

Table des matières

Avant-propos	3
1 Surfaces et nanostructuration	13
1.1 Rappels de cours	13
1.1.1 Description générale des surfaces	13
1.1.2 Notion d'énergie de surface	15
1.1.3 Nanostructuration de surface	16
1.2 Exercices sur les surfaces	17
1.2.1 Ordre de grandeur d'une énergie de surface	19
1.2.2 Angle de coupe d'une surface vicinale et densité d'atomes en surface	19
1.2.3 Surfaces atomiquement planes, surfaces vicinales d'un cristal cfc	20
1.2.4 Energie de surface et liaisons coupées *	21
1.2.5 Energie de surface d'une surface vicinale : modèle terrasse, marche	28
1.2.6 Sites de surface	30
1.2.7 Fluctuations thermiques d'une marche **	32
1.2.8 Energie de surface versus contraintes de surface : relation de Shuttleworth *	35
1.2.9 Gamma-plot versus s-plot	38
1.2.10 Energie de cohésion, énergie de surface et grandeur d'excès	40
1.2.11 Energie de surface et contraintes de surface vues comme des grandeurs d'excès *	40
1.2.12 Notion de tension de surface	44
1.3 Exercices concernant la nanostructuration	45
1.3.1 Introduction à la nanostructuration par facettage : modèle unidimensionnel	47

1.3.2	Auto-organisation de surface : modèle de Marchenko unidimensionnel	48
1.3.3	Structuration de surface d'un cristal contraint : ondulations ATG modèle 1D *	50
1.3.4	Introduction aux mécanismes de croissance d'une surface vicinale : modèle BCF à 1D **	51
1.3.5	Lissage thermique d'une surface nanostructurée*	55
1.3.6	Introduction à la nanostructuration par mise en paquet de marches : modèle 1D	58
1.3.7	Introduction à la nanostructuration par méandrage **	60
1.3.8	Structuration de surface par mise en paquet de marches : analyse de stabilité linéaire ***	63
1.3.9	Structuration de surface par méandrage : analyse de stabilité linéaire ***	66
1.3.10	Structuration de surface par électromigration *	71
2	Nano-objets : morphologie, stabilité	75
2.1	Rappels de cours :	75
2.2	Exercices sur la morphologie	77
2.2.1	Introduction à la forme d'équilibre d'un cristallite et au théorème de Wulff	79
2.2.2	Approche atomistique de la forme d'équilibre d'un petit cristal	80
2.2.3	Théorème de Wulff et théorème de Wulff-Kaishew pour des polyèdres *	83
2.2.4	Forme d'équilibre 2D : approche continue **	88
2.2.5	Au delà du théorème de Wulff : icosaèdre versus octaèdre tronqué	92
2.2.6	Au delà du théorème de Wulff : prise en compte des arêtes	96
2.2.7	Equation de Young pour une goutte liquide **	98
2.2.8	Formes de croissance et théorème de Frank	103
2.2.9	Structure cristallographique d'un nanotube de carbone *	105
2.3	Exercices sur la stabilité des nano-objets	109
2.3.1	Stabilité d'un nucleus et équation de Gibbs-Thomson	111
2.3.2	Ordre de grandeur de la taille d'un germe critique	112
2.3.3	Coalescence	113
2.3.4	Mûrissement d'Ostwald et équation de Gibbs-Thomson	114

2.3.5	Théorème de Herring et potentiel chimique d'un cristallite ***	115
2.3.6	Contraction du paramètre de maille due à la surpression de Laplace *	117
2.3.7	Stabilité en température d'une particule solide **	120
2.3.8	Stabilité d'une particule solide en équilibre avec un liquide **	122
2.3.9	Fluctuations de température d'un petit système et transitions du premier ordre	125
2.3.10	Instabilités de composition dans les nanoalliages ***	127
2.3.11	Particules coeur/coquille et particules Janus **	132
3	Propriétés des nano-objets	137
3.1	Propriétés et longueurs caractéristiques	137
3.2	Propriétés optiques	142
3.2.1	Rappels de cours	142
3.2.1.1	Effets de taille et irradiation	142
3.2.1.2	Polarisabilité et fonction diélectrique d'une nanoparticule	143
3.2.1.3	Ondes de surface	144
3.2.2	Exercices	145
3.2.2.1	Effet de peau	146
3.2.2.2	Diffraction par un nano-trou. Introduction à la microscopie SNOM :	146
3.2.2.3	Propriétés optiques d'une nanoparticule métallique : modèle de Drude phénoménologique	150
3.2.2.4	Polarisabilité d'une nanoparticule : résonance plasmon et application médicale **	153
3.2.2.5	Plasmons de surface *	156
3.2.2.6	Réflexion totale et conditions d'excitation d'une onde de surface	157
3.2.2.7	Extraction d'une onde de surface par un réseau périodique *	159
3.3	Propriétés électroniques et de transport	161
3.3.1	Rappels de cours	161
3.3.2	Exercices	165
3.3.2.1	Puits infiniment profond, confinement dans une direction	166

3.3.2.2	La structure électronique du graphène par la méthode des liaisons fortes **	168
3.3.2.3	Structure électronique de nanorubans de graphène par la méthode des liaisons fortes **	173
3.3.2.4	Propriétés électroniques des nanotubes de carbone : du semi-conducteur au métal *	176
3.3.2.5	Blocage de Coulomb **	179
3.3.2.6	Microscopie à effet tunnel *	182
3.3.2.7	Transfert de phonons le long d'un nanofil.	188
3.3.2.8	Transport électronique dans un conducteur unidimensionnel **	191
3.3.2.9	Effets de la température et de la tension sur les paliers de conductance d'un conducteur quantique 1D *	196
3.3.2.10	Cohérence quantique et conductance : L'effet Fabry-Perot électronique *	198
3.3.2.11	Injection d'électrons d'un métal vers une couche moléculaire	201
3.4	Propriétés magnétiques	204
3.4.1	Rappels de cours	204
3.4.1.1	Atome libre	204
3.4.1.2	Atome non isolé	204
3.4.1.3	Ensemble d'atomes	204
3.4.1.4	Effet des surfaces et interfaces et cas des films minces	207
3.4.2	Exercices	208
3.4.2.1	Changement d'orientation des spins avec l'épaisseur dans un film mince	209
3.4.2.2	Renversement du champ dans un film mince	210
3.4.2.3	Nanoparticule magnétique	212
3.4.2.4	Superparamagnétisme	214
3.4.2.5	Température de Curie d'une petite particule*	216
3.4.2.6	Magnétisme itinérant et coordination	218
3.4.2.7	Ferromagnétisme d'une chaîne 1D	219
3.5	Propriétés chimiques et thermodynamiques	221
3.5.1	Rappels de cours	221
3.5.1.1	Chimie et nanomatériaux	221
3.5.1.2	Propriétés chimiques et effet de taille	221

3.5.1.3	Propriétés thermodynamiques	222
3.5.2	Exercices	224
3.5.2.1	Réaction chimique dans une nano-goutte *	224
3.5.2.2	Notion de suspension colloïdale	227
3.5.2.3	Effet de taille et température d'équilibre d'une goutte liquide	229
3.6	Propriétés mécaniques	230
3.6.1	Rappels de cours	230
3.6.1.1	Effets de taille et élasticité	230
3.6.1.2	Effets de taille et plasticité	231
3.6.2	Exercices	233
3.6.2.1	Propriétés élastiques : module effectif d'un film mince	233
3.6.2.2	Durcissement et loi de Hall-Petch :	236
3.6.2.3	Adoucissement et taille de grains : effet Hall-Petch inverse	238
3.6.2.4	Modes de vibration d'une poutre encastree et microscopie à force atomique (AFM non contact) :	240
3.7	Autres exemples de propriétés	242
3.7.1	Nanoscience et biologie	242
3.7.2	Exercices	244
3.7.2.1	Nage en eau visqueuse et nano nageur *	244
3.7.2.2	Mouillage liquide sur substrat nano-structuré : effet LOTUS *	246
3.7.2.3	Introduction aux moteurs moléculaires : translocation d'une protéine ***	251
4	Questionnaire d'entraînement	259
4.1	Questions brèves	259
4.2	Réponses brèves	261
5	Appendices	269
5.1	Structures cubiques	269
5.2	Description analytique d'une courbe	270
5.3	Recherche de l'équilibre	270
5.3.1	Potentiels thermodynamiques	270
5.3.2	Multiplicateurs de Lagrange	271
5.4	Introduction au calcul variationnel	272
5.4.1	Définitions :	272

5.4.2	Recherche des extrema des fonctionnelles de type $F(y) = \int_a^b f(x, y, y')dx$	272
5.4.2.1	Calcul de la première variation	273
5.4.2.2	Caractérisation des extrema	275
5.4.2.3	Cas des fonctionnelles à plusieurs fonctions	275
5.5	Introduction à l'analyse de stabilité linéaire	275
5.6	Polyèdres de Platon	276
5.7	Interaction d'échange : approximation classique continue . .	276
5.8	Propriétés mécaniques	277
5.8.1	Elasticité linéaire	277
5.8.2	Plasticité	280
5.9	Lithographie	281
	Bibliographie	283
	Index	287