

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	15
<b>Chapitre 1. Ejecteurs à liquide et éjecteurs à gaz</b> . . . . .	17
1.1. Généralités – Principe de l'éjecteur . . . . .	17
1.2. L'éjecteur liquide-liquide . . . . .	18
1.2.1. Les paramètres du problème . . . . .	18
1.2.2. Recherche de l'équation caractéristique . . . . .	19
1.3. Ejecteurs à gaz : thermocompresseurs . . . . .	22
1.3.1. Les paramètres du problème . . . . .	22
1.3.2. Débit et vitesse du fluide moteur . . . . .	23
1.3.3. Débit et vitesse du fluide aspiré. . . . .	24
1.3.4. Consommation spécifique $\sigma$ . . . . .	25
1.3.5. Etude du mélange des deux gaz. . . . .	25
1.3.6. Taux de compression global. . . . .	28
1.4. Utilisation pratique des éjecteurs et thermocompresseurs. . . . .	31
1.4.1. Intérêts de ces appareils . . . . .	31
1.4.2. Taux de compression et montage des éjecteurs . . . . .	31
1.4.3. Similitude entre gaz aspirés . . . . .	32
1.4.4. Stabilité et point de décrochage. . . . .	33
1.4.5. Formation de glace à la sortie de la tuyère d'éjection. . . . .	33
1.4.6. Régulation des éjecteurs . . . . .	34
1.4.7. Calcul simplifié de la consommation spécifique d'un éjecteur . . . . .	34
1.4.8. Conclusion . . . . .	36

<b>Chapitre 2. Dimensionnement des tuyauteries, fluides non newtoniens, coups de bélier . . . . .</b>	<b>37</b>
2.1. Détermination du diamètre des tuyauteries . . . . .	37
2.1.1. Le diamètre extérieur des tuyauteries métalliques . . . . .	37
2.1.2. Choix de la vitesse dans les tuyauteries . . . . .	38
2.1.3. Chute de pression disponible . . . . .	41
2.1.4. Calcul de la chute de pression. . . . .	41
2.1.5. Traduction en unités pratiques (liquides) . . . . .	42
2.1.6. Gaz . . . . .	43
2.1.7. Liquides visqueux newtoniens . . . . .	44
2.1.8. Fluides non newtoniens . . . . .	46
2.2. Détermination de l'épaisseur des tuyauteries . . . . .	47
2.2.1. Conditions de calcul mécanique . . . . .	47
2.2.2. Tenue à la pression . . . . .	48
2.2.3. Tenue au vide . . . . .	49
2.2.4. Surépaisseur de corrosion et épaisseur définitive . . . . .	50
2.3. Les brides, les joints et les accessoires . . . . .	51
2.3.1. Les brides et leur fixation . . . . .	51
2.3.2. Le choix des brides et des joints . . . . .	51
2.3.3. Deux types d'accessoires de tuyauterie . . . . .	53
2.4. Les ondes sonores dans les tuyauteries. . . . .	54
2.4.1. Célérité de l'onde . . . . .	54
2.4.2. Atténuation naturelle des ondes sonores . . . . .	57
2.5. Mécanisme des coups de bélier . . . . .	60
2.5.1. Fermeture d'une vanne, équation de la pression . . . . .	60
2.5.2. Equation de la pression sous forme intégrée . . . . .	62
2.5.3. Les équations complètes du problème . . . . .	63
2.6. Méthode de simulation approchée pour tuyauteries simples (sans accessoires intermédiaires de robinetterie). . . . .	65
2.6.1. Hypothèse des valeurs moyennes . . . . .	65
2.6.2. Interprétation physique. . . . .	67
2.6.3. Conditions aux limites . . . . .	68
2.6.4. Diagramme de propagation . . . . .	70
2.6.5. Procédure de calcul . . . . .	72
2.7. Méthode graphique simplifiée. . . . .	73
2.7.1. Préliminaires. . . . .	73
2.7.2. Procédure pratique . . . . .	74
2.8. Les ballons anti-bélier . . . . .	77
2.8.1. Définition. . . . .	77
2.8.2. Influence du ballon sur la surpression . . . . .	78
2.8.3. Oscillations du niveau du liquide dans le ballon . . . . .	79

2.8.4. Equations du frottement à la paroi . . . . .	81
2.8.5. Résolution de l'équation d'atténuation . . . . .	82
2.8.6. Affaiblissement d'une onde sonore le long d'une tuyauterie pour un trajet unique . . . . .	83

### **Chapitre 3. Vannes de sectionnement et vannes de régulation. . . . . 85**

3.1. Généralités sur les vannes . . . . .	85
3.1.1. Terminologie. . . . .	85
3.1.2. Les pièces essentielles d'une vanne . . . . .	86
3.1.3. Etanchéité . . . . .	87
3.1.4. Tenue à la corrosion et à l'abrasion . . . . .	88
3.1.5. Tenue à la pression et à la température . . . . .	88
3.2. Les différents types de vannes. . . . .	89
3.2.1. Classification et plan d'étude des vannes . . . . .	89
3.2.2. Vannes à soupape . . . . .	90
3.2.3. Vannes d'angle . . . . .	91
3.2.4. Autres vannes à soupape particulières . . . . .	92
3.2.5. Vanne de régulation à obturateur excentré . . . . .	93
3.2.6. Vanne à boisseau . . . . .	94
3.2.7. Vanne à membrane . . . . .	96
3.2.8. Vanne à manchon . . . . .	97
3.2.9. Vanne papillon . . . . .	98
3.2.10. Vanne porte. . . . .	98
3.2.11. Vanne guillotine . . . . .	99
3.2.12. Vanne à cage . . . . .	100
3.2.13. Vannes multivoies. . . . .	101
3.3. Choix et calcul des vannes de régulation . . . . .	103
3.3.1. Intérêt des vannes de régulation . . . . .	103
3.3.2. Ecoulement dans une vanne. . . . .	104
3.3.3. Aspect thermodynamique et principe de calcul . . . . .	105
3.3.4. Calcul du $C_V$ avec les débits en volume . . . . .	105
3.3.5. Le $K_V$ du système international d'unités . . . . .	107
3.3.6. Calcul du $C_V$ avec les débits en masse. . . . .	109
3.3.7. Ecoulement laminaire d'un liquide. . . . .	109
3.3.8. La signification du $C_V$ . . . . .	110
3.3.9. Cavitation d'un liquide dans une vanne . . . . .	111
3.3.10. Débit limite d'un liquide entrant à sa température d'ébullition . . . . .	111
3.3.11. Conclusion pour les liquides. . . . .	114
3.3.12. Coefficient de détente pour un gaz . . . . .	114
3.3.13. Régime sonique pour les gaz . . . . .	115

3.3.14. Graphe caractéristique d'une vanne de régulation . . . . .	115
3.3.15. Plages opératoires . . . . .	117
3.3.16. Installation d'une vanne de régulation . . . . .	118
3.4. Les paramètres procédé d'une vanne de régulation . . . . .	119
3.4.1. Variation de pression dans une ligne. . . . .	119
3.4.2. Perturbations sur une ligne . . . . .	122
3.4.3. Définition des vannes de régulation (principes) . . . . .	122

## **Chapitre 4. Moteurs électriques, performances et choix des pompes, ventilateurs . . . . .**

127

4.1. Choix des moteurs . . . . .	127
4.1.1. Généralités . . . . .	127
4.1.2. Puissance installée . . . . .	127
4.1.3. Tension d'alimentation. . . . .	128
4.1.4. Vitesse de rotation . . . . .	128
4.2. Mise en œuvre des moteurs . . . . .	128
4.2.1. Démarrage . . . . .	128
4.2.2. Puissance consommée dans une installation . . . . .	130
4.3. Les turbopompes. . . . .	131
4.3.1. Les principaux types de turbopompes . . . . .	131
4.3.2. Les pompes centrifuges . . . . .	131
4.3.3. Rendement des pompes centrifuges . . . . .	136
4.3.4. Couple normal-secours de pompes centrifuges . . . . .	138
4.3.5. Critère d'écoulement du liquide . . . . .	140
4.3.6. Sécurité . . . . .	140
4.3.7. Étanchéité de la sortie d'arbre . . . . .	140
4.3.8. Nécessité du refroidissement . . . . .	141
4.3.9. Marche à sec des pompes centrifuges . . . . .	142
4.3.10. Pompes centrifuges étanches . . . . .	142
4.3.11. Les pompes hélices . . . . .	143
4.3.12. Puissance à l'arbre des turbopompes . . . . .	143
4.3.13. La cavitation . . . . .	144
4.4. Les pompes volumétriques. . . . .	146
4.4.1. Nécessité des pompes volumétriques . . . . .	146
4.4.2. Pompes à piston . . . . .	146
4.4.3. Pompes à engrenages. . . . .	148
4.4.4. Pompes Moyno (ou plutôt Moineau) . . . . .	148
4.4.5. Pompes à double vis . . . . .	149
4.4.6. Pompes volumétriques étanches (à membrane) . . . . .	149
4.4.7. Pompes volumétriques et pression nette à l'aspiration . . . . .	149

4.4.8. Régulation de débit des pompes volumétriques . . . . .	149
4.4.9. Puissance à l'arbre . . . . .	150
4.5. Cas particuliers. . . . .	150
4.5.1. Pompes pour mélanges liquide-gaz . . . . .	150
4.5.2. Pompes auto-amorçantes. . . . .	151
4.5.3. Pompage des bouillies . . . . .	151
4.5.4. Pompage des boues. . . . .	152
4.5.5. La vis à eau . . . . .	153
4.6. Les ventilateurs . . . . .	154
4.6.1. Lois de similitude et puissance électrique consommée d'un ventilateur . . . . .	154
4.6.2. Réglage du débit d'un ventilateur . . . . .	155
4.6.3. Utilisations des ventilateurs ailleurs que pour le transport pneumatique . . . . .	156
4.6.4. Durée du démarrage d'un ventilateur . . . . .	157
4.6.5. Bruit causé par un ventilateur . . . . .	158
<b>Chapitre 5. Vis d'extrusion pour polymères . . . . .</b>	<b>161</b>
5.1. Présentation de la vis extrudeuse . . . . .	161
5.1.1. Principe de l'extrudeuse . . . . .	161
5.1.2. Description de la géométrie d'une vis . . . . .	161
5.1.3. Sens de rotation de la vis. . . . .	164
5.1.4. Mouvement des particules fluides . . . . .	165
5.1.5. Etudes préliminaires . . . . .	167
5.2. Mouvement du polymère dans le canal d'une vis . . . . .	168
5.2.1. Introduction . . . . .	168
5.2.2. La viscosité des polymères extrudés . . . . .	168
5.2.3. Equation du mouvement entre deux plaques parallèles : vitesse et débit. . . . .	170
5.2.4. Frottement du polymère sur une paroi solide. . . . .	175
5.2.5. Mouvement du cordon et simulation du fonctionnement d'une vis . . . . .	176
5.2.6. Effet sur le cordon de la composante orthoaxiale de la vitesse relative $V_R$ . . . . .	179
5.2.7. Débit de fuite entre filet et fourreau . . . . .	179
5.2.8. Frottement sur le fourreau du bord du filet . . . . .	180
5.3. Chaleur pour la fusion du polymère . . . . .	181
5.3.1. Fusion des particules de polymère . . . . .	181
5.3.2. Chaleur dissipée par frottement visqueux entre deux plaques parallèles en mouvement relatif . . . . .	182
5.3.3. Dissipation par rotation du cordon liquide sur lui-même . . . . .	183

5.3.4. Temps d'attente préliminaire avant fusion . . . . .	184
5.3.5. Echange thermique dans la zone de fusion . . . . .	184
5.4. Puissance électrique à l'arbre . . . . .	185
5.4.1. Puissance de la vis à l'arbre . . . . .	185
5.4.2. Extrapolation de la puissance depuis un diamètre $d$ jusqu'à un diamètre $D$ . . . . .	185
5.5. Considérations d'ordre pratique et utilisation des vis . . . . .	186
5.5.1. Les variables opératoires et les variables de dimensionnement . . . . .	186
5.5.2. Mise en œuvre de certaines vis extrudeuses . . . . .	187
5.5.3. Utilisations des extrudeuses . . . . .	188
5.6. Le mélange et le transfert thermique dans les vis . . . . .	188

## **Chapitre 6. Choix et performances des compresseurs . . . . . 189**

6.1. Généralités sur les compresseurs . . . . .	189
6.1.1. Pertes énergétiques et rendements . . . . .	189
6.1.2. Température de sortie du gaz . . . . .	191
6.1.3. Pertes énergétiques dans l'environnement . . . . .	191
6.1.4. Puissance de compression idéale . . . . .	192
6.1.5. Gaz réels . . . . .	194
6.1.6. Protection des machines . . . . .	196
6.2. Compresseurs à piston . . . . .	197
6.2.1. Utilisation . . . . .	197
6.2.2. Espace mort des compresseurs à piston . . . . .	198
6.2.3. Energie et rendement . . . . .	199
6.3. Compression volumétrique ouverte – Compresseurs à vis et compresseurs à lobes . . . . .	201
6.3.1. Description . . . . .	201
6.3.2. Utilisation . . . . .	201
6.3.3. Rendements . . . . .	202
6.3.4. Fuite interne et rendement volumétrique . . . . .	203
6.4. Les turbocompresseurs . . . . .	208
6.4.1. Description et utilisation . . . . .	208
6.4.2. Régulation du débit . . . . .	210
6.4.3. Equation de l'énergie . . . . .	210
6.4.4. Gaz parfaits . . . . .	211
6.4.5. Gaz réels . . . . .	212
6.5. Les ventilateurs . . . . .	215
6.5.1. Utilisation . . . . .	215
6.5.2. Puissance de compression . . . . .	215
6.6. Pompes à anneau liquide . . . . .	217
6.6.1. Principe et utilisation . . . . .	217

6.6.2. Puissance à l'arbre . . . . .	217
6.6.3. Consommation de liquide . . . . .	218

## **Chapitre 7. La détente libre des gaz . . . . . 221**

7.1. Types de détentes – Equations de l'écoulement unidimensionnel . . . . .	221
7.1.1. Types de détentes et hypothèses de départ . . . . .	221
7.1.2. Détente libre et énergie. . . . .	221
7.1.3. Nombre de Mach . . . . .	224
7.1.4. Frottement dans une tuyauterie . . . . .	225
7.1.5. Equations générales de l'écoulement adiabatique . . . . .	226
7.1.6. Ecoulement sans frottements mais avec section variable . . . . .	227
7.1.7. Ecoulement isentropique et valeurs critiques. . . . .	230
7.1.8. Ecoulement à section constante mais avec frottement (gazoducs) . . . . .	231
7.1.9. Equation de l'onde de choc stationnaire pure . . . . .	234
7.1.10. Chute de pression singulière. . . . .	236
7.2. Etude théorique des vannes de régulation, des soupapes et des gazoducs . . . . .	238
7.2.1. Modélisation des vannes de régulation . . . . .	238
7.2.2. Modélisation des soupapes . . . . .	241
7.2.3. Conclusions . . . . .	245
7.2.4. Chute de pression dans un gazoduc . . . . .	245
7.2.5. Conclusions d'ensemble . . . . .	247

## **Chapitre 8. Les soupapes de sûreté et les disques de rupture . . . . . 249**

8.1. Les pressions autour d'une soupape . . . . .	249
8.1.1. Pression de service de l'appareil protégé . . . . .	249
8.1.2. Pression maximale en service. . . . .	249
8.1.3. Pression de calcul . . . . .	249
8.1.4. Pression de tarage . . . . .	250
8.1.5. Pression à l'amont de la soupape . . . . .	251
8.1.6. Différentielle de fermeture (retombée) . . . . .	251
8.1.7. Contre-pression à l'aval de la soupape . . . . .	252
8.2. Choix entre les deux types principaux de soupapes . . . . .	252
8.2.1. Les soupapes conventionnelles . . . . .	252
8.2.2. Les soupapes équilibrées. . . . .	253
8.2.3. Choix du type de soupape . . . . .	254
8.2.4. Les sections d'orifice normalisées . . . . .	254
8.3. Relations entre débits et pressions . . . . .	255
8.3.1. Les gaz . . . . .	255

8.3.2. Les liquides . . . . .	257
8.3.3. Liquides visqueux. . . . .	258
8.3.4. Débit à travers les soupapes . . . . .	260
8.4. Les liaisons amont et aval . . . . .	261
8.4.1. Liaison entre la soupape et l'appareil protégé . . . . .	261
8.4.2. Tuyauterie d'échappement . . . . .	262
8.4.3. Force de réaction sur la structure. . . . .	265
8.5. Applications diverses . . . . .	266
8.5.1. Les soupapes casse-vide . . . . .	266
8.5.2. Respiration des réservoirs sous pression atmosphérique . . . . .	268
8.5.3. Echappement de liquide sans surface libre (tension de vapeur faible) . . . . .	268
8.6. Disques de rupture. . . . .	269
8.6.1. Pression d'éclatement . . . . .	269
8.6.2. Sévérité opératoire . . . . .	270
8.6.3. Relations entre pression et débit . . . . .	270
8.6.4. Les disques conventionnels . . . . .	272
8.6.5. Les disques composites . . . . .	272
8.6.6. Les disques épais . . . . .	273
8.6.7. Les disques en graphite . . . . .	273
8.6.8. Indicateurs d'éclatement . . . . .	274
8.6.9. Association d'un disque et d'une soupape . . . . .	274

## **Chapitre 9. Respiration, inertage, pertes par voie gazeuse et circulation entre réservoirs, bacs et cuves . . . . . 277**

9.1. Spécification des soupapes de respiration – Taux de remplissage limite des réservoirs . . . . .	277
9.1.1. Types de fluctuations de température . . . . .	277
9.1.2. Tarage de la soupape à l'expiration . . . . .	278
9.1.3. Taux de remplissage limite pour l'exploitation . . . . .	280
9.1.4. Débit des soupapes de respiration . . . . .	281
9.1.5. Détendeurs et déverseurs . . . . .	284
9.1.6. Un montage possible pour l'inertage sous pression . . . . .	285
9.2. Evaluation des pertes à l'atmosphère. . . . .	286
9.2.1. Préliminaires. . . . .	286
9.2.2. Scénarios envisageables . . . . .	286
9.2.3. Stockage d'une matière première. . . . .	287
9.2.4. Stockage d'un produit . . . . .	288
9.2.5. Pertes lors d'un fort réchauffement . . . . .	290
9.3. Circulation de liquide entre réservoirs : transfert par gravité d'un réservoir à un autre . . . . .	291

<b>Chapitre 10. Écoulement dans les tuyauteries, gaz raréfié, liquides non newtoniens, événements, écoulement gaz-liquide . . . . .</b>	<b>297</b>
10.1. Gaz raréfié . . . . .	297
10.1.1. Viscosité des gaz sous basse pression . . . . .	297
10.1.2. Vitesse quadratique moyenne . . . . .	298
10.1.3. Libre parcours moyen. . . . .	299
10.1.4. Débit de gaz (tuyauterie basse pression). . . . .	299
10.2. Les produits consistants ou plastiques : les lois d'écoulement en tuyauterie . . . . .	301
10.3. Les événements . . . . .	302
10.3.1. Généralités . . . . .	302
10.3.2. Les événements d'explosion . . . . .	303
10.3.3. Les événements d'ambiance . . . . .	303
10.4. Nature des écoulements gaz-liquide. . . . .	308
10.4.1. Écoulements horizontaux ou faiblement inclinés. . . . .	308
10.4.2. Écoulements montant à la verticale. . . . .	309
10.4.3. Écoulement vertical descendant. . . . .	309
10.4.4. Écoulement montant ou descendant incliné depuis l'horizontale jusqu'à la verticale . . . . .	310
10.5. Chute de pression dans les écoulements gaz-liquide . . . . .	310
10.5.1. La tuyauterie est strictement horizontale . . . . .	310
10.5.2. La tuyauterie est inclinée sur l'horizontale en montant ou en descendant . . . . .	311
10.5.3. Rétention et chute de pression à la remontée . . . . .	311
10.6. Écoulements biphasiques critiques . . . . .	311
10.6.1. Hypothèse. . . . .	311
10.6.2. Célérité du son . . . . .	312
10.6.3. Écoulement critique sans frottements . . . . .	313
10.6.4. Les équations de l'écoulement . . . . .	313
 <b>Annexe. Caractéristiques de quelques gaz . . . . .</b>	 <b>317</b>
 <b>Bibliographie . . . . .</b>	 <b>319</b>
 <b>Index . . . . .</b>	 <b>323</b>