

Table des matières

Préface	iii
Avant-propos	xiii
1 Introduction	1
1.1 Définition et exemples de milieux granulaires	1
1.2 Entre fluide et solide : les spécificités de la matière en grains . .	4
1.3 Objectif et plan de l'ouvrage	9
Encadré 1.1 : Granulométrie d'un matériau granulaire	10
Encadré 1.2 : Une brève histoire de grains	13
2 Interactions à l'échelle du grain	17
2.1 Forces de contact solide	17
2.1.1 Contact élastique de Hertz	18
2.1.2 Friction solide	20
2.1.3 Collisions entre deux particules	28
2.2 Autres interactions	32
2.2.1 Interaction électrostatique	33
2.2.2 Adhésion	33
2.2.3 Cohésion capillaire	37
2.2.4 Cas des surfaces réelles, rôle de la rugosité	38
2.2.5 Ponts solides	40
2.3 Forces en écoulement	47
2.3.1 Force sur un grain dans un écoulement stationnaire et uniforme	48
2.3.2 Force dans les écoulements instationnaires et inhomogènes	52
2.3.3 Forces hydrodynamiques entre grains : lubrification . . .	56
Encadré 2.1 : Contact électrique entre grains et effet Branly	27
Encadré 2.2 : Origine physique du coefficient d'inélasticité et lois d'échelle	30
Encadré 2.3 : Méthodes de simulations numériques discrètes des milieux granulaires	42

3	Le solide granulaire : statique et élasticité	61
3.1	Les empilements granulaires	61
3.1.1	Fraction volumique	62
3.1.2	Empilements monodisperses de sphères	62
3.1.3	Empilements de sphères de différentes tailles	64
3.1.4	Compaction	68
3.2	Forces dans les empilements	74
3.2.1	Détermination des forces dans un empilement : rôle de la friction et isostaticité	74
3.2.2	Statistique de la répartition de forces	76
3.3	Des forces aux contraintes	87
3.3.1	Définition des contraintes dans un milieu granulaire	87
3.4	Distribution des contraintes à l'équilibre	91
3.4.1	Contraintes dans un silo : calcul de Janssen	92
3.4.2	Contraintes sous un tas	95
3.5	Élasticité d'un milieu granulaire	97
3.5.1	Élasticité d'une chaîne de billes unidimensionnelle	98
3.5.2	Modules élastiques d'un empilement granulaire	99
3.5.3	Relation constitutive	101
3.5.4	Acoustique des milieux granulaires	107
Encadré 3.1 : Méthodes de mesure de la fraction volumique		66
Encadré 3.2 : Approches théoriques de la compaction granulaire		72
Encadré 3.3 : Le q-modèle, un modèle simple de propagation des forces dans un empilement granulaire		79
Encadré 3.4 : Rappels sur les milieux continus		83
Encadré 3.5 : Une démonstration de l'expression du tenseur des contraintes		90
Encadré 3.6 : Transition de blocage et limite de rigidité		105
Encadré 3.7 : Vitesse de propagation des ondes longitudinale et transverse dans un milieu granulaire		112
Encadré 3.8 : Le silo chantant		115
Encadré 3.9 : Le chant des dunes		118
4	Le solide granulaire : plasticité	123
4.1	Phénoménologie	124
4.1.1	Le tas de sable	124
4.1.2	La cellule de cisaillement	125
4.1.3	La cellule triaxiale	128
4.2	Les différents niveaux de descriptions : approche scalaire	129
4.2.1	Premier niveau de description : un milieu frottant	129

4.2.2	Second niveau de description : prise en compte des variations de fraction volumique	133
4.2.3	Vers des niveaux de description plus fine	137
4.3	Modèle de Mohr-Coulomb	138
4.3.1	Critère de rupture	138
4.3.2	Déformations plastiques	149
4.3.3	Conclusion sur le modèle de Mohr-Coulomb/Drücker-Prager	151
4.4	Rôle de la fraction volumique : théorie des états critiques . . .	152
4.4.1	Modèle de Drücker-Prager dilatant	153
4.4.2	Modèle Cam-Clay	155
4.5	Aller plus loin dans les modélisations plastiques	159
4.5.1	Prise en compte de l'élasticité	159
4.5.2	Chemins de chargement plus complexes	161
4.5.3	Phénomènes de localisation	162
4.5.4	Vers les écoulements granulaires	165
4.6	Plasticité des milieux cohésifs	166
4.6.1	Phénoménologie des milieux granulaires cohésifs	166
4.6.2	Modèle de Mohr-Coulomb cohésif	169
4.6.3	Estimation de la cohésion macroscopique	170
Encadré 4.1 : La dilatance de Reynolds		133
Encadré 4.2 : Comment résoudre numériquement un problème élasto-plastique		160
Encadré 4.3 : Analyse microscopique de la plasticité		163
Encadré 4.4 : Effet d'humidité		168
5	Gaz granulaires	173
5.1	Analogies et différences avec un gaz	173
5.2	Théorie phénoménologique : modèle de Haff (1983)	175
5.2.1	Équations de conservation	176
5.2.2	Coefficients de transport	177
5.2.3	Un mot sur les conditions aux limites	182
5.3	Une approche plus complète	185
5.3.1	Équation de Enskog-Boltzmann inélastique	185
5.3.2	Lois de conservation	190
5.3.3	Relations constitutives (Lun <i>et al.</i> , 1984)	195
5.3.4	Vers des modèles plus complexes	198
5.4	Applications	200
5.4.1	Cisaillement plan : loi de Bagnold	200
5.4.2	Auto-convection granulaire	203
5.4.3	Les anneaux de Saturne	204
5.4.4	Boîte vibrée et démon de Maxwell	208
5.4.5	Refroidissement homogène et instabilité d'amas	212

5.5	Limites de la théorie cinétique	217
5.5.1	Problème de séparation d'échelle micro/macro	217
5.5.2	Effondrement inélastique	218
5.5.3	Vers le régime d'écoulement dense	219
Encadré 5.1 :	Calcul du terme de collision de l'équation de Boltzmann	187
Encadré 5.2 :	Calcul du terme de collision dans l'équation de transport de Maxwell-Boltzmann	192
Encadré 5.3 :	Fonction de distribution des vitesses d'un gaz granulaire isolé	215
Encadré 5.4 :	Instabilités dans les milieux vibrés, oscillons	221
6	Le liquide granulaire	225
6.1	Introduction	225
6.2	Rhéologie	231
6.2.1	Cisaillement simple : analyse dimensionnelle	232
6.2.2	Loi constitutive	237
6.2.3	Applications	244
6.2.4	Au-delà de la rhéologie $\mu(I)$	256
6.2.5	Conclusion sur la rhéologie des écoulements denses	261
6.3	Équations de Saint-Venant	266
6.3.1	Dérivation des équations	267
6.3.2	Choix de la loi de friction	271
6.3.3	Exemples d'applications	275
6.3.4	Limites et extensions des équations de Saint-Venant	282
6.4	Ségrégation sous écoulement	286
6.4.1	Ségrégation sur pente	291
6.4.2	Ségrégation sur tas et en tambour tournant	293
6.4.3	Approches théoriques	295
Encadré 6.1 :	Mesure de vitesse dans les écoulements granulaires	229
Encadré 6.2 :	Rhéologie : vers des milieux granulaires plus complexes	240
Encadré 6.3 :	Prédiction de la rhéologie $\mu(I)$ pour le cisaillement plan sous gravité	254
Encadré 6.4 :	Une bille sur un plan incliné : le Tac-Tac	262
Encadré 6.5 :	Ségrégation sous vibrations	287
Encadré 6.6 :	La neige : un exemple de milieu granulaire polydisperse	301

7	Milieux granulaires immergés	303
7.1	Équations diphasiques	304
7.1.1	Conservation de la masse	304
7.1.2	Définition des contraintes effectives	304
7.1.3	Équations du mouvement	305
7.1.4	Limite diluée	307
7.1.5	Limite dense	308
7.2	Rôle du fluide sur les empilements statiques	309
7.2.1	Équilibre statique	309
7.2.2	Écoulement dans un poreux	310
7.2.3	Lit fluidisé	311
7.3	Rôle du fluide lors de la compaction ou de la dilatation d'un milieu granulaire	313
7.3.1	Consolidation d'un sol : un aperçu de la poroélasticité	314
7.3.2	Liquéfaction des sols	316
7.3.3	Conséquence pour les glissements de terrain	318
7.4	Rôle du fluide dans les écoulements granulaires	323
7.4.1	Milieux granulaires ou suspensions ?	323
7.4.2	Cisaillement à contrainte normale imposée	325
7.4.3	Rhéologie à fraction volumique imposée : lien avec les suspensions denses	329
 Encadré 7.1 : Rôle de l'air dans les milieux granulaires vibrés		 312
Encadré 7.2 : Les sables mouvants		320
8	Érosion et transport sédimentaire	331
8.1	Introduction	331
8.2	Seuil statique de transport	333
8.2.1	Nombre de Shields	334
8.2.2	Détermination du seuil de transport à l'échelle du grain	339
8.2.3	Influence de la pente longitudinale	343
8.2.4	Influence de la cohésion	344
8.3	Description du transport	346
8.3.1	Interface entre le lit sédimentaire et le fluide	346
8.3.2	Flux et conservation de la matière	346
8.3.3	Flux saturé	348
8.3.4	Longueur de saturation	350
8.4	Charriage	352
8.4.1	Description qualitative	352
8.4.2	Description discrète du charriage	353
8.4.3	Exemple de l'ensablement de l'estuaire de la Loire	362

8.5	Transport éolien : saltation et reptation	363
8.5.1	Description qualitative	363
8.5.2	Seuil dynamique de transport	365
8.5.3	Flux saturé	366
8.5.4	Longueur de saturation	370
8.5.5	Influence d'un gradient de vent transverse	373
8.5.6	Exemple de l'ensablement d'une route saharienne	373
8.6	Suspension turbulente	375
8.6.1	Description qualitative	375
8.6.2	Flux saturé	377
8.6.3	Longueur de saturation	380
8.6.4	Exemple de la rupture d'une digue par élargissement d'un renard	380
Encadré 8.1 : Détermination du seuil de transport dans une description diphasique continue		337
Encadré 8.2 : Couche limite turbulente		341
Encadré 8.3 : Charriage dans une description continue		360
9	Géomorphologie sédimentaire	383
9.1	Processus de pentes et écoulements gravitaires	383
9.1.1	Typologie	384
9.1.2	Longueur de « run-out »	390
9.2	Rides et dunes	395
9.2.1	Classifications naturaliste et physique	395
9.2.2	Instabilité d'un lit sédimentaire : dunes éoliennes et rides aquatiques	399
9.2.3	Dunes barkhanes	406
9.2.4	Méga-dunes et effets de taille finie	410
9.2.5	Rides éoliennes	412
9.3	Processus côtiers	417
9.3.1	Faire des vagues	417
9.3.2	Transport et instabilité côtière	422
9.3.3	Instabilité de plage	425
9.3.4	Rides de bord de mer	427
9.4	Rivières	430
9.4.1	Auto-organisation des bassins versants	430
9.4.2	Morphologie des rivières	435
9.4.3	Profil d'équilibre d'une rivière	441
9.4.4	Rides, dunes, anti-dunes, barres et méandres	444

Encadré 9.1 : Migration de grains dans un sol gelé ou « Comment se forment les cercles de cailloux ? »	386
Encadré 9.2 : Origine naturelle des milieux granulaires	393
Encadré 9.3 : Hydrodynamique des vagues	419
Bibliographie	453
Index	491