a plus le choix : il faut utiliser les unités SI.

R6

10^5 , 10^{-6} , etc. (« dix puissance cinq, dix moins six, etc. ») : **les puissances de dix** sont un moyen commode d'écrire les nombres comportant beaucoup de zéros, mais elles présentent peu d'intérêt dans l'utilisation des calculettes. Elles ne seront pratiquement pas utilisées dans le carnet.



Préliminaires

1.1 Un peu de calcul

L'entretien des instruments de mesure et régulation n'exige pas des connaissances mathématiques importantes ; en revanche, il faut savoir effectuer rapidement et sûrement de nombreux petits calculs.

Compte tenu de l'état d'énergie et/ou de fatigue durant une intervention, il est bon d'acquiescer pour ces calculs un « automatisme... infaillible ».

1.1.1 Les unités composées et le changement d'unités

Deux exemples de conversion :

- ▶ 144 km/h = combien de m/s ?
- ▶ 8 l/s = combien de m³/h ?

Il y a un truc : écrire les unités composées sous leur forme réelle, puis changer les unités simples.

144 km à l'heure (ou par heure) = 144 km divisés par une heure.

144 km = 144 000 m.

1 h = 3 600 s

$$\frac{144 \text{ km}}{1 \text{ h}} = \frac{144\,000 \text{ m}}{3\,600 \text{ s}} = \frac{144\,000 \text{ m}}{3\,600 \text{ s}}$$

et annoncer : 144 km/h = 40 m/s.

L'autre exemple : 8 l/s = combien de m³/h ?

$8 \text{ l} = \frac{8}{1\,000} \text{ m}^3$ Notez l'utilisation des fractions, beaucoup plus sûre que l'écriture avec des 0 (8 l = 0,008 m³).

$$1 \text{ s} = \frac{1}{3\,600} \text{ h.}$$

$\frac{8 \text{ l}}{1 \text{ s}} = \frac{\frac{8}{1\,000} \text{ m}^3}{\frac{1}{3\,600} \text{ h}}$ Impressionnante fraction de fractions, mais rappelez-vous : **on ne divise pas par une fraction, on multiplie par l'inverse.**

$$\frac{8 \text{ l}}{1 \text{ s}} = \frac{8}{1\,000} \times \frac{3\,600}{1} = 28,8 \text{ m}^3/\text{h}$$

Entraînez-vous avec :

25 kg/mn = ? tonne/h (1,5)

60 m/s = ? km/h (216)

24 tonnes/h = ? kg/s (6,66)

La calculatrice donne beaucoup trop de chiffres derrière la virgule. Il serait ridicule d'écrire $24 \text{ tonnes/h} = 6,6666666 \text{ kg/s}$: le dernier chiffre représente le dixième de milligramme !

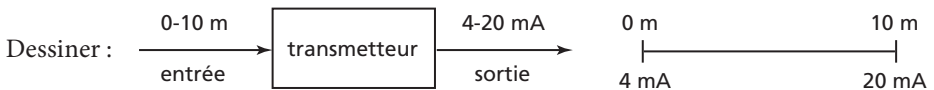
1.1.2 La règle de trois

Un transmetteur de niveau donne un signal de sortie variant de 4 à 20 mA quand le niveau varie de 0 à 10 m. Quel est le niveau si le signal est de 14 mA ?

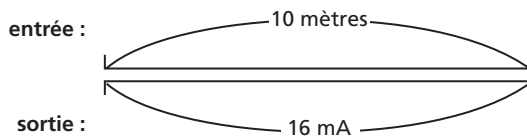
Ce genre de questions se pose constamment pour toutes les grandeurs converties en signaux standards (4 à 20 mA, 3 à 15 PSI, 200 à 1 000 mbar).

Le piège est que ces signaux sont « décalés » : le zéro de la mesure ne correspond pas à 0 mA, 0 PSI, ou 0 mbar !

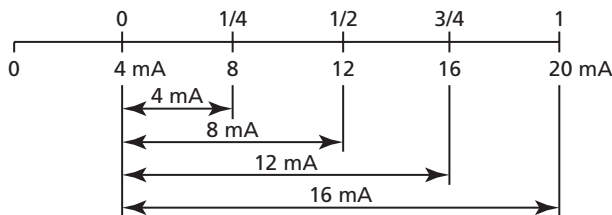
Le truc consiste à utiliser une représentation graphique c'est-à-dire un papier, un crayon et un croquis ! Utiliser directement une calculatrice est une erreur : le résultat sera certainement faux. Il vaut mieux commencer par un croquis¹.



Cette représentation de l'information est reprise au chapitre « Notions générales », mais il faut déjà remarquer les notions d'« échelle d'entrée » et d'« échelle de sortie ».



Pour le signal de sortie, les nombres à utiliser dans les calculs ne sont pas les valeurs du signal :



1. Voir Remarque R1 de l'avant-propos.

1.1 Un peu de calcul

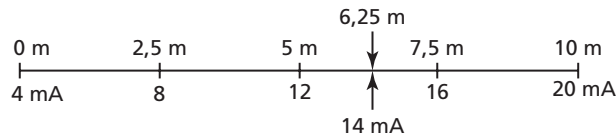
Puisque le « zéro » est à 4 mA : 20 mA sur l'échelle représentent 16 mA dans les calculs (20 - 4). La moitié de l'échelle est à 12 mA (12 - 4 = 8 dans les calculs), le 1/4 de l'échelle est à 8 mA (8 - 4 = 4 dans les calculs), etc. D'où l'intérêt de faire un croquis !

Écrire la règle de trois : $\frac{1 \times 3}{2}$

1. On cherche des mètres, commencer par la pleine échelle en mètres (10 m).
2. Diviser par l'autre échelle (16 mA).
3. Multiplier par la donnée de la question (14 - 4 = 10 mA).

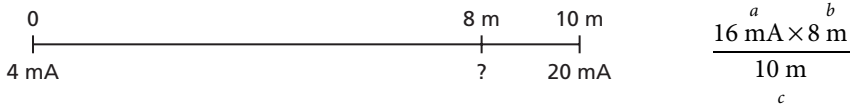
En écrivant les unités, on vérifie, en « simplifiant » qu'il reste des m (c'est ce que l'on cherche) : $\frac{10 \text{ m} \times 10 \text{ mA}}{16 \text{ mA}} = 6,25 \text{ m}$.

Vérification immédiate en situant sur le croquis le résultat qui vient d'être trouvé.



6,25 m apparaît en meilleure position que les 7 m ou 8,75 m qu'on aurait pu trouver en oubliant le décalage d'échelle.

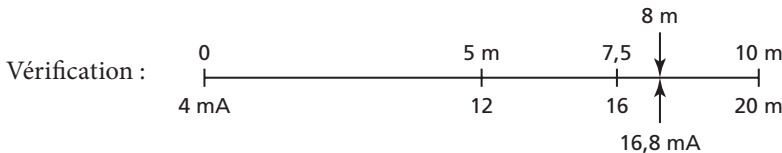
Autre exemple : même capteur-transmetteur que ci-dessus. Le niveau est de 8 m, combien de mA doit-il y avoir en sortie ?



1. On cherche des mA, on commence par l'échelle en mA.
2. On divise par l'autre échelle.
3. La donnée.

$$\frac{16 \text{ mA} \times 8 \text{ m}}{10 \text{ m}} = 12,8 \text{ mA}$$

Attention signal décalé : $\frac{+4 \text{ mA}}{16,8 \text{ mA}}$

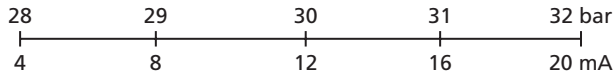


Sur le croquis : à 8 m correspond un signal entre 16 et 20 mA, les 12,8 mA ne collent pas, c'est là qu'on se rappelle de + 4 mA, et à nouveau de l'intérêt du croquis !

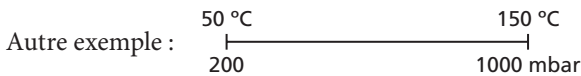
Double décalage : un capteur-transmetteur de pression électronique (4-20 mA) a une échelle de 28 à 32 bars (si la valeur normale de fonctionnement se situe aux environs

de 30 bars, le fait d'utiliser une échelle réduite autour de cette valeur rend le capteur-transmetteur nettement plus sensible).

1. Quelle est la valeur du signal pour une pression de 30 bars ?
2. Quelle est la pression si le signal est à 16 mA ?



Réponses : 1. 12 mA et 2. 31 bars (sans utiliser de calculatrice).

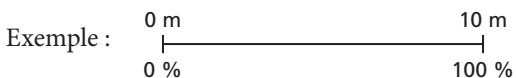


1. Quelle est la température si le signal est à 820 mbar ?
2. Quel est le signal pour 90 °C ?

$$1. \frac{100 \text{ °C} \times \frac{820 \text{ mbar} - 200 \text{ mbar}}{1000 \text{ mbar}}}{\frac{150 \text{ °C} - 50 \text{ °C}}{800 \text{ mbar}}} = \frac{77,5 \text{ °C}}{127,5 \text{ °C}}$$

$$2. \frac{800 \text{ mbar} \times \frac{90 \text{ °C} - 50 \text{ °C}}{100 \text{ °C}}}{\frac{1000 \text{ mbar} - 200 \text{ mbar}}{520 \text{ mbar}}} = \frac{320 \text{ mbar}}{520 \text{ mbar}}$$

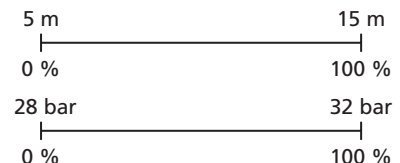
La règle de trois est évidemment plus simple si la sortie est exprimée en pourcentage de variation.



C'est-à-dire quand la valeur d'entrée varie du mini au maxi, la sortie varie de 0 à 100 %.

Cela revient à dire 4 mA, 3 PSI ou 200 mbar = 0 % et 20 mA, 15 PSI ou 1 000 mbar = 100 %.

La pleine échelle est 100 % ; la demi-échelle est 50 % ; le quart d'échelle est 25 %, etc.



Dans ce cas, le décalage du signal disparaît des calculs. L'instrumentiste devra toutefois retenir que 0 % correspond à 4 mA, 3 PSI ou 200 mbar. Autrement dit, à 0 % le signal de sortie n'est pas nul (le signal de sortie est nul seulement si l'alimentation du capteur-transmetteur ou sa liaison est coupée !).

Remarque : l'utilisation de % s'applique aussi bien aux variations de l'entrée du capteur-transmetteur (grandeur mesurée) qu'aux variations du signal de sortie (4 à 20 mA, 3 à