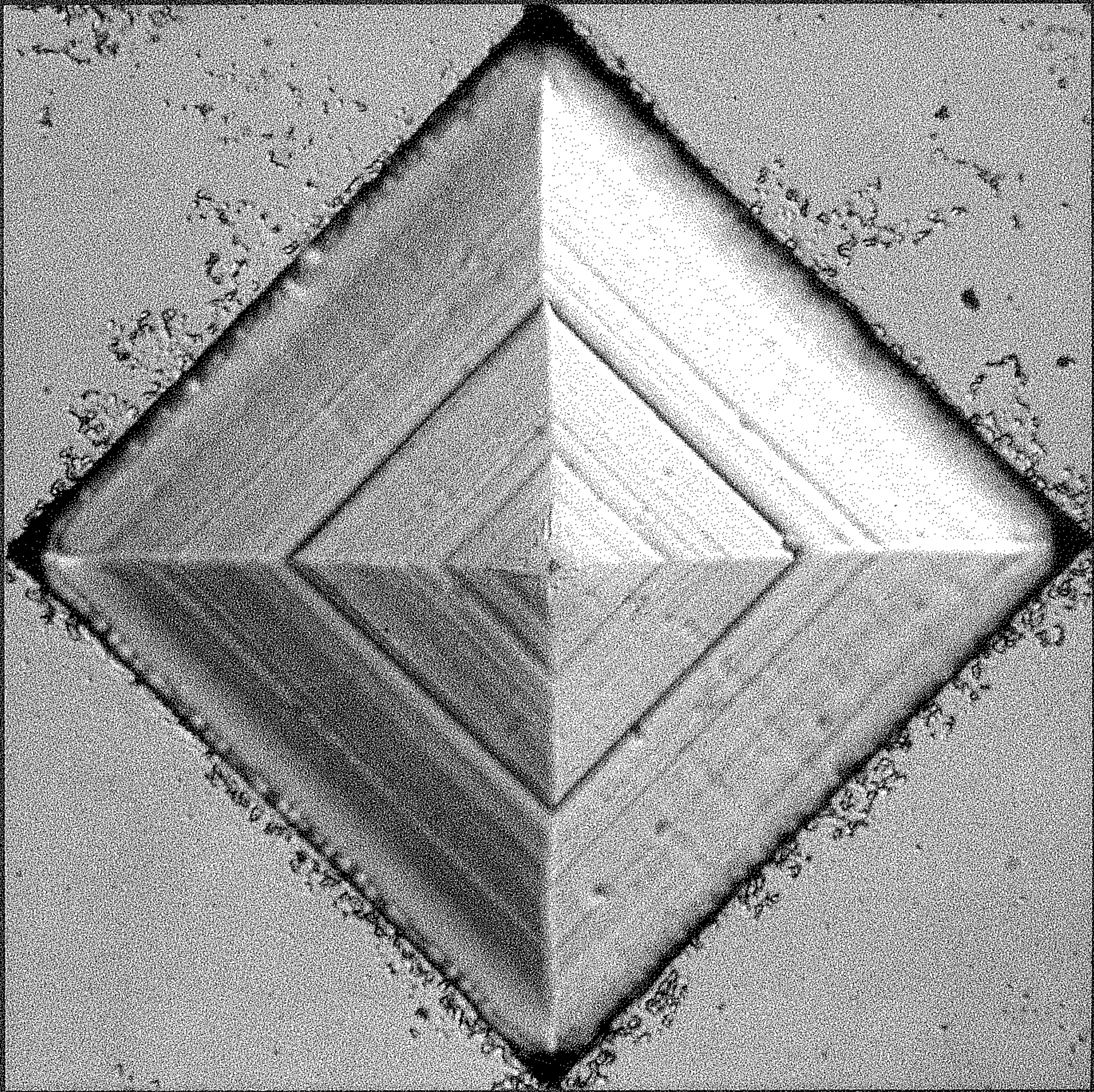


Jacques Villain
Alberto Pimpinelli

PHYSIQUE DE LA
CROISSANCE CRISTALLINE



Collection
Aléa
Saclay

Eyrolles

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	xiii
Liste des symboles et abréviations	xvii
Lexique français-anglais	xxi
1 Morphologie de la croissance d'un cristal	1
1.1 Une surface de haute symétrie vue au microscope	3
1.2 Énergie libre de marche et rugosité thermique d'une surface	4
1.3 La transition rugueuse	8
1.4 Autre définition de la transition rugueuse	9
1.5 Transition rugueuse d'une surface vicinale d'un cristal	11
1.6 Aspect local d'une surface et transition rugueuse	12
1.7 Conclusion	13
2 Énergie libre de surface, énergie libre de marche, potentiel chimique	17
2.1 Tension de surface	19
2.2 Singularités de la tension superficielle	22
2.3 Potentiel chimique	23
2.4 Tension de ligne d'une marche et potentiel chimique sur une marche	25
2.5 Expression de la tension de ligne près d'une direction de haute symétrie à basse température	26

2.6	Énergie libre d'un élément de marche	29
2.7	Fluctuations thermiques au milieu d'une ligne de tension de ligne γ	30
2.8	Cas d'un solide compressible	31
2.9	Interactions entre marches	31
3	Forme d'équilibre des cristaux	33
3.1	Forme d'équilibre : principes généraux	34
3.2	La construction de Wulff	34
3.3	Facettes	36
3.4	Forme d'une surface au voisinage d'une facette	39
3.5	La forme d'un cristal bidimensionnel	40
3.6	La construction de la double tangente	41
3.7	Podaires, taupins, calcul des variations, transformation de Legendre	42
3.8	Conclusion	43
4	Formes de croissance et de décroissance des cristaux : le modèle de Frank	45
4.1	Le modèle de Frank	47
4.2	Construction de Wulff dynamique	48
4.3	Stabilité de la forme self-similaire	50
4.4	Le théorème de Frank	50
4.5	Exemples	51
4.6	Expérience	53
4.7	Rugosité et facettes	53
4.8	Conclusion	53
5	Croissance des cristaux : le b-a-ba	55
5.1	Les divers types de croissance en hétéroépitaxie	56
5.2	Mouillage	56
5.3	Croissance commensurable ou incommensurable	58
5.4	Effet de l'élasticité du solide	59
5.5	Nucléation, marches, dislocations, sources de Frank et Read	60
5.6	Sursaturation	61
5.7	Rugosité cinétique en croissance à sursaturation faible	61
5.8	Taux d'évaporation, pression de vapeur saturante, énergie de cohésion et coefficient de collage	64
5.9	Ségrégation, interdiffusion, couches tampons	68

6 Croissance et évaporation d'une surface à marches	69
6.1 Équations générales	70
6.2 L'approximation quasi-statique	71
6.3 Le cas sans évaporation : conditions de validité du modèle BCF	73
6.4 L'effet Schwoebel	74
6.5 Le rôle des adlacunes	78
6.6 Conditions de validité du modèle BCF dans le cas de l'évaporation	79
6.7 Macromarches et mise en paquet des marches (step bunching)	81
7 Diffusion en surface	85
7.1 Diffusion de Fick et diffusion de traceur	86
7.2 Diffusion de surface	88
7.3 Diffusion macroscopique et coefficient de diffusion des adatoms	90
7.4 Énergie d'activation	90
7.5 Diffusion et potentiel chimique	93
7.6 Comment les adatoms passent les marches	94
7.7 Exercices	94
8 Lissage thermique d'une surface	97
8.1 Généralités	99
8.2 Les trois voies de transport de la matière	101
8.3 Lissage d'une surface au-dessus de sa température de transition rugueuse	101
8.4 Lissage au-dessous de la transition rugueuse	104
8.5 Lissage d'un profil macroscopique en dessous de la transition rugueuse	107
8.6 Sillons parallèles à un plan de haute symétrie	109
9 Le silicium et les semi-conducteurs	111
9.1 Le système cristallin	113
9.2 Reconstruction	114
9.3 Anisotropie de la diffusion et du collage	115
9.4 Croissance cristalline et croissance amorphe	115
9.5 Les composés binaires AB	115
9.6 Structure des marches et des crans	116
9.7 La face (111) des semi-conducteurs	117

10	Instabilités de croissance	119
10.1	L'instabilité de Mullins-Sekerka	120
10.2	Avance d'une marche monoatomique en MBE	122
10.3	Analyse de stabilité linéaire	124
10.4	Effets stabilisants	125
10.5	Variantes	126
10.6	L'agrégation limitée par la diffusion (DLA)	128
10.7	Au delà de l'analyse de stabilité linéaire	129
10.8	Calcul du coefficient K de (10.10)	130
10.9	Exercices	132
11	Longueur de diffusion	133
11.1	Définition de la longueur de diffusion	134
11.2	Le processus de nucléation	134
11.3	Temps de vie et densité des adatoms	136
11.4	Collisions des adatoms avec d'autres adatoms ou avec de petits îlots mobiles	137
11.5	Le cas $i^* = 1$	137
11.6	Simulations numériques et controverses	138
11.7	Expériences	139
11.8	Le cas $i^* = 2$	141
11.9	Généralisation	145
11.10	Oscillations de diffraction dans la croissance par jets atomiques	145
11.11	Surfactants, morphactants et surlissants	148
12	Rugosité de croissance aux grandes échelles de longueur dans l'approximation linéaire	151
12.1	Qu'est-ce qu'une surface rugueuse ?	152
12.2	Divers modes de croissance par jets atomiques	153
12.3	Effets aléatoires, inhomogénéités et mécanismes de guérissage	153
12.4	L'approximation linéaire (Edwards et Wilkinson 1982)	155
12.5	Dimensions critiques supérieure et inférieure	156
12.6	Le cas $K = 0$ en $2 + 1$ dimensions	158
12.7	Lois d'échelle	158

13	L'équation de Kardar-Parisi-Zhang	161
13.1	La croissance : un phénomène critique auto-organisé	162
13.2	Termes pertinents et irrélevants	163
13.3	Dimension critique supérieure, simulations et expériences	165
13.4	Une relation entre les exposants	167
13.5	Valeurs numériques des coefficients λ, μ	167
13.6	Comportement du modèle KPZ en l'absence de fluctuations ($\delta f = 0$) quand $\nu = 0$	168
14	Croissance en l'absence d'évaporation	169
14.1	Annulation de λ dans l'équation KPZ	170
14.2	Anisotropie de diffusion	170
14.3	Le cas $\alpha = 0$	171
14.4	Calcul des exposants	172
14.5	Les exposants du modèle de Montréal	173
14.6	Conclusion	175
15	Interaction élastique entre défauts à la surface des cristaux	177
15.1	Introduction	178
15.2	Interaction élastique entre deux adatoms à distance r	179
15.3	Interaction entre deux rangées d'adatoms	180
15.4	Interaction entre deux monocouches adsorbées semi-infinies	180
15.5	Marches sur un matériau homogène	181
15.6	Formule de Stewart et Goldenfeld	183
16	Équations générales d'un solide élastique	185
16.1	Aide-mémoire d'élasticité du solide massif	186
16.2	L'élasticité en présence d'une interface plane	188
16.3	Applications	189
16.4	Potentiel thermodynamique	190
16.5	Effort de surface	193
16.6	Le solide isotrope	194
16.7	Application : l'instabilité de Grinfeld	195
16.8	Marches sur une surface	197

APPENDICES	199
A Du modèle gaussien discret à l'électrolyte bidimensionnel	199
B Le groupe de renormalisation appliqué à l'électrolyte bidimensionnel	203
C Preuve du théorème de Frank	207
D Le modèle d'Edwards et de Wilkinson	211
E Calcul des coefficients de (13.1) pour une surface à marches	215
F Renormalisation du modèle KPZ	219
G Calcul de la longueur de diffusion ℓ pour $i^* > 2$	227
H L'élasticité dans un réseau discret	231
I Réponse linéaire d'un milieu élastique semi-infini	237
Bibliographie	241
Index	263