

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	13
<b>Chapitre 1. Caractéristiques mécaniques des solides divisés</b> . . . . .	15
1.1. Deux propriétés simples . . . . .	15
1.1.1. Taille des particules. . . . .	15
1.1.2. Compressibilité . . . . .	16
1.2. Rappels de mécanique des milieux continus . . . . .	18
1.2.1. Notion de contrainte dans un solide . . . . .	18
1.2.2. Equilibre des forces et tenseur des contraintes en coordonnées planes . . . . .	19
1.2.3. Equilibre des forces de volume et des moments : symétrie du tenseur des contraintes. . . . .	21
1.2.4. Directions principales et vecteurs propres . . . . .	21
1.2.5. Cercles de Mohr en trois dimensions . . . . .	22
1.2.6. Cas bidimensionnel. . . . .	24
1.2.7. Mécanique tridimensionnelle avec plan de symétrie . . . . .	26
1.2.8. Lois des déplacements . . . . .	27
1.3. Ecoulement des solides divisés . . . . .	28
1.3.1. Préconditionnement et état critique . . . . .	28
1.3.2. Résultats expérimentaux si $\sigma_c \neq \sigma_c^*$ . . . . .	29
1.3.3. Procédure d'essai selon Jenike . . . . .	32
1.3.4. Evolution rationnelle de la consolidation . . . . .	33
1.3.5. Hystérèse . . . . .	34
1.3.6. Interprétation des résultats obtenus : contrainte limite non confinée . . . . .	34
1.3.7. Coulabilité et coefficient d'écoulement . . . . .	36

1.3.8. Rigidité, plasticité, coulabilité, mobilité. . . . .	39
1.3.9. Dissipation énergétique . . . . .	41
1.3.10. Expression analytique des lieux de rupture . . . . .	41
1.3.11. Paramètres d'influence sur les angles de frottement . . . . .	43
1.4. Identités courantes. . . . .	44
1.4.1. Relation entre les contraintes principales et la contrainte non confinée . . . . .	44
1.4.2. Autres identités courantes . . . . .	46
1.4.3. Angle de frottement sur une surface . . . . .	48
1.4.4. Glissement sur une paroi verticale : états actif et passif . . . . .	51
1.5. Mesure des propriétés mécaniques des solides divisés . . . . .	54
1.5.1. Contrainte de consolidation . . . . .	54
1.5.2. Mesure des déplacements en fonction des contraintes . . . . .	54
1.5.3. Mesure de la contrainte de cisaillement limite pour le déplacement de cisaillement . . . . .	55
1.5.4. Mesure de la surface et de la masse volumique vraie intrinsèque d'un solide divisé . . . . .	56
1.6. Stockage en tas. . . . .	56
1.6.1. Angle de talus naturel ou angle au repos . . . . .	56
1.6.2. Valeurs pratiques de l'angle au repos . . . . .	57
1.6.3. Utilité du stockage en tas . . . . .	58
1.6.4. Intérêt de l'étude des surfaces libres et des contraintes sous-jacentes. . . . .	59
1.6.5. Contraintes sur les surfaces libres . . . . .	59
1.6.6. Contraintes principales sous une surface libre horizontale . . . . .	59
1.6.7. Etat actif et état passif . . . . .	60

<b>Chapitre 2. Contraintes dans les trémies et les silos, ensilage, désilage et homogénéité du contenu . . . . .</b>	<b>65</b>
2.1. Contraintes sur les parois. . . . .	65
2.1.1. Les deux états de contrainte . . . . .	65
2.1.2. Conventions de signe résultantes . . . . .	66
2.1.3. Equations de Janssen (1895) pour une paroi cylindrique verticale . . . . .	67
2.1.4. Contrainte moyenne sur la paroi cylindrique. . . . .	69
2.1.5. Expression des paramètres selon l'état des contraintes (partie cylindrique). . . . .	69
2.1.6. Réaction de supportage exercée par la paroi (partie cylindrique). . . . .	70
2.1.7. Etude du convergent : hypothèse simplificatrice. . . . .	71

2.1.8. Réaction de supportage exercée par la paroi (convergent) . . . . .	75
2.1.9. Rotation des contraintes principales à la transition cylindre-convergent . . . . .	76
2.1.10. Paroi inclinée. . . . .	77
2.1.11. Réaction d'accrochage du produit aux parois du convergent . . . . .	78
2.1.12. Existence de l'état actif dans le convergent . . . . .	79
2.1.13. Faiblesse de la paroi à la jonction cône-cylindre . . . . .	81
2.1.14. Faiblesse des considérations précédentes . . . . .	83
2.2. Evolution des contraintes à l'ensilage et au désilage : homogénéité et hétérogénéité du contenu . . . . .	84
2.2.1. Homogénéité et coulabilité d'une charge ensilée . . . . .	84
2.2.2. Intérêt des propriétés du produit . . . . .	85
2.2.3. Modes de remplissage . . . . .	85
2.2.4. Caractéristiques du remplissage d'une capacité . . . . .	86
2.2.5. Remplissage par jet de grenus et surpressions localisées . . . . .	86
2.2.6. Ensilage homogène et ensilage hétérogène . . . . .	87
2.2.7. Masse ensilée homogène (remplissage lent et en pluie) . . . . .	88
2.2.8. Masse ensilée hétérogène (remplissage rapide, et pour les grenus, en jet) . . . . .	89

<b>Chapitre 3. La vidange : désilage des trémies et silos, contraintes et débit . . . . .</b>	<b>91</b>
3.1. Généralités . . . . .	91
3.1.1. Investissement spécifique . . . . .	91
3.1.2. Méthodes d'ensilage (de remplissage des capacités) . . . . .	92
3.1.3. Dispositifs de mesure du niveau de produit. . . . .	92
3.1.4. Qu'est-ce qu'une trémie ou un silo ? . . . . .	93
3.1.5. Silos à mamelles multiples . . . . .	94
3.2. Types et régimes d'écoulement . . . . .	94
3.2.1. Types d'écoulement . . . . .	94
3.2.2. Régimes d'écoulement en masse selon le produit . . . . .	94
3.2.3. Nature de l'écoulement selon la configuration du convergent . . . . .	96
3.3. Critères pour l'écoulement en masse . . . . .	97
3.3.1. Intérêt des capacités sans zone morte . . . . .	97
3.3.2. Critère pour l'écoulement en masse (état actif des contraintes) . . . . .	97
3.3.3. Domaine de type actif limité : angle d'approche. . . . .	98
3.3.4. Conditions d'écoulement en masse (état passif des contraintes) . . . . .	99

3.3.5. Critère de Jenike (1987) pour l'existence d'un puits au désilage (la vidange) . . . . .	101
3.4. Ecoulements avec zone morte . . . . .	102
3.4.1. Zones mortes : caractéristiques et inconvénients . . . . .	102
3.4.2. Conditions de la vidange complète : adhérence dans le convergent. . . . .	103
3.4.3. Pente des arêtes avec angles rentrants . . . . .	104
3.4.4. Capacités à zone morte permanente . . . . .	105
3.4.5. Utilisation sans ségrégation d'une capacité à zone morte permanente . . . . .	106
3.4.6. Persistance de la zone morte pendant l'écoulement . . . . .	106
3.4.7. Données pratiques . . . . .	109
3.4.8. Angle d'approche et angle de convergence. . . . .	110
3.4.9. Configuration du puits (angle d'approche et diamètre) . . . . .	111
3.5. Voûtage ou coupolage et sa prévention . . . . .	112
3.5.1. Dimension minimale de l'orifice de vidange . . . . .	112
3.5.2. Procédure graphique . . . . .	116
3.5.3. Elancement d'un silo et voûtage . . . . .	118
3.5.4. Contraintes dans un convergent vers le bas. . . . .	119
3.5.5. Rapports caractéristiques et condition pour un écoulement sans blocage . . . . .	120
3.6. Débit de vidange . . . . .	121
3.6.1. Débit de vidange en masse . . . . .	121
3.6.2. Expression de Johanson (1965) pour le débit de vidange. . . . .	123
3.6.3. Influence du produit sur les paramètres du débit de désilage en masse . . . . .	124
3.6.4. Influence du diamètre des particules sur le débit . . . . .	125
3.6.5. Orifice circulaire de faibles dimensions. . . . .	126
3.6.6. Effet de la rugosité de la paroi du convergent sur le débit . . . . .	126
3.6.7. Influence de la pression de l'air. . . . .	127
3.7. Soutirage des fins . . . . .	127
3.7.1. Mécanisme de l'écoulement des fins en masse. . . . .	127
3.7.2. Perméabilité, résistance spécifique, loi de la percolation. . . . .	128
3.7.3. Compacité d'une dispersion confinée en chute libre . . . . .	129
3.7.4. Débit de solide freiné par la remontée de l'air . . . . .	130
3.7.5. Chute de pression gazeuse au-dessus de l'orifice . . . . .	131
3.7.6. Pulvérulents et leur perméabilité aux gaz. . . . .	133
3.7.7. Ecoulement des fins avec présence d'un puits . . . . .	134
3.8. Théorie cinématique de l'écoulement dans une trémie . . . . .	135
3.8.1. Ecoulement dans un cylindre vertical . . . . .	135
3.8.2. Ecoulement dans un convergent vertical . . . . .	135

3.8.3. Avantages de la théorie cinématique. . . . .	136
3.9. Activation de la vidange . . . . .	136
3.9.1. Activation par vibrations. . . . .	136
3.9.2. Boucliers promoteurs d'écoulement (vibrés ou non vibrés) . . . .	137
3.9.3. Insufflation d'air et angle au sommet du convergent . . . . .	138
3.9.4. Vidange forcée . . . . .	139
3.9.5. Déstabilisation de la voûte ou de la coupole par choc pneumatique . . . . .	140
3.9.6. Déstabilisation du voûtage par coussins gonflants. . . . .	140
3.9.7. Autres systèmes sans vibration . . . . .	140
3.10. Prise en masse . . . . .	141
3.10.1. Prise en masse : massification . . . . .	141
3.10.2. Prévention de la prise en masse : les enrobeurs. . . . .	143

## **Chapitre 4. Mécanique des solides divisés . . . . . 145**

4.1. Statique limite des solides divisés : méthode des caractéristiques . . . .	145
4.1.1. Equation du champ de contraintes . . . . .	145
4.1.2. Différentielles totales de $\beta$ et de $p$ . . . . .	147
4.1.3. Courbes caractéristiques et leurs équations. . . . .	148
4.2. La dynamique des S.D. selon Bagnold (1954) :	
un solide divisé soumis à un cisaillement pur . . . . .	151
4.3. Dynamique des solides divisés : méthode des éléments discrets (des particules distinctes) . . . . .	152
4.3.1. Présentation . . . . .	152
4.3.2. Contact entre deux particules . . . . .	153
4.3.3. Frottement interparticulaire selon Cundall et Strack (1979) . . . .	156
4.3.4. Force d'interaction entre deux particules . . . . .	157
4.3.5. Mouvements au point de contact entre deux particules $i$ et $j$ . . . .	158
4.3.6. Amortissement . . . . .	160
4.3.7. Moment d'inertie d'une sphère . . . . .	160
4.3.8. Valeur de l'incrément de temps. . . . .	161
4.3.9. Sélection des particules d'influence sur une particule . . . . .	162
4.3.10. Recherche encore plus économique des couples significatifs . . . .	163
4.3.11. Coefficient de restitution . . . . .	163
4.3.12. Calcul de $k$ et de $c$ . . . . .	164
4.3.13. Ecoulement sur plan incliné par la méthode des éléments discrets. . . . .	165
4.4. Dynamique superficielle d'un S.D. . . . .	167
4.4.1. L'équation de Bouchaud <i>et al.</i> (1994) simplifiée par de Gennes (1995, 1997) . . . . .	167

4.4.2. Utilisations de l'équation de De Gennes (1997) . . . . .	168
4.4.3. Glissement d'une couche de S.D. : étude analytique . . . . .	169
4.5. Etudes expérimentales . . . . .	169

## **Chapitre 5. Densification, compactage des poudres : comprimés, granulés . . . . . 171**

5.1. Propriétés utiles des poudres pour le pressage . . . . .	171
5.1.1. Historique (poudres pharmaceutiques) . . . . .	171
5.1.2. Poudres industrielles (conditionnement) . . . . .	172
5.1.3. Coulabilité d'une poudre. . . . .	172
5.1.4. Dureté Vickers d'un cristal . . . . .	174
5.1.5. Echelle de Mohs pour les cristaux . . . . .	175
5.1.6. Les indices de Hiestand et Smith (1984) . . . . .	175
5.2. Opération de pressage des poudres . . . . .	175
5.2.1. Mécanisme du frittage sous pression . . . . .	175
5.2.2. Adjuvants utiles au pressage des comprimés. . . . .	176
5.2.3. Diluants. . . . .	177
5.2.4. Excipients . . . . .	178
5.2.5. Description de la formation d'un comprimé . . . . .	178
5.2.6. Opération de pressage . . . . .	180
5.2.7. Résistance d'un comprimé à l'écrasement . . . . .	182
5.2.8. Déformation à la compression . . . . .	183
5.2.9. Presses pour compression . . . . .	183
5.2.10. Granulation par pressage. . . . .	184
5.2.11. Formage des boulets par compression . . . . .	185
5.2.12. Agglomération par agitation rapide. . . . .	185
5.3. Physique de la granulation par roulage. . . . .	185
5.3.1. Avantages des granulés sur les poudres . . . . .	185
5.3.2. Etats des solides divisés humides. . . . .	186
5.3.3. Adhérence capillaire d'une particule sur un granulé humide . . . . .	186
5.3.4. Etapes de la formation des boulettes par roulage . . . . .	187
5.3.5. Humidification . . . . .	188
5.3.6. Influence du séchage . . . . .	189
5.3.7. Influence de la granulométrie et de la porosité. . . . .	189
5.3.8. Cinétique de la granulation continue. . . . .	190
5.3.9. Expression de la vitesse de rupture-coalescence. . . . .	192
5.4. Appareils granulateurs . . . . .	194
5.4.1. Tambour . . . . .	194
5.4.2. Paramètres opératoires du tambour . . . . .	194
5.4.3. Plateau . . . . .	195

5.4.4. Comparaison entre tambour et plateau . . . . .	196
5.4.5. Eléments de dynamique des solides divisés . . . . .	197
5.5. Résistance des granules . . . . .	198
5.5.1. Déformation à la traction . . . . .	198
5.5.2. Influence de la saturation sur $\sigma_{\max}$ . . . . .	198
5.5.3. Cohésion des boulettes . . . . .	199
5.5.4. Résistance à la traction d'origine capillaire . . . . .	200
5.5.5. Forces de Van der Waals . . . . .	201
5.5.6. Résistance à la traction par forces de Van der Waals . . . . .	202
5.5.7. Formation d'un pont solide entre particules . . . . .	203
5.5.8. Influence de la distribution granulométrique . . . . .	204
5.5.9. Conclusion . . . . .	205

## **Chapitre 6. Mécanique et thermique des lits fluidisés gazeux . . . . . 207**

6.1. Mécanique des lits fluidisés gazeux . . . . .	207
6.1.1. Mécanisme de la fluidisation . . . . .	207
6.1.2. Apparition des bulles . . . . .	208
6.1.3. Conception du répartiteur . . . . .	209
6.1.4. Classement des particules . . . . .	210
6.1.5. Coefficient de sphéricité géométrique des particules . . . . .	211
6.1.6. Sphéricité pratique . . . . .	212
6.1.7. Surface volumique moyenne . . . . .	213
6.2. Seuils de débit . . . . .	213
6.2.1. Porosité à la fluidisation commençante . . . . .	213
6.2.2. Vitesse à la fluidisation commençante . . . . .	214
6.2.3. Vitesse au bouillonnement commençant . . . . .	216
6.3. Morphologie d'un lit fluidisé . . . . .	217
6.3.1. Expansion d'un lit fluidisé homogène sans bulles . . . . .	217
6.3.2. Expansion du lit bouillonnant . . . . .	219
6.3.3. Morphologie d'une bulle . . . . .	219
6.3.4. Diamètre des bulles . . . . .	220
6.3.5. Vitesse ascensionnelle d'une bulle isolée . . . . .	221
6.3.6. Vitesse des bulles à un niveau donné d'un lit fluidisé . . . . .	222
6.3.7. Circulation du solide dans le lit fluidisé . . . . .	223
6.3.8. Hauteur de libération du gaz . . . . .	224
6.3.9. Calcul des déversoirs pour lits fluidisés superposés . . . . .	224
6.3.10. Lit turbulent . . . . .	225
6.3.11. Lit fluidisé circulant (transporté ou rapide) . . . . .	226
6.4. Pistonnage . . . . .	226
6.4.1. Critères d'apparition du pistonnage . . . . .	226

---

6.4.2. Hauteur du lit en régime de pistonnage . . . . .	228
6.4.3. Chute de pression à travers un lit en régime de pistonnage . . . . .	229
6.5. Echange thermique . . . . .	230
6.5.1. Propriétés thermiques de quelques matériaux solides . . . . .	230
6.5.2. Conductivité équivalente du lit fluidisé . . . . .	230
6.5.3. Transfert thermique par convection à travers une surface verticale . . . . .	232
6.5.4. Transfert thermique entre un lit fluidisé et un tube vertical . . . . .	234
6.5.5. Echange thermique entre un lit fluidisé et un tube horizontal . . . . .	236
6.5.6. Echange par rayonnement . . . . .	237
6.6. Utilisations de la fluidisation . . . . .	238
<b>Annexe A. Masse volumique apparente des solides divisés en vrac (<math>\text{kg.m}^{-3}</math>) . . . . .</b>	<b>239</b>
<b>Annexe B. Résultats simples de géométrie analytique . . . . .</b>	<b>243</b>
<b>Annexe C. Echelle de Mohs. . . . .</b>	<b>247</b>
<b>Annexe D. Résolution des équations du troisième et du quatrième degré : recherche de groupements adimensionnels. . . . .</b>	<b>251</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>255</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>269</b>