

Jean-Marie Valance  
Jacques Guinet

Michel Feuillent  
Bernard Poussery

# **Le carnet du régleur**

**Mesures et régulation**

17<sup>e</sup> édition

DUNOD

Illustration de couverture :  
© creativenature.nl – Fotolia.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<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

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

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

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

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



© Dunod, Paris, 2007, 2009, 2011, 2014  
© Valance pour les 13 premières éditions  
978-2-10-071684-5

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

---

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

---

INTRODUCTION .....	3
--------------------	---

---

CHAPITRE 1 - PRÉLIMINAIRES .....	7
----------------------------------	---

---

1.1 Un peu de calcul .....	7
1.1.1 Les unités composées et le changement d'unités .....	7
1.1.2 La règle de trois .....	8
1.1.3 Fonction linéaire .....	12
1.1.4 Construction graphique .....	13
1.2 Le rappel indispensable des unités .....	16
1.3 Un peu de physique .....	18
1.3.1 Forces et moments de force .....	18
1.3.2 L'atome et les rayonnements .....	21
1.4 Un peu d'électricité .....	23
1.5 Notions de métrologie .....	25
1.5.1 Grandeurs et unités .....	25
1.5.2 Mesurages .....	26
1.5.3 Résultats de mesure .....	27
1.5.4 Instruments de mesure .....	29
1.5.5 Caractéristiques des instruments de mesure .....	29
1.5.6 Étalons .....	31
1.6 Incertitudes de mesure .....	31
1.6.1 Évaluation des incertitudes de mesures .....	32

1.7	Démarches de l'instrumentiste	34
1.7.1	Généralités	34
1.7.2	Précision	35
1.7.3	Calculs d'erreur	35
1.7.4	Application à une chaîne de mesurage	36
1.7.5	Niveau de confiance – Limites de confiance – Probabilités	37
1.7.6	Cause d'erreur dans les mesurages	37
1.7.7	Exemples d'application	38

---

## CHAPITRE 2 - PRESSION

---

2.1	Définition	43
2.2	Mécanique	44
2.3	Hydrostatique	44
2.3.1	La pression s'exerce perpendiculairement aux surfaces	44
2.3.2	Sur la même horizontale, il y a la même pression (dans un liquide qui ne circule pas)	45
2.3.3	Théorème de Pascal	45
2.4	Les instruments de mesurage des pressions	48
2.4.1	Les colonnes de liquide	48
2.4.2	Les instruments métalliques	50
2.4.3	Unité de pression	50
2.5	Les moyens d'ajustage en mesurage de pression	51
2.5.1	Implantation des capteurs de pression	54
2.5.2	Pressostats	54
2.5.3	Cas du vide	55
2.5.4	Manomètres électroniques	55

---

## CHAPITRE 3 - TRANSMETTEURS

---

3.1	Mesurage et transmission	57
3.1.1	Capteurs-transmetteurs	57
3.1.2	Transmission	58
3.2	Transmetteurs pneumatiques	59
3.2.1	Technologie des instruments pneumatiques	59
3.2.2	Détection et amplification pneumatique	60
3.3	Systèmes asservis	64
3.3.1	Fonction de transfert	64
3.3.2	Boucle de réaction	64
3.3.3	Les transmetteurs à balance de forces	66

3.4	Instrumentation électronique (4 - 20 mA et numérique) . . . . .	68
3.4.1	Ajustage des instruments électroniques . . . . .	69
3.4.2	Mesure du signal 4 - 20 mA . . . . .	69
3.4.3	Contrôle de fonctionnement . . . . .	70
3.4.4	Réparation . . . . .	71
3.5	Transmetteur numérique « intelligent » ou « smart » . . . . .	71
3.5.1	Interface HART . . . . .	72
3.5.2	Le protocole Profibus . . . . .	78
3.5.3	L'interface Fieldbus Foundation . . . . .	79
3.5.4	Les transmetteurs sans fils . . . . .	82
<hr/>		
	CHAPITRE 4 - DÉBITS DES FLUIDES . . . . .	83
<hr/>		
4.1	Écoulement . . . . .	84
4.2	Viscosité . . . . .	85
4.2.1	Viscosité dynamique . . . . .	85
4.2.2	Viscosité cinématique . . . . .	85
4.3	Perte de charge . . . . .	86
4.4	Mesurage des débits . . . . .	87
4.4.1	Classification des méthodes . . . . .	87
4.4.2	Compteurs volumétriques . . . . .	88
4.4.3	Mesure de vitesse . . . . .	88
4.4.4	Mesure de vitesse indirecte . . . . .	98
4.4.5	Débitmètre à section variable . . . . .	106
4.5	Calculs relatifs aux débits . . . . .	115
4.5.1	Calcul du diamètre d'une conduite . . . . .	115
4.5.2	Calculs usuels sur les débits mesurés par organes déprimogènes . . . . .	115
4.5.3	Calcul des organes déprimogènes . . . . .	118
4.6	Débit de gaz . . . . .	118
4.6.1	Quantité de gaz . . . . .	118
4.6.2	Masse volumique des gaz . . . . .	121
4.7	Correction des débits en fonction de la pression et de la température . . . . .	125
4.7.1	Schéma de montage . . . . .	126
4.7.2	Calcul des paramètres des modules de correction . . . . .	127

CHAPITRE 5 - TEMPÉRATURES . . . . .	131
5.1 Unités . . . . .	132
5.1.1 Étalons primaires . . . . .	134
5.1.2 Contrôle des capteurs . . . . .	134
5.1.3 Principes physiques utilisés pour les capteurs de températures . . . . .	134
5.2 Principes des thermocouples . . . . .	135
5.2.1 Effets thermoélectriques . . . . .	135
5.2.2 Câbles de compensation . . . . .	140
5.2.3 Couples gainés . . . . .	140
5.2.4 Récepteurs associés aux couples thermo-électriques . . .	143
5.2.5 Contrôle et ajustage des récepteurs . . . . .	146
5.3 Sondes à résistances . . . . .	147
5.4 Mesurage optique des températures . . . . .	153
5.4.1 Pyromètres optiques . . . . .	153
5.5 Corrigés des exercices . . . . .	164
CHAPITRE 6 - NIVEAUX . . . . .	165
6.1 Généralités . . . . .	165
6.2 Présentation des techniques de mesurage . . . . .	166
6.2.1 Mesurage de d . . . . .	166
6.2.2 Mesurage de h . . . . .	166
6.2.3 Plongeurs soumis à la poussée d'Archimède . . . . .	167
6.2.4 Appareils utilisant des plongeurs . . . . .	169
6.3 Ajustage des niveaux à plongeurs . . . . .	171
6.3.1 Ajustage sur place avec un liquide . . . . .	171
6.3.2 Ajustage avec des masses . . . . .	171
6.3.3 Observations sur les niveaux à plongeurs . . . . .	171
6.4 Mesurages de niveaux par mesurage de pression . . . . .	172
6.4.1 Mesurage direct . . . . .	172
6.4.2 Mesurage par insufflation . . . . .	175
6.5 Mesurage de niveaux par sonde capacitive . . . . .	180
6.6 Mesure de niveaux par rayons gamma (g) . . . . .	181
6.6.1 Principe . . . . .	181
6.6.2 Quelques définitions qui ne sont pas toujours dans les notices . . . . .	182
6.7 Mesure de distance par sons et ultrasons . . . . .	183

6.8	Mesure de niveau radar . . . . .	183
6.8.1	Principe général de la mesure . . . . .	183
6.8.2	Les différents types d'antenne et de sondes . . . . .	185
6.8.3	Problème de l'angle d'émission des antennes . . . . .	186
6.8.4	Avancées technologiques récentes . . . . .	187
<hr/>		
	CHAPITRE 7 - ACCESSOIRES . . . . .	189
<hr/>		
7.1	L'air comprimé . . . . .	189
7.1.1	Les compresseurs . . . . .	189
7.1.2	Détendeurs . . . . .	191
7.2	Alimentation et câblage électrique . . . . .	192
7.3	Atmosphères explosives . . . . .	193
7.3.1	Définition d'une ATEX . . . . .	193
7.3.2	Comment une ATEX peut-elle exploser ? . . . . .	194
7.3.3	Modes de protection des matériels ATEX . . . . .	195
7.3.4	Directives européennes ATEX . . . . .	197
7.4	Les sécurités instrumentées et le SIL . . . . .	199
7.4.1	Le risque industriel . . . . .	199
7.4.2	La norme IEC61511 . . . . .	200
7.4.3	L'approche probabiliste du risque (LOPA) . . . . .	201
7.4.4	La conception de la fonction SIL . . . . .	202
7.4.5	La mise en œuvre d'un système de sécurité instrumenté . . . . .	204
7.4.6	La maintenance du système de sécurité instrumenté . . . . .	205
7.4.7	Avantages de l'approche IEC61511 pour les sécurités . . . . .	206
7.5	Les convertisseurs P/I et I/P (Pression/Intensité et Intensité/Pression) . . . . .	206
7.5.1	Rôle . . . . .	206
7.5.2	Schéma de principe d'un convertisseur P/I . . . . .	207
7.5.3	Schéma de principe d'un convertisseur I/P . . . . .	207
7.6	Les indicateurs et les enregistreurs de signaux standard . . . . .	208
7.7	Les instruments de calcul (opérateurs analogiques ou numériques) . . . . .	208
7.7.1	Règles d'écriture en « échelle normalisée » . . . . .	209
7.7.2	Calcul en « échelle normalisée » . . . . .	210

CHAPITRE 8 - IMPLANTATION DES CAPTEURS . . . . .	213
8.1 Montage des transmetteurs . . . . .	214
8.1.1 Sur les liquides . . . . .	214
8.1.2 Sur les gaz . . . . .	214
8.1.3 Sur la vapeur . . . . .	214
8.1.4 Utilisation de bloc manifold . . . . .	215
CHAPITRE 9 - VANNES . . . . .	217
9.1 Calcul d'une vanne automatique . . . . .	219
9.1.1 Lois de variation du débit en fonction de la course du clapet . . . . .	220
9.1.2 Caractéristiques de débit « intrinsèque » . . . . .	221
9.1.3 Caractéristiques de débit « vanne installée » ou « caractéristique réelle » . . . . .	223
9.2 Entretien des vannes . . . . .	230
9.2.1 Réglages . . . . .	230
9.2.2 Mode opératoire . . . . .	231
9.3 Positionneur . . . . .	231
9.3.1 Rôle . . . . .	231
9.3.2 Positionneur pneumatique à balance de forces . . . . .	232
9.3.3 Positionneur à came . . . . .	233
9.3.4 Positionneurs numériques . . . . .	234
9.4 Cavitation . . . . .	234
9.4.1 Cas de la cavitation . . . . .	234
9.4.2 Définition du Cf . . . . .	235
9.5 Autres actionneurs . . . . .	238
9.5.1 Commande de puissance par thyristors . . . . .	238
9.5.2 Commande de vitesse . . . . .	239
9.6 Communication avec les vannes . . . . .	240
9.6.1 Communication locale . . . . .	240
9.6.2 Communication avec Hart . . . . .	240
9.6.3 Communication par Bus . . . . .	241
9.7 Split Range ou échelle partagée . . . . .	241
9.7.1 Réacteur discontinu avec une réaction exothermique . . . . .	241
9.7.2 Une régulation dans un bac de neutralisation . . . . .	242

CHAPITRE 10 - RÉGULATEUR	245
10.1 La fonction proportionnelle	246
10.1.1 Application au régulateur	246
10.1.2 Direct/Inverse	247
10.1.3 Vérification de la fonction P sur un régulateur isolé	249
10.2 La fonction intégrale	249
10.2.1 Définition d'une fonction du temps	249
10.2.2 Intégrale d'une fonction du temps	250
10.2.3 Régulateur P + I	251
10.3 La fonction dérivée	255
10.3.1 Dérivée d'un échelon	257
10.3.2 Dérivée d'une fonction linéaire	258
10.4 Les actions du régulateur PID	260
10.4.1 L'action proportionnelle ou « P », le régulateur étant en direct	260
10.4.2 L'action intégrale ou « I »	261
CHAPITRE 11 - PROCÉDÉ	267
11.1 Étude du procédé en vue de la régulation	267
11.2 Réponse du procédé	269
11.3 Procédé naturellement stable et procédé naturellement instable	270
11.4 Obtention des réponses des procédés	271
11.5 Étude des réponses des procédés naturellement stables	271
11.5.1 Gain statique	272
11.5.2 Constante de temps	272
11.5.3 Temps de réponse	273
11.6 Étude des réponses des procédés naturellement instables	275
11.7 Identification de procédé	275
11.8 Identification en automatique	276
11.8.1 Procédés naturellement stables	276
11.8.2 Procédés naturellement instables	278
11.9 Limites	278

CHAPITRE 12 - RÉGULATION . . . . .	279
12.1 Schémas fonctionnels . . . . .	279
12.1.1 Régulation en « boucle fermée » . . . . .	279
12.1.2 Automatismes en « chaîne ouverte » . . . . .	280
12.1.3 Régulation mixte (« boucle fermée » + « chaîne ouverte ») . . . . .	280
12.1.4 Régulation cascade . . . . .	281
12.2 Action du régulateur en régulation . . . . .	282
12.2.1 Action « Tout ou Rien » (discontinue) . . . . .	282
12.2.2 Régulation flottante (discontinue) . . . . .	282
12.2.3 Régulation proportionnelle (continue) . . . . .	282
12.2.4 Action P + I (continue) . . . . .	284
12.2.5 Action dérivée . . . . .	284
12.3 Passage MANU/AUTO et AUTO/MANU . . . . .	285
12.4 Mise en service d'une régulation . . . . .	285
12.4.1 Instructions de mise en service d'une boucle simple . . . . .	285
12.4.2 Mise en service d'une régulation mixte . . . . .	287
12.4.3 Mise en service d'une régulation cascade . . . . .	288
12.5 Cas particuliers . . . . .	289
12.6 Régulation numérique . . . . .	289
CHAPITRE 13 - TECHNOLOGIE PNEUMATIQUE . . . . .	293
13.1 Schéma technologique d'un régulateur P . . . . .	293
13.2 Schéma technologique d'un régulateur P + I . . . . .	295
13.3 Alignement . . . . .	296
ANNEXES . . . . .	297
A.1 Alphabet grec . . . . .	297
A.2 Bruit . . . . .	298
A.3 Compatibilité électromagnétique (CEM) . . . . .	299
A.4 Quelques composants électroniques . . . . .	300
A.5 Décibel (dB) . . . . .	301
A.6 Désignation des tubes . . . . .	302
A.7 Dilatation des métaux . . . . .	302
A.8 Eau . . . . .	303
A.9 Fibre optique . . . . .	305

A.10	Fonction de transfert du 1er ordre	306
A.11	g	307
A.12	Humidité de l'air « point de rosée »	308
A.13	Humidité (mesure d')	309
A.14	Indice de protection (IP)	310
A.15	Log et log	311
A.16	Masses volumiques et caractéristiques de divers solides	312
A.17	Masses volumiques des liquides	312
A.18	Masses volumiques des gaz	313
A.19	Moyennes arithmétiques, géométriques, quadratiques	314
A.20	Notations du calcul opérationnel	314
A.21	Perte de charge	316
A.22	pH	317
A.23	Poussée d'Archimède	322
A.24	Pouvoirs calorifiques	323
A.25	« Pt 100 » table	325
A.26	Puissance et énergie	325
A.27	Représentation conventionnelle	326
A.28	Teintes conventionnelles	327
A.29	Table de conversion couple K	329
A.30	Table de conversion couple C	331
A.31	Table de conversion couple K	332
A.32	Table de conversion couple J	333
A.33	Table de conversion couple S	334
A.34	Table de conversion couple X	335
A.35	Table de conversion couple E	337
A.36	Table de conversion couple B	338
A.37	Température de fusion	339
A.38	Transmission de chaleur	339
A.39	Trigonométrie	340
A.40	Unités	341
A.41	Unités USA	346
A.42	« Voludéprimomètres » (diaphragmes, tuyères...)	348
A.43	Exemples de calcul	350
A.43.1	Diamètre de perçage d'une plaque à orifice	350
A.43.2	Calcul de la pression différentielle donnée par une tuyère débit vapeur	351
A.43.3	Calcul de la pression différentielle donnée par une sonde ANNUBAR	352

A.43.4	Calcul de la pression différentielle donnée par une sonde ANNUBAR . . . . .	353
A.43.5	Calcul du diamètre d'une conduite . . . . .	354
A.43.6	Calcul de la tension de vapeur du pentane . . . . .	355
A.43.7	Calcul du facteur de compressibilité de l'azote . . . . .	356
A.43.8	Calcul du Cv d'une vanne pour un liquide . . . . .	357
A.43.9	Calcul du Cv d'une vanne pour un gaz . . . . .	358
A.43.10	Correction des débits en pression et température . . . . .	359
A.43.11	Température . . . . .	360
A.44	Équation du transmetteur . . . . .	361
A.45	Profil de vitesse . . . . .	364
<hr/>		
GLOSSAIRE	. . . . .	365
<hr/>		
INDEX	. . . . .	367
<hr/>		

### RESSOURCES NUMÉRIQUES

Des **suppléments en ligne, gratuits**, sont **téléchargeables sur la page associée à l'ouvrage sur le site [dunod.com](http://dunod.com)**. Ils complètent l'ouvrage et proposent :

- calcul des éléments déprimogènes (plaque à orifice, tuyère, venturi) ;
- calcul des sondes ANNUBAR (types 61 à 85, diamant II, 485) ;
- calcul instrumentiste (diamètre conduite, vitesse, nombre de Reynolds, tension de vapeur, coefficient de compressibilité, viscosité) ;
- calcul des vannes de régulation ;
- débits corrigés (gaz en fonction de la pression et de la température) ;
- conversion  $\text{Nm}^3/\text{h}$  ;
- mesures de température (tables pour sonde Pt100 et thermocouples) ;
- équation du transmetteur (détermine le signal 4 à 20 mA pour la valeur physique) ;
- calcul venturi conduite rectangulaire ;
- calcul des plongeurs pour les transmetteurs de niveau à tube de torsion.

# **A**VANT-PROPOS

## **Avant-propos de la 17<sup>e</sup> édition**

2014 voit paraître la 17<sup>e</sup> édition du *Carnet du Régleur* qui fête également cette année, son trentième anniversaire.

En tant que co-auteurs, nous tenons à rendre un grand hommage à Jean-Marie Valance, le « père » de cette bible de la profession.

Jean-Marie Valance débuta 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, il rejoint en Arles Daniel Dindeleux, dans le cadre d'un projet de la Chambre de Commerce d'Arles. Ce projet, ébauché depuis une cabane de chantier, générera l'Institut de Régulation d'Arles, devenu leader en formation dans le domaine du contrôle-commande des procédés industriels, et en expertise auprès des entreprises industrielles dans leurs gestions des compétences et leurs évolutions technologiques, depuis plus de 40 ans.

En 1984, regrettant l'absence d'un ouvrage technique de référence pour la profession, il mit sa compétence, son expérience et sa pédagogie savamment dosée d'humour dans la rédaction du *Carnet du Régleur* et l'édita lui-même pour le rendre accessible à tous les régleurs.

En 2003, nous apportons pour la première fois des ajouts et des mises à jour afin d'aider notre ami Jean-Marie, gravement touché par la maladie. Nous avons travaillé en restant le plus fidèles possible à son esprit qui était de faire du Carnet « l'élément indispensable de la boîte à outils du régleur ».

En 2007, l'édition du Carnet fut reprise par Dunod.

Pour la 17<sup>e</sup> édition, dans l'objectif de pérenniser cet ouvrage pour les années à venir, nous avons fait appel à un nouveau co-auteur, Bernard Poussery (régleur, ingénieur et formateur) qui, nous en sommes persuadés, assurera la relève avec brio.

Nous remercions Messieurs Claude Tourniaire et Laurent Roy pour leur collaboration.

Michel FEUILLENT,  
Jacques GUINET.

## **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.

D. 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.

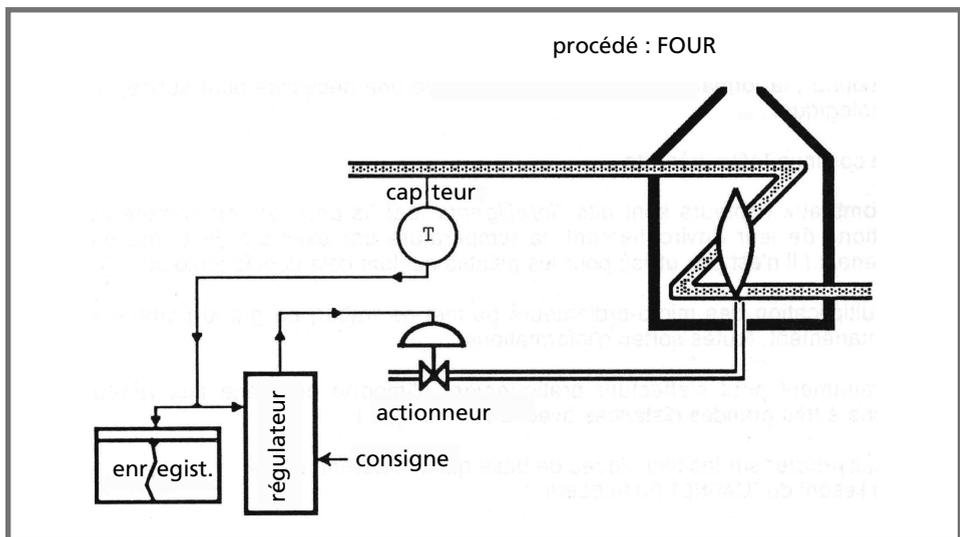
À tous ceux-là : Bon courage. Cordialement,

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 2 à 6 concernant les mesures : **Pressions, Transmetteurs, Débits, Températures** et **Niveaux**.
- **Indiquer, enregistrer, transformer** les signaux, toutes ces fonctions sont étudiées dans le chapitre 7 **Accessoires**.
- **Agir sur le procédé** pour modifier son état, c'est le rôle des actionneurs : cela est traité au chapitre 9 sur les **Vannes**.
- **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 10.



- 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 11.
- **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 12.

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 en **annexes**.

### Comment utiliser le carnet ?

1. Il est possible de lire le carnet comme un cours ; dans ce cas, 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.

---

#### REMARQUE

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

---

Les paragraphes dont la marge est bordée d'un trait noir contiennent des exemples, des calculs ou des détails qu'il n'est pas indispensable de lire lors de la « première lecture ». Ils seront très utiles quand il sera nécessaire de faire un calcul similaire.

### 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... !

---

---

## 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 qu'il sera considéré 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.

---

# P RÉLIMINAIRES

## 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'énervernement 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>).

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

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

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 :

$$25 \text{ kg/mn} = ? \text{ tonne/h} \quad (1,5)$$

$$60 \text{ m/s} = ? \text{ km/h} \quad (216)$$

$$24 \text{ tonnes/h} = ? \text{ kg/s} \quad (6,66)$$

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

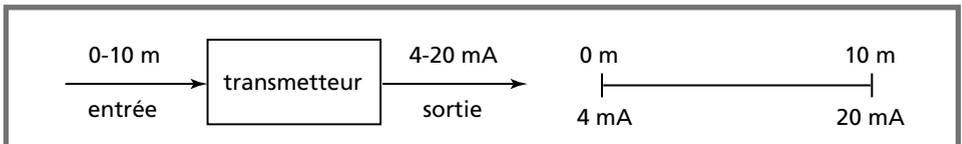
Un transmetteur de niveau donne un signal de sortie variant de 4 à 20 mA quand le niveau varie de 0 à 10 m. Quel est le niveau si le signal est de 14 mA ?

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 !

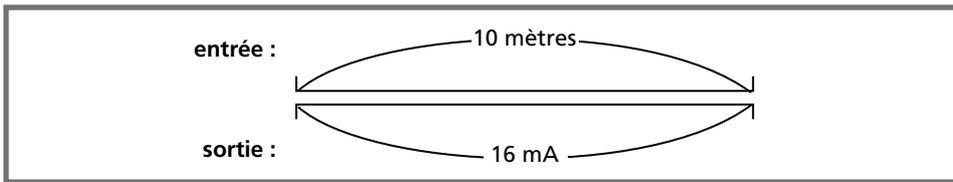
Le truc consiste à utiliser une représentation graphique c'est-à-dire un papier, un crayon et un croquis ! Utiliser directement une calculette est une erreur : le résultat sera certainement faux. Il vaut mieux commencer par un croquis<sup>1</sup>.

Dessiner :

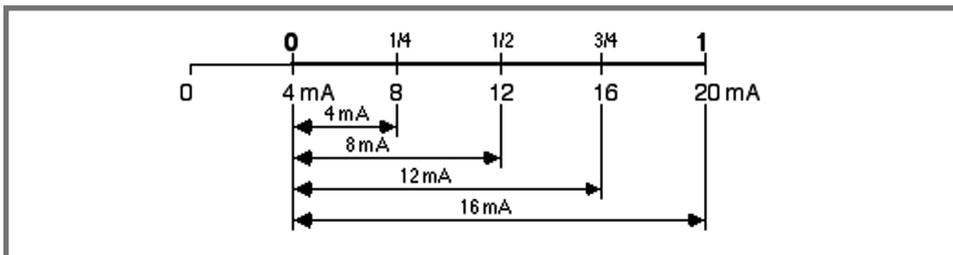


Cette représentation de l'information est reprise au chapitre « Transmetteurs », mais il faut déjà remarquer les notions d'« échelle d'entrée » et d'« échelle de sortie ».

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



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



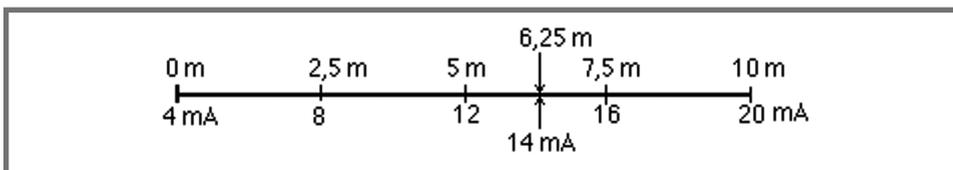
Puisque le « zéro » est à 4 mA : 20 mA sur l'échelle représentent 16 mA dans les calculs (20-4). La moitié de l'échelle est à 12 mA (12-4 = 8 dans les calculs), le 1/4 de l'échelle est à 8 mA (8-4 = 4 dans les calculs), etc. D'où l'intérêt de faire un croquis !

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 ?



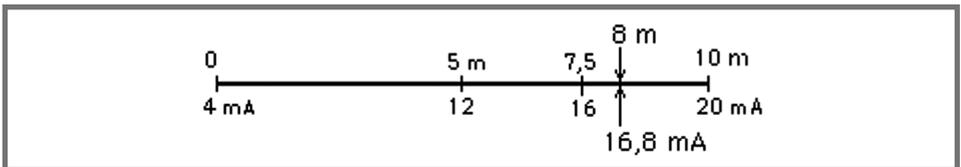
$$\frac{16 \text{ mA} \times 8 \text{ m}}{10 \text{ m}}$$

- On cherche des mA, on commence par l'échelle en mA
- On divise par l'autre échelle
- La donnée

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

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

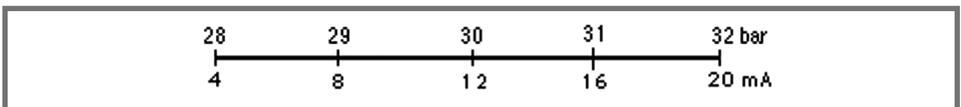
Vérification :



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 !

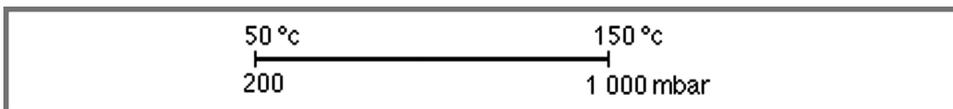
Double décalage : un capteur-transmetteur de pression électronique (4-20 mA) a une échelle de 28 à 32 bars (si la valeur normale de fonctionnement se situe aux environs de 30 bars, le fait d'utiliser une échelle réduite autour de cette valeur rend le capteur-transmetteur nettement plus sensible).

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



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

Autre exemple :



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

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

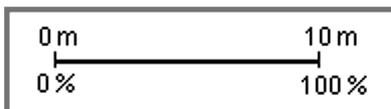
+ 50 (décalage des °C)  
127,5 °C

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

+ 200 mbar décalage du signal  
520 mbar

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

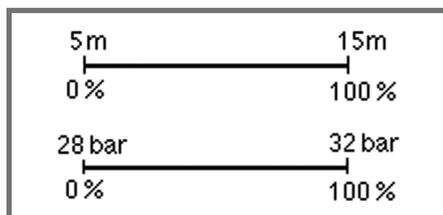
Exemple :



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 %.

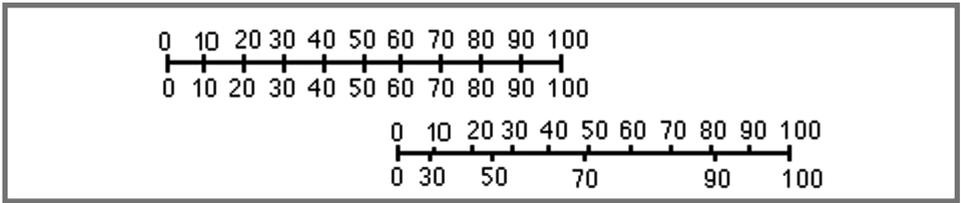
La pleine échelle est 100 % ;  
la demi-échelle est 50 % ; le quart d'échelle est 25 %, etc.



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 15 PSI, 200 à 1 000 mbar). De toute façon, quand tout va bien, si la mesure varie de 0 à 100 %, le signal de sortie varie lui aussi de 0 à 100 % !

Mais attention, on peut avoir deux cas :

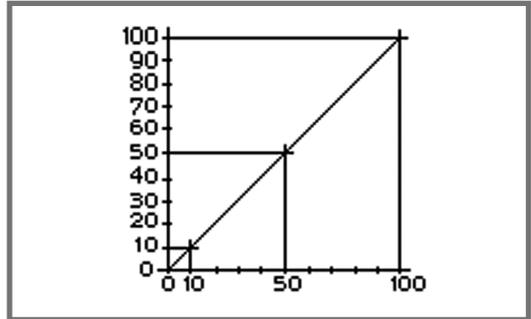
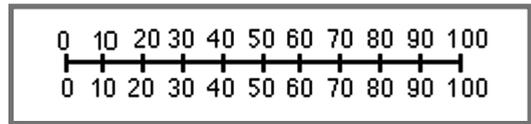


La règle de trois ne s'applique que dans le premier cas.

### 1.1.3 Fonction linéaire

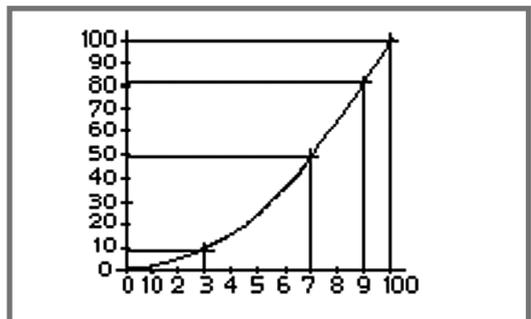
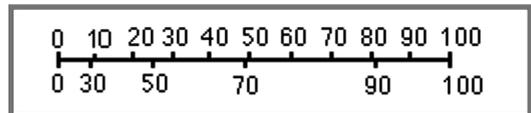
Lorsqu'on a un cas comme le premier (ci-contre), on dit que « la relation entre l'entrée et la sortie est linéaire » ou que « la sortie est une fonction linéaire de l'entrée » ou que « le signal de sortie est proportionnel à la grandeur mesurée ».

Pourquoi dit-on « linéaire » ? Parce que la représentation graphique de la relation entre l'entrée et la sortie est une ligne droite.



Si on a un cas comme le second (ci-contre), la sortie est une fonction quadratique, elle est proportionnelle au carré de l'entrée (c'est souvent le cas des débits, mais ce n'est pas le seul cas de fonction non linéaire).

La représentation graphique d'une fonction quadratique est une parabole (ci-contre) :



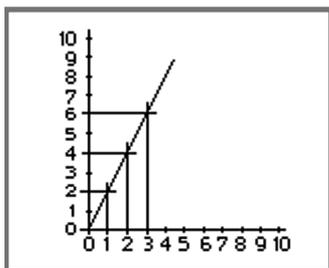
La fonction linéaire est la fonction mathématique la plus utilisée en mesure et régulation. Il convient donc de bien en connaître les propriétés.

### 1.1.4 Construction graphique

Mathématique : la représentation graphique d'une droite correspond à la relation  $s = k \times e$

où  $k$  est une constante, c'est-à-dire un nombre quelconque mais connu (ou facile à connaître).

Exemple :  $s = 2 \times e$   
( $k = 2$ )



Tracé du graphique : se donner des valeurs pour  $e$  et calculer  $s$  :

Si $e = 0$	$s = 2 \times 0 = 0$
Si $e = 1$	$s = 2 \times 1 = 2$
Si $e = 2$	$s = 2 \times 2 = 4$
Si $e = 3$	$s = 2 \times 3 = 6$

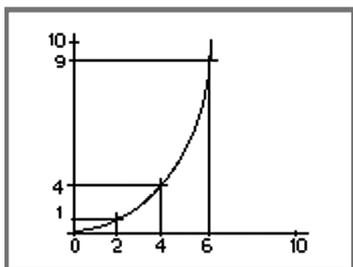
Avec les couples  $(0,0)$   $(1,2)$   $(2,4)$   $(3,6)$  etc., tracer des points comme à la « bataille navale ».

#### REMARQUE

Tous les graphiques représentant une relation entre deux grandeurs sont faciles à construire : prendre l'initiative d'inventer des valeurs pour une des grandeurs et calculer les valeurs de l'autre avec la relation. Quand il y a assez de points, tracer la courbe.

Exemple :  $P = \frac{1}{4} F^2$  soit  $P = \frac{1}{4}(F \times F)$

Cette relation pourrait se rencontrer en mesure de débit ( $F$ ) par pression différentielle ( $P$ ).



$$F = 0 \longrightarrow P = 0$$

$$F = 2 \longrightarrow P = 1$$

$$F = 4 \longrightarrow P = 4$$

$$F = 6 \longrightarrow P = 9$$

Décalage du zéro :



Lorsqu'il y a décalage du zéro, la relation s'écrit sous la forme :

$$s = k \times e + b^1$$

Ainsi la relation entre e et s s'écrit :

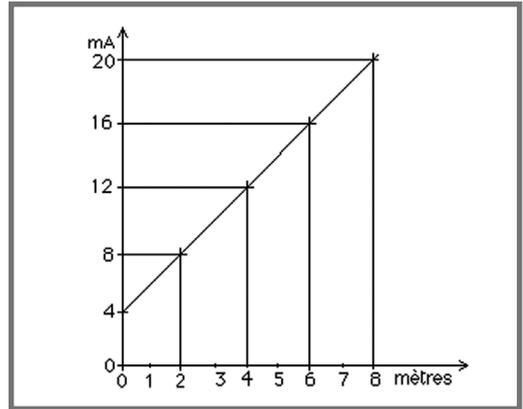
$$s = 2 \times e + 4$$

$$k = 2 \quad (2 = 16 \text{ mA} / 8 \text{ m})$$

$$b = 4$$

Le point (0,0) n'est pas sur la droite.

+4 indique le décalage.



Souvent nous sommes confrontés à des nouveaux termes. Pour les matheux, c'est simple : c'est une loi du type  $y = a^x$

Pour ceux qui ont oublié les maths, ou qui ne sont pas allés jusque-là, ces termes doivent être démystifiés.

Intéressons-nous aux puissances du chiffre 2.

$$2^2 = 2 \times 2 = 4$$

$$2^4 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$$

$$2^8 = 2 \times 2 = 256 \text{ et aussi,}$$

$$2^8 = 2^2 \times 2^6 = 2^3 \times 2^5$$

Donc, on peut obtenir le résultat de  $2^n$  en décomposant n pour obtenir des puissances de 2 déjà calculées :

$$2^{10} = 2^2 \times 2^8 = 4 \times 256 = 1\,024 \text{ et ça, c'est très intéressant !}$$

**Bien retenir que :**  $2^{10} = 1\,024 \approx 1\,000 = 10^3$

**Pour simplifier, en informatique :**  $2^{10} = 1\,024 \approx 1\,000 = 1\text{ k}$

1. b est aussi une constante.

**Donc, 1 kbit comprend en réalité 1 024 bits, et 1 koctet comprend donc 1 024 octets (1 octet étant un groupe de 8 bits), alors 8 192 bits  $\leftrightarrow$  8 kbits.**

Maintenant, nous allons pouvoir faire de magnifiques calculs démontrant la grande vitesse d'évolution d'une fonction exponentielle... si le nombre à multiplier est supérieur à 1 – car lorsqu'il est inférieur à 1, c'est le contraire, plus on va loin, plus on avance lentement.

Prenons un exemple avec 2, donc on ira loin et le résultat variera à grande vitesse. En pliant une feuille de papier de 0,1 mm, nous obtenons deux épaisseurs, soit 0,2 mm, en pliant une deuxième fois : 0,4 mm... et au bout de la 43<sup>e</sup> fois ?

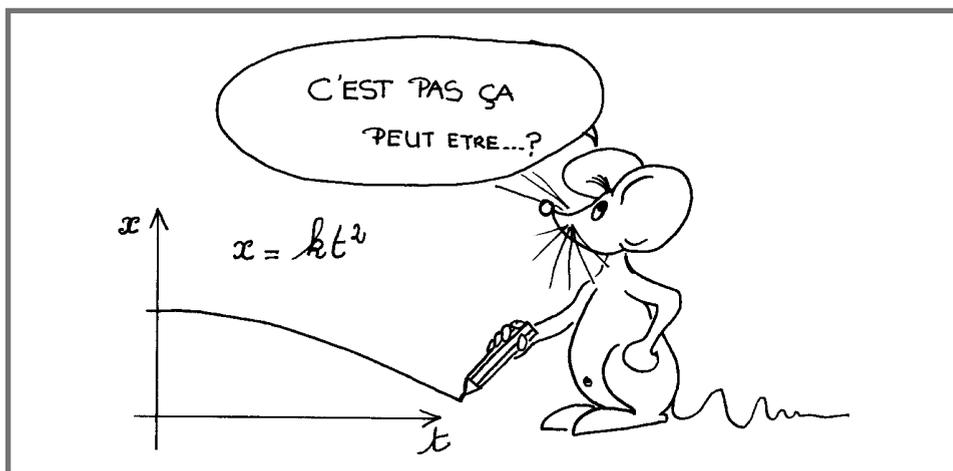
Nombre d'épaisseurs :  $2^{10} \times 2^{10} \times 2^{10} \times 2^{10} \times 2 \times 2$  soit

$$\approx 1\,000 \times 1\,000 \times 1\,000 \times 1\,000 \times 4$$

= on divise par 10 millions pour obtenir des km, et nous obtenons 400 000 kilomètres : nous avons dépassé la distance de la terre à la lune...

C'est ça « la fonction exponentielle ».

Voilà un bon moyen pour voyager, auquel Jules Verne n'avait pas pensé. Mais beaucoup d'entre nous font encore moins d'effort pour être dans notre grand satellite...



## 1.2 Le rappel indispensable des unités

Le Système International d'unités (SI) est obligatoire en France depuis 1962.

Il est fondé sur :

### 7 unités de base :

Grandeur	Nom	Symbole
Longueur	Mètre	m
Masse	Kilogramme	kg
Temps	Seconde	s
Intensité du courant électrique	Ampère	A
Température thermodynamique	Kelvin	K
Quantité de matière	Mole	mol
Intensité lumineuse	Candela	cd

### 2 unités supplémentaires :

Grandeur	Nom	Symbole
Angle plan	RADIAN	rad
Angle solide	STÉRADIAN	sr

### Définitions des unités de base

#### LE MÈTRE

Aujourd'hui, la définition s'appuie sur la longueur d'onde d'une radiation.

Le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueur d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux  $2p_{10}$  et  $5d_5$  de l'atome de Krypton 86.

#### LE KILOGRAMME

Masse du prototype international en platine iridié.

#### LA SECONDE

La seconde est rattachée au mouvement orbital de la terre.

La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

#### L'AMPÈRE

L'ampère est l'intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placé à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre les conducteurs une force égale à  $2 \cdot 10^{-7}$  newton par mètre de longueur.

## LE KELVIN

Le kelvin est la fraction  $1/273,15$  de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

## LA MOLE

La mole est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12.

## LA CANDELA

La candela est l'intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de  $1/600\,000$  mètre carré d'un corps noir à la température de solidification du platine sous la pression de 101 325 newtons par mètre carré.

**Quelques unités dérivées**

Grandeur	Combinaison	Unité	Symbole
Surface	Longueur x longueur	Mètre carré	m <sup>2</sup>
Volume	Longueur x longueur x longueur	Mètre cube	m <sup>3</sup>
Masse volumique	Masse / volume	Kilogramme mètre cube	kg/m <sup>3</sup>
Vitesse	Longueur / temps	Mètre seconde	m/s
Accélération	Vitesse / temps	Mètre seconde seconde	m/s <sup>2</sup>
Force	Masse x accélération	Newton	N
Pression	Force / surface	Pascal	Pa

D'autres unités sont indiquées dans l'annexe « Unités ».

1. Le poids d'un corps est une **force** due à « l'attraction universelle » (loi de Newton<sup>1</sup>).

Le poids est égal au produit de la masse du corps (kilogrammes) par l'accélération de la pesanteur à l'endroit où il se trouve.

L'accélération de la pesanteur (symbole :  $g$ , unité : m/s/s) est variable avec l'altitude et la latitude<sup>2</sup>.

Donc le poids d'un objet ( $p = m \times g$ , en newtons) est variable ; en revanche sa masse est une constante (exprimée en kilogrammes).

Dans la vie courante, on continue à utiliser un vocabulaire imprécis sous prétexte qu'il n'y a pas de confusion possible ; ainsi on parle de poids pour une balance alors qu'il s'agit de masses : elles sont marquées en grammes et kilogrammes !

- 
1. Sir Isaac Newton (1642-1727), astronome, mathématicien, philosophe et physicien anglais :
    1. « Deux corps s'attirent en raison directe de leurs masses et en raison inverse du carré de la distance de leurs forces de gravité ».
    2. « Force = masse  $\times$  accélération » ( $F = m \cdot \gamma$  « gamma »)
  2. Voir annexe G.

2. Le **bar** (symbole : bar) n'est pas l'unité du SI. C'est un sous-multiple du pascal (symbole : Pa) utilisé à titre transitoire car sa valeur est proche de l'ancienne unité  $\text{kgf/cm}^2$ , dont l'usage est absolument proscrit en France depuis 1962.

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

3. La **masse volumique** d'un corps, souvent désignée par le symbole  $\rho$  (lettre grecque rhô) est la masse en kilogramme d'un mètre cube de ce corps. On dit aussi masse spécifique car c'est une caractéristique spécifique du corps. Pour les liquides et les solides :  $\rho = 1\,000 \times d$  : le nombre exprimant la masse volumique (en  $\text{kg/m}^3$ ) est égal à 1 000 fois la densité par rapport à l'eau. Pas d'unité pour la densité, c'est un rapport de masses (masse d'un volume du corps divisée par la masse du même volume d'eau).

Tout le monde sait que « l'eau, ça fait un kilogramme par litre ». Pour  $1 \text{ m}^3$  (1 000 l), « ça fait » donc 1 000 kg  $\rightarrow \rho_{\text{eau}} = 1\,000 \text{ kg/m}^3$  et  $d = 1$ .

Si la densité est de 1,2 alors  $\rho = 1\,200 \text{ kg/m}^3$ .

Pour les gaz, la densité (qu'il vaut mieux ne pas utiliser) est donnée par rapport à l'air<sup>1</sup>.

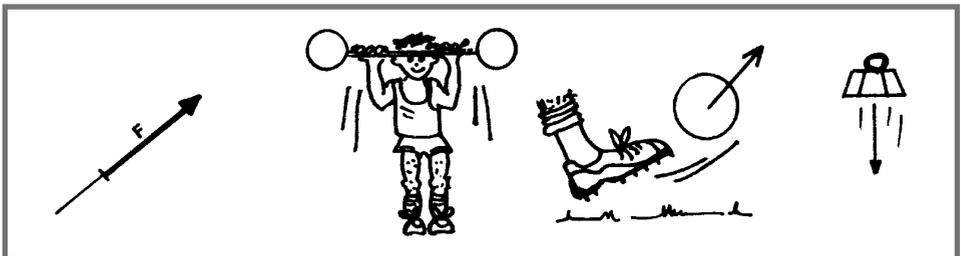
Le **poids volumique** ou poids spécifique des corps, c'est le poids (en newton) d'un mètre cube du corps, désigné par le symbole  $\varpi$  (pi) ; il est lié à la masse volumique par la relation :  $\varpi = \rho \cdot g$  où l'on retrouve accélération de la pesanteur.

## 1.3 Un peu de physique

### 1.3.1 Forces et moments de force

#### Force

L'intuition aidée de quelques souvenirs scolaires fait que tout un chacun a une petite idée de la notion de force, mais pour utiliser et calculer des forces (comme nous aurons à le faire, en mesure de niveaux par exemple), il convient de préciser cette notion.



1. Voir « Débit de gaz », page 118.