

Ouvrage coordonné par:

Marcel Lahmani, vice-président du club Nano-MicroTechnologie, physicien.

Catherine Bréchnignac, membre de l'Académie des sciences, présidente du CNRS.

Philippe Houdy, directeur du Laboratoire d'étude des milieux nanométriques, professeur à l'université d'Évry-Val d'Essonne.

Les auteurs

Pascal Aubert est Maître de Conférences au LMN, Université d'Évry.

David Babonneau est Chargé de Recherche CNRS au LMP, Université de Poitiers, Chasseneuil.

Frédéric Bernard est Professeur au LRRS, Université de Bourgogne, Dijon.

Serge Berthier est Professeur à l'Université Denis Diderot, INSP, Paris.

Jean-Claude Bertolini est Directeur de Recherche CNRS à l'IRC, Villeurbanne.

Laurent Bonneviot est Professeur des Universités. Laboratoire de chimie, CNRS-ENS Lyon.

Francisco José Cadete Santos Aires est Chargé de Recherche CNRS, à l'IRC, Villeurbanne.

Florent Calvo est Chargé de Recherche CNRS au LPQ, IRSAMC, UPS Toulouse.

Matthieu Chagny est Ingénieur Application à DGTec, Moirans.

Yannick Champion est Chargé de Recherche, Directeur du CECM, Vitry-sur Seine.

Élisabeth Charlaix est Professeur de l'Université Lyon 1, LPMCN, Villeurbanne.

Alexa Courty est Maître de Conférences au LM2N, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Patrick Couvreur est Professeur, Directeur de l'UMR CNRS « Physico-chimie, Pharmacotechnie et Biopharmacie », Université de Paris-Sud, Châtenay-Malabry.

Jean-Alain Dalmon est Directeur de Recherche CNRS, à l'IRC, Villeurbanne.

Renaud Denoyel est Directeur de Recherche CNRS au MADIREL, Université de Provence, Marseille.

Francesco Di Renzo est Directeur de Recherche CNRS à l'ENSCM, Montpellier.

Véronique Dufaud est Chargée de Recherche au Laboratoire de Chimie, CNRS-ENS Lyon.

Zhi-Qiang Feng est Professeur au LMEE, Université d'Évry.

Marc Fivel est Chargé de Recherche CNRS au GPM2-ENSPG, Saint-Martin-d'Hères.

Éric Gaffet est Directeur de Recherche CNRS au NRG-UTBM, Belfort.

Dominique Givord est Directeur de Recherche CNRS au Laboratoire Louis Néel, Grenoble.

Claude Henry est Directeur de Recherche CNRS au CRMCN, Marseille.

Dorothée Ingert est Maître de Conférences au LM2N, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Pierre-Paul Jobert est Directeur Général de DGTec, Moirans.

Pierre Joli est Professeur au LSC, Université d'Évry.

Pierre Labastie est Professeur d'Université. Laboratoire CAR, IRSAMC, UPS, Toulouse.

Sid Labdi est Maître de Conférences et Directeur adjoint du LMN, Université d'Évry.

Christophe Laurent est Professeur au CIRIMAT, CNRS-UPS-INP, Toulouse.

Gérard Le Caër est Directeur de Recherche CNRS au GMCN, CNRS-Université de Rennes I, Rennes.

Florence Lecouturier est Ingénieur de Recherche CNRS au LNCMP, CNRS-UPS-INSA, Toulouse.

Jacques Livage est Professeur au Collège de France. LCMC, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Patrick Maestro est Directeur scientifique à Rhodia Recherches et Technologies, Aubervilliers.

Alain Mocellin est Professeur émérite à l'INPL, Nancy.

Jean-Claude Nièpce est Professeur émérite au LRRS, Université de Bourgogne, Dijon.

Jean-François Nierengarten est Chargé de Recherche CNRS au GCFSC, Laboratoire de Chimie de Coordination du CNRS, Toulouse.

Joël Patarin est Directeur de Recherche CNRS au LMPC, ENSCMu, Mulhouse.

Alberto Pimpinelli est Professeur à l'Université Clermont 2, au LASMEA, et visiting Professor à l'Université du Maryland.

Laurent Pizzagalli est Chargé de Recherche CNRS au LMP, Université de Poitiers, Chasseneuil.

Emmanuelle Reynaud est Maître de Conférences au LARMAUR, FRE-CNRS, Rennes.

Johannes Richardi est Maître de Conférences au LM2N, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

Jean-Paul Rivière est Professeur au LMP, Université de Poitiers, Chasseneuil.

Jean-Luc Rousset est Chargé de Recherche CNRS à l'IRC, Villeurbanne.

Didier Roux est Directeur de la Recherche Saint-Gobain, La Défense.

Tanguy Rouxel est Professeur, Directeur du LARMAUR, FRE-CNRS, Rennes.

Nathalie Solladié est Chargée de Recherche CNRS au G2SP, Laboratoire de Chimie de Coordination du CNRS, Toulouse.

Michel Soulard est Ingénieur de Recherche au LMPC, ENSCMu, Mulhouse.

Olivier Spalla est Ingénieur CEA, au DRECAM, CEA Saclay, Gif-sur-Yvette.

Fernand Spiegelman est Directeur de Recherche CNRS au LPQ, IRSAMC, UPS, Toulouse.
Abdelhafed Taleb est Maître de Conférences au LECA, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
Ludovic Thilly est Maître de Conférences au LMP, Université de Poitiers, Chasseneuil.
Christophe Tromas est Maître de Conférences au LMP, Université de Poitiers, Chasseneuil
Fabrice Vallée est Directeur de Recherche CNRS au CPMOH-Université de Bordeaux I, Talence.
Henri Van Damme est Professeur à l'ESPCI, PCPMD, Paris.
Marc Verdier est Chargé de Recherche CNRS au LTPCM-INPG, Saint-Martin d'Hères.
Maria Zei est Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche au LMN, Université d'Évry.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Préface

Introduction : Nanomatériaux et nanochimie

PARTIE I : PRINCIPES DE BASE ET PROPRIETES FONDAMENTALES

Chapitre 1 : Effets de taille sur la structure et la morphologie de nanoparticules libres ou supportées

1 Effet de taille et de confinement

1.1 Introduction

1.2 Fraction d'atomes de surface

1.3 Énergie spécifique de surface / contrainte de surface

1.4 Effet sur le paramètre de maille

1.5 Effet sur la densité d'états de phonons

2 Morphologie des nanoparticules

2.1 Forme d'équilibre d'un cristal macroscopique

2.2 Forme d'équilibre de cristaux nanométriques

2.3 Morphologie des particules supportées

Chapitre 2 : Structure et transitions de phase dans les nanocristaux

1 Introduction

2 Transitions de phases cristallines dans les nanocristaux

2.1 Transitions de phases et granulo-dépendance

2.2 Thermodynamique élémentaire de la granulo-dépendance des transitions de phase

2.3 Influence de la surface ou de l'interface des nanocristaux

2.4 Modification des barrières de transition

3 Évolution géométrique de la maille dans les nanocristaux

3.1 Effet granulo-dépendant

3.2 Théorie

3.3 Influence de la surface / interface des nanocristaux sur le paramètre de maille

3.4 Existe-t-il un gradient de l'état cristallin à l'intérieur des nanocristaux ?

Chapitre 3 : Thermodynamique et transition solide-liquide

1 Évolution de la transition solide-liquide avec la taille

1.1 Du macroscopique au nanométrique

1.2 De la nanoparticule à la molécule

2 Thermodynamique des très petits systèmes

2.1 Généralités

2.2 Inéquivalence des ensembles

2.3 Coexistence dynamique des phases

2.4 Stabilité d'une particule isolée ; équilibre thermodynamique

3 Évaporation : conséquences et observations

3.1 Théories statistiques de l'évaporation

3.2 Lien avec la transition solide-liquide : résultats numériques

3.3 Approches expérimentales de l'évaporation

3.4 Au-delà de l'évaporation unimoléculaire

3.5 Vers la transition liquide-gaz

Chapitre 4 : Modélisations et Simulations de la dynamique des nano-objets

1 Introduction

- 2 Agrégats libres d'atomes : simulations de dynamique moléculaire
- 3 Évolution vers l'équilibre de nanoagrégats libres et supportés : simulations Monte Carlo cinétique

Partie II : IMPLICATIONS DE L'ÉCHELLE NANOMÉTRIQUE SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Chapitre 5 : Magnétisme des nanomatériaux

- 1 Magnétisme de la matière
 - 1.1 Moment magnétique
 - 1.2 Ordre magnétique
 - 1.3 Anisotropie magnétocristalline
- 2 Processus d'aimantation et matériaux magnétiques
 - 2.1 Énergie de champ démagnétisant – Domaines et parois
 - 2.2 Processus d'aimantation
 - 2.3 Matériaux magnétiques de types divers
- 3 Magnétisme en dimensions réduites
 - 3.1 Moment magnétique dans les agrégats
 - 3.2 Ordre magnétique dans les nanoparticules
 - 3.3 Anisotropie magnétique dans les agrégats et nanoparticules
- 4 Magnétostatique et processus d'aimantation dans les nanoparticules
 - 4.1 Particules magnétiques monodomaines
 - 4.2 Activation thermique, superparamagnétisme
 - 4.3 Rotation cohérente dans les nanoparticules
 - 4.4 De l'activation thermique à l'effet tunnel macroscopique
- 5 Magnétisme des nanosystèmes couplés
 - 5.1 Nanocristaux couplés par échange : matériaux ultra-doux et renforcement de rémanence
 - 5.2 Coercitivité de nanocomposites
 - 5.3 Décalage d'échange dans les systèmes constitués de nanoparticules ferromagnétiques couplées à une matrice antiferromagnétique

Chapitre 6 : Structure électronique dans les agrégats et les nanoparticules

- 1 Introduction
- 2 Le modèle de la goutte liquide
- 3 Méthodes de calcul de la structure électronique
 - 3.1 Approximation de Born-Oppenheimer. Notion de surface de potentiel
 - 3.2 Calcul ab initio de la structure électronique
 - 3.3 Théorie de la fonctionnelle de la densité
 - 3.4 Analyse de charges
 - 3.5 Descriptions approchées et semi-empiriques
 - 3.6 Bandes d'énergie et densités d'états
- 4 Application à quelques exemples typiques
 - 4.1 Nanoparticules métalliques
 - 4.2 Agrégats moléculaires
 - 4.3 Agrégats ioniques et ionocovalents
 - 4.4 Systèmes covalents
- 5 Changements de valence
 - 5.1 Transitions avec la taille
 - 5.2 Transitions avec la stœchiométrie
- 6 Nanotubes
- 7 Perspectives

Chapitre 7 : Propriétés optiques des nanoparticules métalliques

- 1 Réponse optique, agrégats libres et matériaux composites
- 2 Réponse optique dans l'approximation quasi statique : nanosphères
- 3 Constante diélectrique d'un métal : effet de la taille nanométrique
- 4 La résonance plasmon de surface dans l'approximation quasi statique : nanosphères
- 5 La résonance plasmon de surface : effet quantique aux petites tailles ($D < 5\text{nm}$)
- 6 Cas général des nanosphères : le modèle de Mie

7 Nanoparticules non sphériques ou non homogènes dans le modèle quasi statique

7.1 Effet de forme : ellipsoïde

7.2 Effet de structure : système cœur-coquille

8 Exaltation du champ électromagnétique : applications

8.1 Réponse optique non linéaire

8.2 Spectroscopie résolue en temps

8.3 Exaltation locale de la diffusion Raman : effet SERS

9 Conclusions

Chapitre 8 : Propriétés mécaniques et nanomécaniques

1 Propriétés mécaniques macroscopiques

1.1 Introduction

1.2 Propriétés élastiques

1.3 Dureté

1.4 Ductilité

1.5 Modélisations numériques

2 Propriétés nanomécaniques

2.1 Expérimentation

2.2 Modélisation

Chapitre 9 : Superplasticité

1 Introduction

2 Mécanisme

3 Matériaux nanostructurés superplastiques

4 Applications industrielles

Chapitre 10 : Réactivité des nanoparticules métalliques

1 Effet de la taille

1.1 Propriétés structurales

1.2 Propriétés électroniques

1.3 Réactivité en chimisorption et catalyse des nanoparticules monométalliques

2 Effet du support

3 Effet d'alliage

3.1 Influence de la ségrégation superficielle

3.2 Effets géométriques

3.3 Effets électroniques

4 Méthodes de préparation et de mise en œuvre au laboratoire et dans l'industrie

Annexe : schématisation du processus catalytique

Chapitre 11 : Systèmes inverses – Les solides nanoporeux

1 Introduction

2 Nomenclature : les grandes familles de matériaux poreux

3 Les zéolithes et solides microporeux apparentés

4 Les solides mésoporeux organisés

5 Les solides nanoporeux désordonnés

Chapitre 12 : Systèmes inverses – Fluides confinés : diagramme de phase et métastabilité

1 Déplacement des transitions du premier ordre : évaporation–condensation

1.1 Isothermes d'adsorption

1.2 Condensation capillaire

1.3 Pression capillaire et rayon de Kelvin

1.4 Cas d'un fluide non mouillant

1.5 Cas d'un fluide parfaitement mouillant

1.6 Hystérésis, métastabilité et nucléation

2 Fusion – solidification

3 Modification de la température critique

4 Ultra-confinement : les microporeux

Chapitre 13 : Chimie supramoléculaire, applications et perspectives

1 De la chimie moléculaire à la chimie supramoléculaire

- 2 Reconnaissance moléculaire
- 3 Chimie de coordination anionique et reconnaissance de substrats anioniques
- 4 Reconnaissance multiple
- 5 Applications
- 6 Perspectives

Chapitre 14 : Nanocomposites ou le dépassement du compromis

- 1 Composites et nanocomposites
- 2 Quelques rappels sur les polymères
 - 2.1 Les chaînes idéales
 - 2.2 La transition vitreuse
 - 2.3 L'élasticité entropique
- 3 Les nanocharges
 - 3.1 Les argiles
 - 3.2 Les nanotubes de carbone
- 4 Renforcement et contrôle de la perméabilité : les modèles
 - 4.1 Renforcement (augmentation du module)
 - 4.2 Étanchéifier (diminuer la diffusivité)
- 5 Renforcement et perméabilité des nanocomposites : faits et explications
 - 5.1 Le renforcement : les cas heureux et les cas moins heureux...
 - 5.2 Étanchéité
 - 5.3 Stabilité dimensionnelle
 - 5.4 Résistance au feu
- 6 Conclusions

PARTIE III : MÉTHODES D'ÉLABORATION DES NANOMATÉRIAUX ET DES NANOPARTICULES

Chapitre 15 : Les spécificités liées à la croissance à l'échelle nanométrique

- 1 Introduction
- 2 Thermodynamique des transitions de phases
- 3 Notions de dynamique des transitions de phases
 - 3.1 Thermodynamique de la décomposition spinodale
 - 3.2 Thermodynamique des phénomènes de nucléation/croissance
- 4 Comment contrôler la taille ?
- 5 Comment provoquer la transition de phase ?
- 6 Application au cas des nanoparticules solides
 - 6.1 Contrôle de la nucléation
 - 6.2 Contrôle de la croissance
 - 6.3 Contrôle de l'agrégation, stabilité des dispersions colloïdales
- 7 Casser la matière en morceaux

Chapitre 16 : Phase gazeuse et nanopoudres

- 1 Introduction
- 2 Nécessité d'un passage par l'état gazeux
- 3 Principales étapes de l'élaboration en phase gazeuse
- 4 Condensation spontanée des nanoparticules : germination homogène
- 5 Phénomènes néfastes postcondensation, contrôle de l'état nanométrique
 - 5.1 Pourquoi ces effets se produisent-ils ?
 - 5.2 Croissance des particules par condensation du gaz
 - 5.3 Coagulation coalescente
- 6 Formation de la vapeur, production de nanopoudres
 - 6.1 Procédés physiques
 - 6.2 Procédé chimique : pyrolyse laser
- 7 Conclusion

Chapitre 17 : Préparation des poudres nanocomposites par réaction gaz – solide et par précipitation

- 1 Introduction
- 2 Synthèse des poudres nanocomposites par réaction gaz – solide

- 2.1 Synthèse des poudres nanocomposites « intergranulaires » et « nano-nano »
- 2.2 Synthèse des poudres nanocomposites « intragranulaires » et « mixtes intra-inter »
- 3 Conclusion

Chapitre 18 : Méthodes colloïdales et anisotropie de forme

- 1 Introduction
- 2 Les tensioactifs (TA)
- 3 Les micelles inverses : le nanoréacteur sphérique
- 4 Facteurs influençant le contrôle de forme des nanocristaux
 - 4.1 Influence du moule colloïdal sur le contrôle de la forme des nanocristaux
 - 4.2 Influence des anions dans la croissance des nanocristaux
 - 4.3 Influence de l'adsorption de molécules sur la croissance nanocristalline
- 5 Conclusion

Chapitre 19 : Broyage mécanique

- 1 Introduction
 - 1.1 La mécanosynthèse
 - 1.2 L'activation mécanique
- 2 Les broyeurs
- 3 Les mécanismes
 - 3.1 Affinement de taille des cristallites
 - 3.2 Paramètres pertinents de la mécanosynthèse/activation mécanique
 - 3.3 Mécanique de la mécanosynthèse
- 4 Les matériaux et leurs applications
 - 4.1 Mécanosynthèse
 - 4.2 Activation mécanique
- 5 Mise en forme/densification des nanomatériaux
 - 5.1 Procédés « classiques »
 - 5.2 Le procédé MAFAPAS (Mechanically Activated Field Activated Pressure Assisted Synthesis)
- 6 La méthode par déformation plastique dite sévère ou encore par hypercorroyage
 - 6.1 Torsion sous forte pression
 - 6.2 Technique du tube coudé (ECA – Equal Channel Angular Pressing)
- 7 Mécanosynthèse massive
- 8 Élaboration de nanocomposites par extrusion, étirage, emboutissage

Chapitre 20 : Fluides supercritiques

- 1 Définition
- 2 Propriétés physico-chimiques
 - 2.1 Solubilité
 - 2.2 Viscosité
 - 2.3 Diffusion
 - 2.4 Conductivité thermique
- 3 Applications
 - 3.1 Purification – extraction
 - 4.1 Milieu de synthèse

partie IV : PROCÉDES DE FABRICATION DES MATÉRIAUX MASSIFS NANOSTRUCTURES et des matériaux nanoporeux

Chapitre 21 : Matériaux massifs nanostructurés obtenus par frittage de poudres

- 1 Le frittage
 - 1.1 Définition
 - 1.2 Phénomènes mis en jeu lors du frittage
 - 1.3 Les différents types de frittage
 - 1.4 Comment préserver la nanostructure au cours du frittage
- 2 Le procédé SPS (Spark Plasma Sintering)
 - 2.1 Principe du procédé SPS
 - 2.2 Les atouts du procédé SPS
 - 2.3 Illustrations dans le domaine des nanomatériaux

Chapitre 22 : Auto-assemblage de nanomatériaux à l'échelle macroscopique

- 1 Fabrication des nanomatériaux
- 2 Élaboration de réseaux 2D et 3D de nanomatériaux
 - 2.1 Méthodes de dépôt des nanomatériaux sur un substrat solide
 - 2.2 Forces induisant l'auto-organisation
 - 2.3 Structure cristalline d'arrangements 2D et 3D de nanomatériaux
- 3 Conclusion

Chapitre 23 : Assemblages de nanoparticules magnétiques

- 1 Le magnétisme des assemblages de nanoparticules magnétiques
- 2 Les structures des assemblages de nanoparticules magnétiques déposées sans champ
- 3 Les structures des assemblages de nanoparticules magnétiques déposées sous champ
 - 3.1 Le cas perpendiculaire
 - 3.2 Le cas parallèle

Chapitre 24 : Revêtements nanostructurés

- 1 Méthodologie pour la réalisation de revêtements nanostructurés superdurs
 - 1.1 Multicouches de période nanométrique
 - 1.2 Nanocomposites
- 2 Méthodes d'élaboration
 - 2.1 Principes généraux
 - 2.2 Dépôts chimiques en phase vapeur par PACVD
 - 2.3 Dépôts physiques en phase vapeur par pulvérisation et par arc cathodique
 - 2.4 Dépôts physiques en phase vapeur par pulvérisation par faisceau d'ions

Chapitre 25 : Dispersion dans les solides

- 1 Méthodes chimiques
 - 1.1 Synthèse de verres dopés
 - 1.2 Méthode sol-gel
- 2 Méthodes physiques
 - 2.1 Implantation ionique
 - 2.2 Méthodes de pulvérisation/évaporation
 - 2.3 Ablation laser pulsée
 - 2.4 Dépôt d'agrégats à faible énergie

Chapitre 26 : Milieux nanoporeux

- 1 Introduction
- 2 Synthèse de solides microporeux cristallisés
 - 2.1 Méthode de synthèse
 - 2.2 Processus de cristallisation – exemple : les zéolithes
 - 2.3 Principaux agents structurants organiques utilisés lors de la synthèse de solides microporeux cristallisés
 - 2.4 Rôle des cations minéraux et des espèces organiques
 - 2.5 L'effet « template » des espèces organiques
 - 2.6 Caractéristiques de porosité des zéolithes et solides apparentés
 - 2.7 Applications des matériaux zéolithiques
- 3 Synthèse de solides mésoporeux organisés
 - 3.1 Méthode de synthèse
 - 3.2 Définition et rôle du tensioactif
 - 3.3 Mécanismes proposés pour la formation de la phase MCM-41
 - 3.4 Caractéristiques des silices mésoporeuses obtenues en présence de molécules amphiphiles
 - 3.5 Caractérisation structurale des solides nanoporeux par diffusion des rayons X et des neutrons
- 4 Conclusion

Chapitre 27 : Matériaux nanostructurés par empreinte moléculaire

- 1 Introduction
- 2 Aspect fondamental
 - 2.1 Principe général
 - 2.2 Rôle des sites de complexation pendant le processus d'impression

- 2.3 Structure et propriétés de la matrice polymérique
- 3 Procédures et méthodologies mises en jeu lors de l'impression moléculaire
 - 3.1 Polymères organiques imprimés
 - 3.2 Matrices inorganiques imprimées
- 4 Applications
 - 4.1 Séparation d'un mélange d'herbicides
 - 4.2 Synthèse de l'□-aspartame
 - 4.3 Séparation chirale d'amino-acides par échange de ligand sur un site métallique
 - 4.4 Élimination spécifique de lanthanides et d'actinides dans un effluent à haute activité radioactive
- 5 Récents défis et progrès

partie V : APPLICATIONS DES NANOMATÉRIAUX

Chapitre 28 : Électronique, électromagnétisme

- 1 Condensateurs céramique multicouches
 - 1.1 Qu'est-ce qu'un condensateur céramique multicouche ?
 - 1.2 Les exigences du marché
 - 1.3 Les contraintes imposées par ces exigences
 - 1.4 Des céramiques diélectriques à base de titanate de baryum à nanograins
- 2 Enregistrement magnétique
 - 2.1 Description du fonctionnement général
 - 2.2 Matériau support d'enregistrement. Enregistrement longitudinal et perpendiculaire
 - 2.3 Tête d'écriture
 - 2.4 Tête de lecture
 - 2.5 Moteur de rotation du disque

Chapitre 29 : Optique

- 1 Cosmétiques
 - 1.1 Introduction
 - 1.2 Les nano-oxides de titane en cosmétique : la protection solaire
 - 1.3 Conclusion
- 2 Nanophores
 - 2.1 Introduction
 - 2.2 Les luminophores : généralités
 - 2.3 Principes de fonctionnement
 - 2.4 Applications industrielles
 - 2.5 Conclusion
- 3 Nano-ingénierie des surfaces
 - 3.1 Quelle est la surface d'une ville ?
 - 3.2 Des surfaces super-hydrophobes
 - 3.3 Des surfaces auto-nettoyantes et super-hydrophiles
 - 3.4 Quand le béton devient le garant d'un air pur
- 4 Cristaux photoniques
 - 4.1 Comment font les insectes et les oiseaux ?
 - 4.2 Cristaux photoniques et bandes interdites photoniques
 - 4.3 Guides et cavités
 - 4.4 Des cristaux colloïdaux aux cristaux photoniques

Chapitre 30 : Mécanique

- 1 Silices précipitées pour pneus haute énergie
 - 1.1 Fabrication des silices précipitées
 - 1.2 Pneumatiques et autres applications
- 2 Lattes de soudure en céramique/métal
 - 2.1 Les céramiques
 - 2.2 Mécanosynthèse réactive et broyage à haute énergie
 - 2.3 L'amélioration des propriétés
- 3 Matrices amorphes renforcées

- 3.1 L'ordre ne sied pas à tous les matériaux
- 3.2 Incorporation des nanoparticules aux matrices amorphes
- 3.3 Des pistes à suivre
- 3.4 Une longue route
- 4 Solides nanoporeux comme ressorts, amortisseurs et pare-chocs moléculaires
 - 4.1 Introduction
 - 4.2 Principe
 - 4.3 Diagramme pression-volume
 - 4.4 Énergie stockée et énergie restituée
 - 4.5 Causes de l'irréversibilité
 - 4.6 Les matières (solide et liquide) des systèmes et leur comportement
 - 4.7 Applications pratiques
- 5 Bobines hauts champs
 - 5.1 Cahier des charges du développement des champs magnétiques pulsés intenses
 - 5.2 Élaboration des conducteurs renforcés à matrice de cuivre
 - 5.3 Géométrie et microstructure des conducteurs nanofilamentaires Cu/Nb
 - 5.4 Propriétés physiques des conducteurs nanofilamentaires Cu/Nb
 - 5.5 Conclusion

Chapitre 31 : Biologie et environnement

- 1 Catalyseurs minéraux pour les moteurs diesel
- 2 Nanotechnologies et nouveaux médicaments
 - 2.1 Introduction
 - 2.2 Les vecteurs synthétiques : liposomes, nanoparticules
 - 2.3 Conclusion
- 3 Nanoparticules magnétiques et applications biomédicales
 - 3.1 Bactéries magnétotactiques
 - 3.2 Pigeons voyageurs
 - 3.3 Séparation magnétique
 - 3.4 Nanoparticules magnétiques, agents de contraste en imagerie par résonance magnétique
 - 3.5 Nanoparticules magnétiques et traitement des tumeurs
- 4 Membranes zéolithiques pour procédés de séparation et réacteurs catalytiques
 - 4.1 Introduction
 - 4.2 Les membranes microporeuses
 - 4.3 Les membranes zéolithiques : élaboration et caractérisation
 - 4.4 Application en séparation gazeuse
 - 4.5 Application en réacteur catalytique
- 5 Nanoparticules métalliques et catalyse
 - 5.1 Préparation et caractérisation des catalyseurs Pd/Si₃N₄
 - 5.2 Propriétés en oxydation totale du méthane : mise en œuvre au laboratoire
 - 5.3 Mise en œuvre pour une application comme panneau radiant (émetteur d'énergie infrarouge)

Index

[Retour](#)