

# TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

## GÉNIE DES PROCÉDÉS

# Poudres et mélanges granulaires

Modélisation, propriétés, procédés

Gérard THOMAS

Olivier BONNEFOY

ellipses

## TABLE DES MATIÈRES

<b>CHAPITRE I. CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE .....</b>	<b>1</b>
1. <i>Cristal idéal</i> .....	2
1.1. Liaisons interatomiques .....	2
1.2. Édifice et réseaux cristallins .....	4
1.3. Variétés polymorphes .....	5
1.4. Caractérisation des solides par diffraction X.....	6
1.5. Caractérisation de structures par spectrométrie IR.....	8
2. <i>Cristal réel</i> .....	10
2.1. Défauts ponctuels.....	10
2.2. Défauts surfaciques.....	14
2.3. Défauts volumiques.....	16
3. <i>De la structure cristalline à la texture de la poudre</i> .....	16
3.1. Types de contacts inter-grains .....	17
3.2. Le monocristal avec cohésion intra-cristalline .....	17
3.3. Du monocristal à l'agrégat .....	18
3.4. De l'agrégat à l'agglomérat .....	19
3.5. De l'agglomérat à la poudre .....	19
3.6. Rôle de la morphologie dans la cohésion des poudres.....	20
4. <i>Propriétés des poudres</i> .....	21
4.1. Influence de la structure .....	21
4.2. Influence de la texture .....	23
<b>CHAPITRE II. CONSTRUCTION D'EMPILEMENTS .....</b>	<b>25</b>
1. <i>Assemblage ordonné</i> .....	25
1.1. Principe de construction .....	25
1.2. Empilement cristallisé 2D et 3D .....	26
1.3. Forme et réseau de pores .....	28
2. <i>Assemblage aléatoire</i> .....	29
2.1. Origine des désordres géométriques .....	29
2.2. Effets d'exclusion.....	30
2.3. Assemblages 2D de disques identiques .....	33
2.4. Empilement 3D de sphères mono-disperses .....	35
<b>CHAPITRE III. CARACTÉRISATION DES TEXTURES.....</b>	<b>41</b>
1. <i>Définition des grandeurs</i> .....	41
1.1. Espace des grains.....	41
1.2. Espace des pores .....	44
1.3. Interface pore-solide .....	49
2. <i>Mesures</i> .....	51
2.1. Masse volumique .....	51



2.2.	Taille des grains .....	53
2.3.	Morphologie des grains.....	57
2.4.	Porosités .....	59
2.5.	Aire interfaciale gaz-solide .....	61

#### CHAPITRE IV. THERMODYNAMIQUE ET MÉCANIQUE DES SOLIDES DIVISÉS

1.	<i>Thermodynamique</i> .....	63
1.1.	Expression classique des grandeurs .....	63
1.2.	Solide divisé dans une phase gazeuse.....	65
1.3.	Énergie surfacique et aires de contact solide-solide.....	66
1.4.	Énergie volumique dans un monocristal.....	67
1.5.	Énergie totale d'un solide agrégé.....	68
1.6.	Caractérisation des énergies de surface .....	68
2.	<i>Mécanique à l'échelle du grain</i> .....	69
2.1.	Inventaire des forces .....	70
2.2.	Système statique : contact sphère-objet solide.....	76
2.3.	Système dynamique : interaction fluide-particule.....	80
3.	<i>Mécanique à l'échelle de la poudre</i> .....	83
3.1.	État statique .....	83
3.2.	Limite d'écoulement.....	88
3.3.	Caractérisation de la dynamique des poudres.....	91

#### CHAPITRE V. ÉLABORATION ET MISE EN FORME DES POUDRES ..... 94

1.	<i>Élaboration</i> .....	94
1.1.	Cristallisation et précipitation .....	94
1.2.	Broyage.....	95
1.3.	Procédés de séparation .....	98
1.4.	Stockage .....	100
1.5.	Transport .....	101
2.	<i>De la poudre au matériau</i> .....	101
2.1.	Granulation.....	101
2.2.	Compaction .....	103
2.3.	Extrusion.....	103
2.4.	Frittage .....	105

#### CHAPITRE VI. FORMULATION DE MÉLANGES ..... 108

1.	<i>Mélangeage</i> .....	108
1.1.	Objets à mélanger .....	109
1.2.	Mélangeur .....	109
1.3.	Mécanismes.....	110
2.	<i>Ségrégation</i> .....	112
2.1.	Origine : mouvements de particules individualisées .....	112
2.2.	Origine : mouvements collectifs de particules.....	114
2.3.	Cohésion et homogénéité de la poudre.....	118

3. Mélanges industriels .....	119
3.1. Typologie générale .....	119
3.2. Dispositifs spécifiques pour solides divisés .....	121
4. Évaluation de la qualité des mélanges .....	123
4.1. Échantillonnage .....	124
4.2. Analyses .....	126
4.3. Échelle de pertinence .....	127
4.4. Échelle et intensité de ségrégation .....	129
<b>CHAPITRE VII. MODÉLISATIONS DES PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES .....</b>	<b>131</b>
1. Étude de la porosité .....	132
1.1. Observations .....	132
1.2. Modèles de type thermodynamique .....	133
1.3. Mélange idéal .....	134
1.4. Mécanisme d'insertion .....	135
1.5. Mécanisme de substitution .....	135
1.6. Mécanisme d'intercalation .....	137
1.7. Comparaison avec les systèmes réels .....	138
2. Étude des contacts .....	140
2.1. Aire de contact solide-solide .....	141
2.2. Nombre de contacts dans un empilement binaire .....	142
2.3. Mélanges ordonnés .....	143
2.4. Mélanges aléatoires .....	147
3. Étude de l'homogénéité d'un mélange .....	150
3.1. Modèle statistique .....	150
3.2. Modèles à deux domaines de composition .....	152
<b>CHAPITRE VIII. MODÉLISATIONS DISCRÈTES .....</b>	<b>155</b>
1. Présentation générale .....	157
1.1. Intérêt de la discrétisation .....	157
1.2. Typologie des modèles discrets .....	158
2. Physique du contact .....	159
2.1. Principe de la modélisation .....	160
2.2. Déformations plastiques .....	161
3. Méthode des éléments discrets .....	163
3.1. Morphologie des objets .....	163
3.2. Bilan des forces .....	164
3.3. Forces de contact grain-solide .....	164
3.4. Détection des contacts .....	167
3.5. Stabilité numérique .....	169
4. Dynamique événementielle .....	171
4.1. Principe de calcul .....	171
4.2. Équations constitutives .....	171



4.3. Convergence numérique et effondrement inélastique .....	171
5. <i>Interaction grains-fluide</i> .....	171
5.1. Lit fixe .....	173
5.2. Lit fluidisé .....	174
5.3. Cas d'un écoulement fluide turbulent .....	177
<b>CHAPITRE IX. MODÉLISATIONS MIXTES.....</b>	<b>175</b>
1. <i>Approche classique de la réactivité chimique</i> .....	179
1.1. Réactivité en volume et en surface .....	179
1.2. Effet de la courbure de surface .....	180
1.3. Effet de lit .....	181
1.4. Influence des contacts sur la réactivité solide-solide .....	183
1.5. Séparation des variables chimiques et géométriques .....	186
2. <i>Approche quasi-chimique</i> .....	186
2.1. Fondements de la méthode .....	187
2.2. Tassement par choc de grains identiques .....	189
2.3. Compression de poudres.....	191
2.4. Mélangeage de poudres.....	195
<b>CHAPITRE X. MODÉLISATIONS CONTINUES.....</b>	<b>197</b>
1. <i>Propriétés de transport</i> .....	197
1.1. Conductivité thermique .....	197
1.2. Perméabilité .....	203
2. <i>Propriétés mécaniques</i> .....	205
2.1. Contrainte de Janssen .....	205
2.2. Viscosité.....	208
<b>CONCLUSION</b>	<b>213</b>
<b>CORRIGÉS DES EXERCICES</b>	<b>215</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>232</b>
1. <i>Conductivité électrique</i>	232
2. <i>Déformations d'un système granulaire contraint</i>	234
3. <i>Variables statistiques- Loi binomiale</i>	237
4. <i>Formulaire</i>	240
<b>INDEX</b>	<b>242</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>245</b>



La collection TECHNOSUP dirigée par Claude Chèze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

Niveau A Approche (éléments, résumés ou travaux dirigés)  
Niveau B Bases (cours avec exercices et problèmes résolus)  
Niveau C Compléments (approfondissement, spécialisation)

IUT - BTS - 1<sup>er</sup> cycle  
IUP - Licence  
Écoles d'ingénieurs, Master

*L'ouvrage : niveau C (Master - Écoles d'ingénieurs - Recherche)*

L'ouvrage propose quelques clés pour comprendre l'univers fantastique des milieux granulaires, omniprésents dans notre vie quotidienne comme dans l'industrie, depuis les grains de sable, les flocons de neige ou les cendres volcaniques, jusqu'aux catalyseurs solides. Pour cela il développe une approche scientifique, à diverses échelles (atomique, microscopique, macroscopique), aboutissant à une modélisation des milieux granulaires, qui permet de comprendre les différents mécanismes.

Le livre décrit d'abord comment chacun des grains est constitué, des cristallites plus ou moins parfaites aux agglomérats. Puis il analyse les forces de cohésion intervenant entre ces différentes entités et il montre comment ces grains peuvent être arrangés pour former une poudre. Ces poudres sont caractérisées par des grandeurs texturales liées à l'espace des grains et à l'espace des pores. Leurs propriétés mécaniques et thermodynamiques originales sont explicitées pour permettre la mise en œuvre des procédés spécifiques d'élaboration, de mise en forme ou de mélange granulaire évitant la ségrégation.

De nombreux exemples sont traités, avec supports pédagogiques et exercices corrigés.

*Les auteurs :*

*Gérard THOMAS est professeur émérite à l'École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne (EMSE). Il a dirigé le centre SPIN (Science des processus industriels et naturels). Ses recherches portent sur la modélisation des propriétés physiques et chimiques des poudres.*

*Olivier BONNEFOY est Maître-assistant à l'École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne (EMSE). Ses recherches portent sur le comportement des milieux granulaires et la coulabilité des poudres.*

Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.



www.editions-ellipses.fr