

# Table des Matières

---

## **Introduction générale aux céramiques 1**

## **De la poudre à la mise en forme des céramiques 51**

### **I. ADAPTATION DES POUDRES AU PROCEDE 55**

I.1 Introduction 55

I.2 Caractérisation des poudres 56

I.3 Propriétés des barbotines et des pâtes 71

I.4 Les différents broyeurs 97

I.5 Etude de cas 106

### **II. LES PROCEDES DE MISE EN FORME 113**

II.1 Introduction 113

II.2 Notion d'empilement granulaire 116

II.3 Les procédés par voie sèche 122

II.4 Les procédés par voie plastique 125

II.5 Les procédés par voie humide 130

II.6 Autres procédés céramiques spécifiques 133

II.7 Extraction et élimination des auxiliaires de mise en forme (déliantage) 138

II.8 Conclusion 140

## **Frittage des céramiques 143**

### **I. DESCRIPTION MICROSCOPIQUE DU FRITTAGE EN PHASE**

#### **SOLIDE 147**

I.1 Quelques définitions 147

I.2	Observations du frittage	149
I.3	L'origine du frittage en phase solide	153
I.4	La modélisation du frittage en phase solide	157
I.5	Evolution de la microstructure au cours du frittage	166
I.6	Le cas particulier des céramiques	175
I.7	Le frittage vu par le chimiste	176
<b>II.</b>	<b>LE FRITTAGE EN PHASE LIQUIDE</b>	<b>186</b>
II.1	Introduction : Phénoménologie du frittage en présence d'une phase liquide	186
II.2	Paramètres thermodynamiques et facteurs cinétiques	189
II.3	Cinétique de retraits au cours des différents stades du frittage en phase liquide	194
II.4	Grossissement des grains	197
II.5	Conclusion	200
<b>III.</b>	<b>APPROCHE MACROSCOPIQUE ET DÉFORMATION DURANT LA DENSIFICATION</b>	<b>201</b>
III.1	Introduction	201
III.2	Détermination d'une loi « phénoménologique » de la densification d'un matériau homogène	203
III.3	Rôle des inhomogénéités sur la densification	207
III.4	Le frittage contraint : rôle des inclusions sur la densification	209
III.5	Conclusion	219
<b>IV.</b>	<b>FRITTAGE SOUS CONTRAINTES</b>	<b>220</b>
IV.1	Les frittages sous contraintes mécaniques	220
IV.2	Micro-ondes	244
IV.3	Le Frittage Flash SPS	263

<b>V.</b>	<b>MAÎTRISE DES MICROSTRUCTURES, DES NANOSTRUCTURES</b>	<b>282</b>
V.1	Introduction	282
V.2	Mécanismes conduisant à la croissance des grains et à la formation de pores lors de la fabrication de matériaux céramiques	282
V.3	Exemples de développement de microstructures et description des méthodes pour contrôler la croissance cristalline	302
V.4	Fabrication de céramiques texturées	316
V.5	Céramiques nanostructurées	317
V.6	Conclusion	321

## **Initiation aux modélisations 335**

<b>I.</b>	<b>ECHELLES ET MÉTHODES DE MODÉLISATION</b>	<b>339</b>
I.1	Introduction : modéliser quoi et pourquoi ?	339
I.2	Echelle du grain et du contact interparticulaire	341
I.3	Echelle des empilements de particules	345
I.4	Echelle de la pièce	350
I.5	Echelle du procédé	351
I.6	Echelle atomique	353
I.7	Couplage entre les échelles	354
I.8	Conclusion : adapter la modélisation à ses objectifs	355
<b>II.</b>	<b>L'ANALYSE MICROSTRUCTURALE QUANTITATIVE 2D ET 3D POUR OBTENIR DES DONNÉES POUR LA MODÉLISATION</b>	<b>357</b>
II.1	Introduction : modélisation, microstructure et mesures quantitatives	357
II.2	Fraction volumique	359
II.3	Taille et distributions de tailles	360
II.4	Taille et grossissement de grains	364

II.5	Stéréologie	368
II.6	Microstructures	370
II.7	Modélisation, géométrie et grandeurs microstructurales	373
II.8	Imagerie 3D	375
II.9	Conclusion	376
<b>III. DES PARTICULES À LA MICROSTRUCTURE : LA MÉTHODE</b>		
<b>DES ÉLÉMENTS DISCRETS</b>		<b>377</b>
III.1	Généralités	377
III.2	Empilements de particules	378
III.3	Compression en matrice	382
III.4	Frittage	385
III.5	Conductivité	388
III.6	Conclusion et perspectives	390
<b>IV. DE LA MICROSTRUCTURE À LA PIÈCE : LA MÉTHODE DES</b>		
<b>ÉLÉMENTS FINIS</b>		<b>392</b>
IV.1	Généralités	392
IV.2	Le compactage à froid	395
IV.3	Le moulage par injection	399
IV.4	Le frittage naturel	400
IV.5	Conclusion et perspectives	406
<b>Problèmes spécifiques à quelques matériaux</b>		<b>411</b>
<b>I. ELABORATION DES VERRES</b>		<b>415</b>
I.1	Introduction	415
I.2	Conditions de vitrification et structure du verre	421
I.3	Paramètres caractéristiques des verres	433

I.4	Techniques de fabrication industrielles	451
<b>II.</b>	<b>ELABORATION, HYDRATATION ET PRISE DES LIANTS</b>	
	<b>MINERAUX</b>	<b>463</b>
II.1	Introduction	463
II.2	Généralités sur les principaux liants minéraux	463
II.3	Fabrication des ciments courants	465
II.4	Fabrication du plâtre	467
II.5	Hydratation des phases pures du ciment	469
II.6	L'hydratation du ciment	479
II.7	L'adjuvantation des bétons	483
II.8	Béton et développement durable	484
II.9	Hydratation et prise du plâtre	485
<b>III.</b>	<b>MATERIAUX COMPOSITES A MATRICE CERAMIQUE ET</b>	
	<b>CARBONE/CARBONE</b>	<b>487</b>
III.1	Introduction générale aux matériaux composites	487
III.2	Les matériaux composites à matrice céramique	492
III.3	Propriétés et applications associées des CMC	524
III.4	Conclusion	528
<b>IV.</b>	<b>REVETEMENTS CERAMIQUES</b>	<b>529</b>
IV.1	Réaliser un revêtement de surface	529
IV.2	Les relations procédés de dépôt-microstructure	531

## **Spécificités des céramiques, de leur nature à leur élaboration, en fonction de leur application** **567**

<b>I.</b>	<b>LES CERAMIQUES TRADITIONNELLES</b>	<b>573</b>
I.1	Introduction	573

I.2	Généralités	573
I.3	Les matériaux céramiques traditionnels	591
I.4	Les principaux produits	596
I.5	Conclusion	603
<b>II.</b>	<b>CERAMIQUES ET ENVIRONNEMENT, FILTRATION, CATALYSE, ADSORPTION ET SYSTEMES COUPLES</b>	<b>605</b>
II.1	Introduction	605
II.2	Matériaux céramiques pour l'environnement	605
II.3	Membranes et filtres	608
II.4	Catalyseurs et adsorbants	626
II.5	Matériaux et systèmes et multifonctionnels	630
II.6	Conclusion	638
<b>III.</b>	<b>BIOCERAMIQUES</b>	<b>639</b>
III.1	Introduction	639
III.2	Utilisation biomédicale des céramiques : quelles fonctions à assurer ?	640
III.3	Choix des matériaux	650
III.4	Procédés d'élaboration et de fabrication des biocéramiques	657
III.5	Développements actuels, futures stratégies	661
III.6	Conclusion	664
<b>IV.</b>	<b>CERAMIQUES POUR L'ENERGIE NUCLEAIRE :</b>	
	<b>DES CONDITIONS SPECIFIQUES POUR LA MISE EN ŒUVRE</b>	<b>665</b>
IV.1	Introduction	665
IV.2	Contraintes sur les céramiques utilisées dans la production d'énergie nucléaire	667
IV.3	Fabrication des combustibles nucléaires	674
IV.4	R&D sur la fabrication des combustibles	687

IV.5	R&D sur la gestion des déchets nucléaires	690
IV.6	Conclusion	692
<b>V.</b>	<b>CERAMIQUES ELECTROCHIMIQUES</b>	<b>693</b>
V.1	Introduction	693
V.2	Aperçu des applications, des matériaux utilisés, des structures et, donc, des technologies de réalisation	694
V.3	Les cellules galvaniques	695
V.4	Technologies de réalisation des substrats et des couches	716
V.5	Conclusion	723
<b>VI.</b>	<b>CERAMIQUES POUR L'ELECTRONIQUE ET L'ELECTROTECHNIQUE</b>	<b>725</b>
VI.1	Les isolants électriques	726
VI.2	Les matériaux céramiques semi-conducteurs	756
VI.3	Les céramiques piézoélectriques	761
VI.4	Les céramiques magnétiques	764
VI.5	Conclusion	767
<b>VII.</b>	<b>CERAMIQUES THERMOMECHANIQUES</b>	<b>769</b>
VII.1	Introduction	769
VII.2	Résistance à la rupture et fiabilité	770
VII.3	Ténacité	772
VII.4	Résistance à la propagation de fissures	774
VII.5	Propagation sous critique de fissures	778
VII.6	Fatigue cyclique	782
VII.7	Résistance au choc thermique	785
VII.8	Fluage de l'alumine et des composites à base d'alumine	789
VII.9	Conclusion	798

<b>VIII. LES REFRACTAIRES</b>	<b>799</b>
VIII.1 Introduction	799
VIII.2 Définition et fonctions des céramiques réfractaires	800
VIII.3 Description des produits réfractaires	801
VIII.4 Choix des céramiques réfractaires en fonction de leurs propriétés d'emploi et exemples d'applications	812
VIII.5 Les procédés et les technologies de fabrication et de mise en œuvre	821
VIII.6 Conclusion	827

