

TABLE DES MATIÈRES

Les nanosciences	3
Les auteurs	4
Remerciements	14
Préface	15
Avant-propos	18
Introduction : L'échelle nano	20
<i>Louis Laurent</i>	
1 « Il y a plein de place tout en bas »	20
2 Un peu d'histoire	21
3 Le nanomonde	23
3.1 La matière à l'échelle de quelques atomes	23
3.2 Électricité	25
4 Comment fabriquer des objets si petits ?	26
4.1 Auto-organisation	27
4.2 Nanofabrication	28
4.3 Imiter la nature	28
5 Pour quoi faire ?	29
5.1 Nanomatériaux	29
5.2 Nanoélectronique	30
5.3 Biologie, nanomédecine et santé	30
6 Les débats	31
7 Perspectives	34
PREMIÈRE PARTIE NANOPHYSIQUE, NANOÉLECTRONIQUE ET NANOPHOTONIQUE	37
Chapitre 1 PANORAMA DU DOMAINE	38
<i>Jean-Michel Lourtiox</i>	
1 Y a-t-il une feuille de route pour la nanophysique ? L'exemple de la nanoélectronique	38
2 Des nanotechnologies de plus en plus performantes, mais aussi de plus en plus flexibles	42
2.1 Deux approches complémentaires	42
2.2 Généralités sur les procédés de fabrication	43
2.3 Lithographie à haute résolution	44
2.4 Gravure	45
2.5 Dépôts et traitements de surface à l'échelle atomique	46

2.6	La nano-impression : des nanomètres bon marché au mètre carré.....	48
2.7	« Nanolegos » et nouvelles méthodes d'assemblage à trois dimensions.....	49
3	Les nano-objets prennent de la longueur : des agrégats et boîtes quantiques aux nanotubes, nanofils et nanorubans.....	51
3.1	Fabrication des nano-objets.....	52
3.2	Propriétés physiques des nano-objets.....	57
3.3	Coupe de Lycurgue.....	60
4	Voir et manipuler les nanostructures : les microscopes se diversifient	61
4.1	Microscope électronique à transmission à très haute résolution	62
4.2	Microscope à effet tunnel : imagerie et manipulation.....	63
4.3	Microscope à force atomique.....	65
4.4	Microscopie optique en champ proche : observation et manipulation.....	66
4.5	En guise de commentaires.....	69
5	La nanoélectronique de demain, le défi de la consommation « zéro »	70
5.1	Transistor MOS et technologies actuelles.....	70
5.2	Électronique de spin et nanomagnétisme.....	74
5.3	Composants à effets quantiques.....	79
5.4	Composants à petit nombre d'électrons.....	80
5.5	Électronique moléculaire.....	81
5.6	Memristors et architectures neuro-inspirées.....	82
5.7	Conclusion.....	83
6	La nanophotonique, sœur jumelle de la nanoélectronique ?.....	84
6.1	Micro-nanosources optiques, lasers et sources à photons contrôlés.....	85
6.2	Cristaux photoniques et métamatériaux.....	88
6.3	La plasmonique, une piste pour le photovoltaïque ou la biodétection.....	89
6.4	Télécommunications et interconnexions optiques : traits d'union entre la photonique et l'électronique.....	90
6.5	La photonique aux longueurs d'onde extrêmes : l'ultraviolet et les ondes térahertz.....	93
7	La nanophysique, une physique résolument interdisciplinaire.....	94
7.1	Des nanofils dans des microsystèmes électromécaniques.....	95
7.2	Les nanobiotechnologies, convergence entre les sciences physiques et les sciences du vivant.....	96
8	La nanophysique demain ?.....	100
	Bibliographie.....	102
	Chapitre 2 EXEMPLES D'APPLICATION	107
	A. DU NANOMÈTRE AU MÉGAWATT : LES APPLICATIONS PHOTOVOLTAÏQUES	107
	<i>Bruno Ghyselen</i>	
	B. LA RÉVOLUTION TRANQUILLE DES CAPTEURS MAGNÉTIQUES	114
	<i>Claude Fermon</i>	
1	Vannes de spin et capteurs magnétiques.....	114

2	Une première application : le capteur angulaire	115
3	Une application essentielle pour l'automobile	116
4	Détecter des champs magnétiques très faibles	117
5	Mesurer des courants	118
6	Biomagnétisme et IRM à très bas champ	118
7	Perspectives	120
DEUXIÈME PARTIE NANOMATÉRIAUX ET NANOCHEMIE		121
Chapitre 3 PANORAMA DU DOMAINE		122
<i>Christine Vautrin-UI</i>		
1	Introduction : la nanochimie	122
2	Le carbone dans tous ses états nano	124
2.1	Nanomatériaux carbonés : les structures OD ou état nanoparticulaire	125
2.2	Les nanomatériaux carbonés : les structures 1D – Nanotubes de carbone	132
2.3	Les nanomatériaux carbonés : les structures 2D – Le graphène	135
2.4	Les nanomatériaux carbonés : les structures 3D	140
3	La nanochimie au service des nanomatériaux : de la chimie moléculaire à la chimie supramoléculaire	145
3.1	La chimie « click » : exemple de la voie moléculaire	146
3.2	Auto-assemblage et chimie supramoléculaire	149
4	Fonctionnalisation des matériaux	156
4.1	De multiples approches de la fonctionnalisation par voies chimiques gazeuse ou en solution	157
4.2	Un exemple de fonctionnalisation par voie chimique : les couches auto-assemblées	158
4.3	Fonctionnalisation par voie électrochimique : électrogreffage par réduction de sels de diazonium	159
5	Différentes voies de synthèse chimique des nanomatériaux	162
5.1	Synthèse de nanoparticules métalliques : solutions colloïdales de métaux de transition	162
5.2	Les matériaux nanostructurés à empreinte moléculaire	170
5.3	Les nanomatériaux hybrides multifonctionnels élaborés par « chimie douce »	171
6	Conclusion	179
Bibliographie		180
Chapitre 4 EXEMPLES D'APPLICATION		184
A. LES NANOLUBRIFIANTS		184
<i>Fabrice Dassenoy</i>		
1	Pourquoi les nanos ?	185
2	Propriétés tribologiques des nanoparticules	186

3 Mécanisme de lubrification des nanoparticules d'IF-MeS ₂	187
4 Conclusion	189
Bibliographie	190
B. LE NANOCRISTALLITE CIMENTAIRE	191
<i>Abdi Feylessoufi</i>	
1 Un matériau étonnant	191
2 Déjà les Romains	192
3 Un réveil tardif suivi d'une évolution rapide	192
4 Les bétons à ultra-haute performance	194
5 Vers une taille nanométrique	194
6 Des nanocristallites plus rigides	195
7 Des progrès en thermodynamique des nanocristallites	195
8 Une meilleure résistance aux agressions	196
9 Le début du XXI ^e siècle : un avenir tracé	196
10 Les défis scientifiques	200
11 Les défis industriels	201
12 Encore beaucoup de freins	202
Bibliographie	204
C. APPLICATIONS DU NANOTiO₂	206
<i>François Tardif</i>	
1 Applications des particules de TiO ₂ de taille comprise entre 250 et 350 nm : des peintures à l'alimentation	206
2 Les nanoparticules de TiO ₂ (< 100 nm) : des couches anti-UV à l'élimination de polluants	207
2.1 Couches anti-UV	208
2.2 Application à la photocatalyse	209
2.3 Application au photovoltaïque	209
3 Toxicité du nanoTiO ₂	210
TROISIÈME PARTIE NANOBIOSCIENCES, NANOMÉDECINE ET NANOTOXICOLOGIE	213
Chapitre 5 NANOBIOSCIENCES : DES OUTILS ET DES CONCEPTS NOUVEAUX POUR EXPLORER ET MANIPULER LE VIVANT	214
<i>Maxime Dahan</i>	
1 Nano-objets : des sondes fonctionnelles pour explorer le vivant à l'échelle nanométrique	215
2 Suivre le mouvement de biomolécules individuelles au sein de la cellule	216
3 Manipuler le vivant à l'échelle moléculaire et cellulaire	219
4 Des nano-objets pour le diagnostic et la thérapie : vers la nanomédecine	221

5	Conclusion et perspectives	222
	Bibliographie	223
Chapitre 6	NANOMÉDECINE ET NANOTECHNOLOGIES POUR LA MÉDECINE	224
	<i>Patrick Boisseau</i>	
1	Nanomédecine ou nanotechnologies pour la médecine ?	226
2	L'échelle de taille idéale en médecine	227
3	L'échelle nano : le nouvel eldorado en médecine ?	228
4	Le diagnostic médical	230
4.1	Les laboratoires d'analyse	231
4.2	L'imagerie médicale revisitée	232
4.3	Des implants et des capteurs de plus en plus petits	235
4.4	La médecine personnalisée	237
5	La thérapie	237
5.1	Nanovecteurs ou nanogouttes de médicaments	238
5.2	Pompes à médicaments	240
5.3	Destruction physique des tumeurs	241
6	La combinaison du diagnostic et de la thérapie : la théranostique ...	242
7	La médecine régénérative	243
7.1	Les cellules souches en thérapie cellulaire	245
7.2	Les biomatériaux	246
8	Les nanotechnologies sont-elles indispensables à la médecine ?	247
9	Nanomédecine et questionnement éthique	248
10	Quelle réglementation pour les nanomédicaments ?	249
11	Une industrie en pleine émergence	249
12	Où en est la France ?	251
13	La nanomédecine : évolution ou révolution ?	252
	Bibliographie	253

Chapitre 7	NANOMÉDICAMENTS : LA SQUALÉNISATION,	
	UNE VOIE POUR DE NOUVEAUX MÉDICAMENTS À ACTIVITÉ ANTICANCÉREUSE	
	OU ANTI-INFECTIEUSE ACCRUE	254

Patrick Couvreur

1	Origine du concept de squalénisation	256
2	Couplage du squalène à des molécules médicamenteuses	257
3	Caractéristiques et morphologies des principaux dérivés squalénés ..	257
4	Applications au traitement du cancer	259
4.1	Nanoparticules de gemcitabine couplées au squalène	259
4.2	Nanoparticules de siRNA couplées au squalène (SQsiRNA)	262
5	Application au traitement des maladies infectieuses	264
5.1	Analogues nucléosidiques à activité anti(rétro)virale	264
5.2	Antibiothérapie intracellulaire	265
6	Guidage magnétique, imagerie et « théranostique »	266
7	De la « squalénisation » à la « terpénisation »	267

8 Conclusion.....	269
Bibliographie	269
Chapitre 8 QUE SAIT-ON DES IMPACTS DES NANOMATÉRIAUX SUR LA SANTÉ ?	272

Francelyne Marano et Rina Guadagnini

1 Peut-on comparer les particules ultrafines atmosphériques et leur risque pour la santé avec les nanoparticules ?	274
2 Voies d'exposition aux nanoparticules et effets sanitaires potentiels	276
2.1 Exposition par la voie respiratoire	277
2.2 Exposition par la voie cutanée	280
2.3 Exposition par la voie orale	281
3 Effets des nanoparticules sur le système cardiovasculaire	283
4 Effets sur le système nerveux	283
5 Conclusion	283
Bibliographie	284

Chapitre 9 LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ASSOCIÉS AUX NANOTECHNOLOGIES : CONCEPT NOUVEAU OU ANCIEN ?	286
--	------------

Jean-Yves Bottero

1 Des nanoparticules naturelles aux nanoparticules manufacturées....	287
2 Importance du contact avec l'eau	290
2.1 La solubilisation des nanoparticules suit-elle les mêmes lois que celles des particules micrométriques ?	290
2.2 Le passage d'une propriété hydrophobe à une propriété hydrophile	291
2.3 Un possible effet « cheval de Troie »	292
2.4 Propriétés d'agrégation associées à une réactivité à l'interface avec l'eau ou avec des solvants	293
3 Transport des nanoparticules dans les milieux poreux	296
4 Principaux mécanismes de toxicité des nanoparticules : expériences sur des organismes vivants	299
5 Évaluation des risques des nanomatériaux : vers des modèles prédictifs ?	302
5.1 Difficultés inhérentes à l'évaluation des risques	302
5.2 Une approche expérimentale des risques intégrant les dommages « collatéraux »	304
5.3 Vers des modèles prédictifs des risques appropriés aux nanomatériaux	305
6 Remarques conclusives	307
Bibliographie	308

Chapitre 10 RECHERCHE, FORMATION ET DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL EN NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES	312
A. LA RECHERCHE EN NANO	312
<i>Patrice Hesto et Jean-Michel Lourtioz</i>	
1 La recherche amont en France	313
2 La R&D en France	315
2.1 L'animation de la communauté	315
2.2 Programmes français et abondements	316
3 Programmes sur le plan international	317
4 Conclusion	320
B. LES FORMATIONS EN NANO	322
<i>Sylvie Retailleau, Claire Dupas-Haeberlin, Jean-Michel Lourtioz et Arnaud Bournel</i>	
1 L'opportunité d'une formation interdisciplinaire	322
2 Le LMD et la place de l'enseignement des nanos en France et à l'international	324
3 Les débouchés des formations en nano	330
4 Les nanosciences à l'école	330
5 Des élèves au grand public	332
6 Perspectives	333
Bibliographie	333
C. ASPECTS INDUSTRIELS DES NANOTECHNOLOGIES	334
<i>Patrice Hesto, Jean-Michel Lourtioz, Claire Dupas-Haeberlin, Marcel Lahmani et Thomas Dubouchet</i>	
1 Le paysage industriel des nanotechnologies en France	335
1.1 Des applications multisectorielles	335
1.2 Quelques secteurs industriels clés	337
1.3 Les acteurs industriels en France	340
1.4 Un point particulier sur les start-up	341
1.5 Les risques possibles liés aux nanomatériaux ne peuvent être négligés	342
2 Situation industrielle des nanotechnologies dans le monde	343
2.1 Un marché en forte croissance	343
2.2 Des États fortement impliqués	344
2.3 Les dispositifs et actions en France pour le développement des nanotechnologies	346
3 En guise de conclusion	349
Chapitre 11 UNE APPROCHE SOCIÉTALE EN NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES	351
<i>Françoise Roure</i>	

1	Démocratiser l'accès au nanomonde, informer, réglementer : un impératif éthique, légal et sociétal.....	353
1.1	Informer.....	353
1.2	Réglementer.....	358
2	La portée des ruptures sociétales induites par les nanotechnologies	361
2.1	La manipulation du génome.....	361
2.2	Vers le « new green deal » ?.....	364
2.3	Penser l'innovation responsable en amont de l'offre.....	366
2.4	Gains potentiels et risques induits des nanotechnologies via la biogénétique.....	366
3	La nature systémique des risques induits par les nanotechnologies..	370
3.1	Les effets.....	371
3.2	Les conséquences de la nature systémique des risques sur l'évaluation des changements induits par les nanotechnologies.....	373
4	Les problèmes juridiques soulevés par les applications des nanotechnologies.....	375
5	La question éthique.....	377
5.1	Nécessité d'un cadre normatif international applicable aux nanotechnologies.....	378
5.2	La question du label, ou comment aider le consommateur à choisir en situation d'incertitude et de complexité.....	378
6	Le rôle essentiel d'une meilleure connaissance des technologies et des bases de données.....	380
7	Le fait religieux, le transhumanisme à la française et la question des finalités.....	384
7.1	Les systèmes hybrides immersifs, le facteur C de la convergence NBIC et la question de la liberté de penser.....	386
7.2	Les questions de société issues des usages potentiels des technologies à l'échelle nanométrique.....	388
8	Les prémices fragiles d'une gouvernance mondiale dans le domaine des nanotechnologies.....	389
8.1	Un chemin long et encore improbable vers l'action diplomatique	389
8.2	Des intérêts différents qui peuvent se retrouver sur des prérequis harmonisés.....	390
8.3	Qu'ont apporté les relations intergouvernementales à ce stade ?	390
8.4	Une impulsion européenne en voie de s'affiner et de s'affirmer	392

Glossaire.....	396
----------------	-----

Index.....	408
------------	-----