

Table des matières

Avant-propos	19
Farhang RADJAÏ, Frédéric DUBOIS	
PREMIÈRE PARTIE. MÉTHODES, GESTION DES ÉCHANTILLONS ET DES CONDITIONS AUX LIMITES, CHOIX DES PARAMÈTRES	23
Chapitre 1. Méthode de dynamique moléculaire	25
Sean MC NAMARA	
1.1. Introduction	25
1.2. Les forces	26
1.2.1. Force normale	27
1.2.1.1. Ressort linéaire	27
1.2.1.2. Amortissement	27
1.2.2. Force tangentielle	28
1.2.2.1. Ressort tangentiel	28
1.2.2.2. Glissement	29
1.2.2.3. Vitesse relative de deux sphères	30
1.2.2.4. Moment cinétique	30
1.2.2.5. Les erreurs d'ordre $O(\delta_n/a)$	31
1.2.3. Vitesse de roulement	34
1.2.4. La torsion	34
1.3. Caractère harmonique du modèle	35
1.3.1. Cas d'un seul grain	35
1.3.2. Chaîne harmonique et dissipative	35
1.4. Des modèles plus réalistes	37
1.4.1. Lois non linéaires	38
1.4.2. Cas de grains nonsphériques	38
1.5. Intégration des équations	39
1.5.1. L'algorithme d'intégration	39

1.5.2. Choix du pas de temps	40
1.6. Implantation de la méthode MD	41
1.6.1. Une ébauche de programme	42
1.6.2. Recherche des voisins	43
1.6.3. L'accès à la mémoire	45
1.7. Conclusion	48
1.8. Bibliographie	48

Chapitre 2. Méthode de dynamique des contacts 51

Michel JEAN

2.1. Introduction	51
2.2. Les variables intervenant dans la description d'un problème de contact frottant	53
2.2.1. Corps, contacteurs, candidats au contact	53
2.3. Cinématique	56
2.3.1. Cinématique classique des corps rigides	56
2.3.2. Variables locales	57
2.3.3. La fonction distance	57
2.3.4. Relations entre les variables généralisées et les variables locales	58
2.3.4.1. Indétermination	59
2.4. Equation de la dynamique	59
2.4.1. Chocs, moments, impulsions, percussions	60
2.5. Lois de contact frottant	61
2.5.1. Unilateralité	63
2.5.2. Lois de choc	65
2.5.3. Lois de frottement	66
2.6. Les équations régissant un problème de contact frottant	67
2.7. La méthode non régulière NSCD	69
2.7.1. Calcul d'une collision	69
2.7.2. Résolution du problème de contact frottant (2.26) pour une collection de corps	73
2.7.2.1. Discrétisation de l'équation de la dynamique	73
2.7.2.2. Forme discrète des relations cinématiques	75
2.7.2.3. Forme discrète des relations de contact frottant	76
2.7.2.4. Restriction de l'équation de la dynamique aux candidats au contact	77
2.7.2.5. Le problème Signorini μ -Coulomb standard	77
2.7.2.6. Solution du problème 2D Signorini μ -Coulomb standard	78
2.7.2.7. Solution du problème de contact frottant pour la collection de corps par une méthode de Gauss-Seidel	79
2.8. Remarques et conclusions	80
2.9. Bibliographie	81

Chapitre 3. Méthodes quasistatiques	83
Jean-Noël ROUX et Gaël COMBE	
3.1. Introduction	83
3.2. Statique et cinématique des réseaux de contact	84
3.2.1. Hypothèse des petites perturbations (HPP)	84
3.2.2. Déplacements, déplacements relatifs et matrice de rigidité	85
3.2.3. Efforts extérieurs, forces de contact et matrice de rigidité.	88
3.2.4. Lois de contact et matrices de raideur	89
3.2.5. Contributions géométriques à la matrice de raideur	91
3.2.6. Stabilité	93
3.3. Illustrations et discussion	94
3.3.1. Définitions, rôles des matrices de rigidité et de raideur	94
3.3.2. Stabilité et équilibre	96
3.3.3. Hyperstaticité, hypostaticité, isostaticité et rareté des contacts	96
3.4. Applications à l'élasticité	101
3.4.1. Calcul des modules élastiques	101
3.4.2. Le domaine élastique	103
3.5. Applications à la déformation anélastique	106
3.5.1. Formulation du problème, propriétés générales	106
3.5.2. Un algorithme de calcul	108
3.5.3. Illustration : régimes I et II en compression biaxiale	112
3.6. Conclusion	113
3.7. Bibliographie	114
Chapitre 4. Méthode de dynamique événementielle	117
Sean MC NAMARA	
4.1. Introduction	117
4.2. Collision dans la limite de rigidité parfaite en une dimension	118
4.2.1. Exemple de traitement par la méthode de dynamique moléculaire	118
4.2.2. Cas d'une rigidité parfaite	122
4.2.3. Interactions dans le cadre de la méthode ED	122
4.3. Collisions en configurations bi- ou tri-dimensionnelles	123
4.3.1. Valeur expérimentale du coefficient de restitution	124
4.4. Effondrement inélastique	125
4.4.1. Effondrement inélastique d'un seul grain sous gravité	125
4.4.2. Effondrement inélastique de trois grains	126
4.4.3. Effondrement inélastique de plusieurs grains	129
4.4.4. Effondrement inélastique en deux ou trois dimensions	129
4.4.5. Comment éviter l'effondrement inélastique	130
4.5. Généralisations	130
4.6. Implantation numérique de la méthode ED	131
4.6.1. Ebauche de programme	131

4.6.2. Optimisations	132
4.6.3. Parallélisation	133
4.7. Conclusion	133
4.8. Bibliographie	134
Chapitre 5. Méthodes d'assemblage de particules	137
Charles VOIVRET, Farhang RADJAI, Jean-Yves DELENNE	
5.1. Introduction	137
5.2. Méthodes d'assemblage par dépôt balistique	138
5.2.1. Dépôt aléatoire avec relaxation	138
5.2.2. Dépôt avec un angle de capture	139
5.3. Méthodes d'assemblage à potentiel de configuration	143
5.3.1. Méthode de dépôt par minimisation d'un potentiel	143
5.3.2. Méthode Monte-Carlo	145
5.4. Gestion de la polydispersité de taille	148
5.4.1. Polydispersité et empilements	148
5.4.2. Génération d'un ensemble discret de tailles	151
5.5. Assemblages polydispersés	156
5.5.1. Modèle analytique de la polydispersité	156
5.5.2. Critères de représentativité	160
5.5.3. Distributions numériquement réalisables	162
5.5.4. Polydispersité et compacité	163
5.6. Conclusion	168
5.7. Bibliographie	168
Chapitre 6. Génération d'assemblages granulaires sous chargement statique	171
Gaël COMBE et Jean-Noël ROUX	
6.1. Introduction	171
6.2. Motivations, objectifs et moyens	171
6.3. Assemblages granulaires sous chargement isotrope	174
6.3.1. Génération des particules et de l'échantillon	175
6.3.2. Assemblages granulaires confinés par des parois rigides	175
6.3.2.1. Cas des parois mobiles	176
6.3.2.2. Cas des parois fixes	184
6.3.3. Assemblages granulaires confinés et conditions aux limites périodiques	187
6.4. Assemblages granulaires sous chargement gravitaire	190
6.4.1. Recherche d'un optimum d'homogénéité	190
6.4.2. Dépôt grain à grain	192
6.4.3. Lâcher en bloc	194
6.4.4. Pluviation contrôlée	196

6.5. Conclusion	199
6.6. Bibliographie	200
Chapitre 7. Conditions aux limites périodiques	203
Farhang RADJAÏ et Charles VOIVRET	
7.1. Introduction	203
7.2. La cinématique	205
7.2.1. Périodicité en position	205
7.2.2. Coordonnées réduites	206
7.2.3. Périodicité en vitesse	207
7.2.4. Tenseur métrique	208
7.2.5. Transformations modulaires	209
7.3. La dynamique	210
7.3.1. Degrés de liberté collectifs	210
7.3.2. Degrés de liberté des particules	212
7.4. Schémas d'intégration	214
7.4.1. Dynamique des contacts	214
7.4.2. Dynamique moléculaire	216
7.4.3. Précautions de mise en œuvre	218
7.5. Conclusion	219
7.6. Bibliographie	221
Chapitre 8. Analyse dimensionnelle et paramètres de contrôle	223
Jean-Noël ROUX et François CHEVOIR	
8.1. Introduction	223
8.2. Simulation de matériaux modèles : paramètres de contrôle	224
8.2.1. Géométrie	224
8.2.2. Lois de contact	224
8.2.2.1. Frottement	225
8.2.2.2. Elasticité	225
8.2.2.3. Forces visqueuses et coefficients de restitution	226
8.2.2.4. Autres mécanismes de dissipation	228
8.2.2.5. Cohésion	228
8.2.2.6. Résistance au roulement	229
8.2.2.7. Cas des grains rigides	230
8.2.3. Analyse dimensionnelle	230
8.2.3.1. Grandeurs liées au matériau	231
8.2.3.2. Raideurs adimensionnées	231
8.2.3.3. Nombre d'inertie	232
8.2.3.4. Paramètres adimensionnés liés à la cohésion	232
8.2.3.5. Bilan et remarques.	233
8.3. Déformation de matériaux granulaires solides	233
8.3.1. Assemblage, confinement, compression	233
8.3.2. Matériaux non cohésifs, déformation quasistatique	235

8.3.3. L'état critique	240
8.4. Ecoulements	242
8.4.1. Cisaillement homogène	242
8.4.2. Loi de comportement	244
8.4.2.1. Influence du nombre inertiel	244
8.4.2.2. Autre choix des paramètres de contrôle	245
8.4.2.3. Influence de l'élasticité des contacts	246
8.4.2.4. Influence du coefficient de frottement	247
8.4.2.5. Influence du coefficient de restitution	247
8.4.2.6. Limite collisionnelle	248
8.4.3. Influence du gradient de contrainte	248
8.4.4. Influence de la cohésion	249
8.5. Conclusion	250
8.6. Bibliographie	253

DEUXIÈME PARTIE. FORMES POLYÉDRIQUES, FORCES DE COHÉSION, INTERACTIONS HYDRODYNAMIQUES ET THERMIQUES, MODÈLES DISCRETS DES GÉOMATÉRIAUX	259
--	------------

Chapitre 9. Modélisation numérique des milieux granulaires à particules polyédriques	261
Frédéric DUBOIS	

9.1. Introduction	261
9.2. Dynamique de corps rigides et paramétrage	263
9.3. Description géométrique des objets	264
9.4. Détection du contact	266
9.4.1. Introduction	266
9.4.2. Etapes de la détection du contact	266
9.4.3. Recherche de proximité	267
9.4.4. Détection approximative	269
9.4.5. Détection du contact entre deux polyèdres convexes	270
9.4.6. Détection du contact entre deux polyèdres non convexes	277
9.5. Mise en œuvre numérique	277
9.5.1. Introduction	277
9.5.2. Quelques bibliothèques existantes pour la détection de contact	278
9.5.3. Quelques problèmes liés aux stratégies de résolution	278
9.5.4. Les choix faits au LMGC	279
9.6. Illustrations	282
9.6.1. Milieux ordonnés	282
9.6.2. Milieux désordonnés	283
9.6.3. Conclusion	285
9.7. Bibliographie	286

Chapitre 10. Modélisation numérique des interactions cohésives	291
Jean-Yves DELENNE, Moulay Saïd EL YOUSOUFI, Vincent TOPIN, Vincent RICHEFEU et Farhang RADJAÏ	
10.1. Introduction	291
10.2. Origines de la cohésion dans les matériaux granulaires	292
10.2.1. Cohésion macroscopique	293
10.2.2. Forces de cohésion	294
10.2.2.1. Forces volumiques	295
10.2.2.2. Forces localisées aux contacts	297
10.2.2.3. Forces faisant intervenir le volume de liant	298
10.3. Modélisation du contact cohésif	300
10.3.1. Gestion du contact	300
10.3.2. Modèle de comportement de lien cohésif	301
10.4. Modèles physiques de contact cohésif	305
10.4.1. Modèles d'adhésion solide	305
10.4.2. Le modèle JKR simplifié	308
10.4.3. Cohésion capillaire	309
10.4.4. Prise en compte du frottement	313
10.5. Méthode des éléments de réseau	315
10.5.1. Connectivité du réseau	316
10.5.2. Eléments rhéologiques 1D	317
10.5.2.1. Élément 1D de type ressort	317
10.5.2.2. Élément 1D de type poutre	318
10.5.3. Résolution numérique	319
10.5.3.1. Cas des éléments ressorts	319
10.5.3.2. Cas des éléments poutres	320
10.5.3.3. Gestion de la rupture	321
10.5.4. Influence du maillage	322
10.5.4.1. Effet de taille finie	322
10.5.4.2. Maillage désordonné	322
10.5.4.3. Désordre granulaire	324
10.6. Comparaison entre approches LEM et DEM cohésive	325
10.7. Alternatives à l'approche LEM	328
10.8. Conclusion	329
10.9. Bibliographie	329
Chapitre 11. Modélisation numérique des interactions fluide-grain	335
Bertrand MAURY et Aline LEFEBVRE-LEPOT	
11.1. Introduction	335
11.2. Simulation numérique directe d'écoulements fluide/particules	338
11.2.1. Réécriture du problème	339
11.2.2. Méthodes utilisant un maillage conforme	340

11.2.3. Méthodes de domaine fictif	342
11.3. Fondement théorique des méthodes	345
11.3.1. Méthodes de splitting	346
11.3.2. Méthode de projection	347
11.3.3. Méthode paramétrique	348
11.3.4. Pénalisation	348
11.3.5. Formulations point-selle	349
11.4. Discrétisation en espace	351
11.5. Résolution effective	353
11.6. Utilisation de la simulation directe	356
11.7. Bibliographie	357

Chapitre 12. Interaction rapprochée de grains immergés 363

Bertrand MAURY et Aline LEFEBVRE-LEPOT

12.1. Introduction	363
12.2. Gestion des contacts dans les simulations fluide-particules	364
12.3. Modèles de collision	365
12.4. Modèles de lubrification	368
12.4.1. Cas lisse	368
12.4.2. Cas d'objets rugueux	370
12.5. Prise en compte numérique de la force de lubrification	373
12.6. Un modèle de contact visqueux	374
12.6.1. Cas plan/particule	375
12.6.2. Cas multi-particule	376
12.7. Bibliographie	378

Chapitre 13. Modélisation numérique de la génération et transmission de la chaleur 381

Mathieu RENOUF et Yves BERTHIER

13.1. Introduction	381
13.2. Granulats et phénomènes thermiques : un problème multi-échelle	381
13.3. Un état de l'art	383
13.3.1. Radiation	383
13.3.2. Conduction	384
13.3.3. Génération locale	385
13.4. Modélisation des phénomènes thermiques locaux	386
13.4.1. Conductance thermique au contact	386
13.4.2. Génération	387
13.5. Evolution de la température	389
13.5.1. Intégration temporelle	389
13.5.1.1. Formulation globale	389
13.5.1.2. Conduction	390
13.5.1.3. Génération	391

13.5.1.4. Convection	392
13.6. Conditions limites	393
13.6.1. Modèle scalaire	393
13.6.2. Conditions limites continues 1D	394
13.6.3. Conditions limites continues 2D	395
13.7. Conclusion	396
13.8. Bibliographie	396
Chapitre 14. Modèles discrets des milieux granulaires humides	401
Bruno CHAREYRE et Luc SCHOLTÈS	
14.1. Introduction	401
14.2. Modèle discret	402
14.2.1. Loi de contact	402
14.2.2. Loi capillaire	403
14.2.3. Comportement macroscopique : simulation d'essais triaxiaux	405
14.2.4. Interprétation des résultats selon le formalisme de Bishop	408
14.3. Homogénéisation	412
14.3.1. Contrainte homogénéisée dans un milieu granulaire humide	412
14.3.2. Evolution du tenseur capillaire	414
14.3.3. Anisotropie	416
14.3.4. Influence de la teneur en eau	420
14.4. De la contrainte capillaire à la contrainte effective	422
14.4.1. Définition	422
14.4.2. Evolution sous chargement isotrope	423
14.4.3. Chargement déviatoire et rupture	425
14.5. Bilan et perspectives	427
14.6. Bibliographie	427
Chapitre 15. Modèles discrets des ouvrages en géomatériaux	431
Frédéric DONZÉ, Pascal VILLARD et Dominique DAUDON	
15.1. Introduction	431
15.2. Principe général de la modélisation des ouvrages	432
15.3. Description du modèle numérique	434
15.3.1. Le modèle d'interaction de base	434
15.3.2. La loi d'interaction dissipative lors d'un écoulement	435
15.3.3. La loi d'interaction dissipative sous impact	436
15.3.4. La loi moment-rotation	437
15.4. Applications aux géo-ouvrages	437
15.4.1. Sollicitations sur les ouvrages paravalanches	438
15.4.1.1. Dispositif expérimental	439
15.4.1.2. Validation du modèle numérique	439
15.4.1.3. Etude de sensibilité du coefficient de traînée C_d	440
15.4.2. Ouvrages de protection contre les chutes de blocs	441

18 Modélisation numérique discrète

15.4.2.1. Aptitude du modèle numérique à rendre compte des phénomènes d'impact	442
15.4.2.2. Simulation d'impact sur merlon	443
15.4.3. Ouvrages en sols renforcés	446
15.4.3.1. Problématique et expérimentations réalisées	448
15.4.3.2. Confrontation entre simulations numériques et résultats expérimentaux	449
15.4.4. Voile en béton armé sous sollicitation extrême	450
15.4.4.1. Impact de corps rigide sur une dalle en béton armé	452
15.4.4.2. Modélisation tridimensionnelle des tests d'impact du CEA-EDF	453
15.5. Conclusion	454
15.6. Bibliographie	456