

Table des matières

Introduction – M. REPOUX, L. MANIGUET, F. ROUSSEL-DHERBEY, J. RUSTE	1
I - Les interactions électron-matière – F. CHARLOT, P. JONNARD	13
1. Introduction	13
2. Les interactions	13
2.1. La diffusion	13
2.2. La section efficace d'interaction	15
2.3. Les interactions élastiques	16
2.4. Les interactions inélastiques	28
2.5. Conclusion sur les interactions	35
3. Le volume d'interaction	35
3.1. Trajectoire des électrons	35
3.2. Caractéristique du volume d'interaction	39
4. L'émission électronique	42
4.1. L'émission des électrons rétrodiffusés	42
4.2. L'émission des électrons secondaires	50
4.3. Bilan de l'émission en électrons secondaires et rétrodiffusés	58
Références	60
II - Le rayonnement X caractéristique, le rayonnement de freinage – P. JONNARD	63
1. Introduction	63
2. L'émission X caractéristique	63
2.1. Introduction	63
2.2. Niveaux électroniques de l'atome et nomenclature	64
2.3. Mécanisme d'émission X caractéristique	66
2.4. Paramètres décrivant les émissions X	69
2.5. Les émissions satellites	75
3. Le rayonnement de freinage	76
4. Conclusion	78
Références	78
III - Les canons à électrons en MEB – F. ROUSSEL	81
1. Les canons conventionnels	81
1.1. Rappel sur l'émission thermoélectronique	81
1.2. Grandeurs caractéristiques de l'émission thermoélectronique	83
1.3. Les canons à émission thermoélectronique	86
2. Les canons à émission de champ à cathode chaude ou "Schottky"	95
2.1. Rappel sur l'émission électronique par effet Schottky	95
2.2. Grandeurs caractéristiques de l'émission électronique par effet Schottky	96
2.3. Les canons à cathodes chaudes ou Schottky	98
3. Les canons à émission de champ par effet tunnel ou à cathode froide	100
3.1. Rappel sur l'émission de champ par effet tunnel	100
3.2. Grandeurs caractéristiques de l'émission de champ par effet tunnel	101
3.3. Les canons à cathodes froides	103
4. Comparaison des canons	106
4.1. Mécanismes d'émission électronique	106
4.2. Caractéristiques des canons	107
Références	109

IV - Les éléments de l'optique électronique – J. RUSTE	111
1. Introduction	111
2. Champ électrique et champ magnétique	112
2.1 Le champ électrique	112
2.2 Le champ magnétique	113
2.3. Effets sur une particule chargée	114
2.4. Champ magnétique dans un milieu quelconque	117
3. La lentille électronique	119
3.1. Rappels des lois de l'optique géométrique classique	119
3.2. La lentille électrostatique	121
3.3 La lentille électromagnétique	122
4. Les aberrations des lentilles	125
4.1. L'aberration sphérique (ou de sphéricité)	125
4.2. L'aberration chromatique	125
4.3. L'aberration de diffraction	127
4.4. L'aberration d'astigmatisme	127
4.5. Effet répulsif et aberration de charge d'espace	129
4.6. Variation des « constantes » d'aberration avec l'excitation de la lentille	129
4.7. Comparaison optique électronique – optique classique	130
5. La colonne électronique conventionnelle	131
5.1. Facteur de grandissement de la colonne	131
5.2. Influence des aberrations du canon thermoélectronique	133
5.3. Rôles des différents types de lentilles de la colonne électronique	133
5.4. Détermination du diamètre réel de la sonde électronique	136
5.5. Correction des aberrations sphérique et chromatique	138
6. Les nouvelles colonnes de microscopes à haute résolution (SEM-FEG)	140
6.1. La colonne électronique.	140
6.2. La lentille à immersion et détection « in-lens »	143
6.3. Adaptation aux basses tensions	150
7. Conclusion	152
Annexe	153
Références	156
V - Les techniques du vide – J. RUSTE	159
1. Introduction	159
2. Quelques rappels théoriques utiles	159
2.1. Les unités utilisées	159
2.2. Lois des gaz parfaits	160
2.3. Libre parcours moyen	163
2.4. Régimes d'écoulement	164
2.5. Notions de conductance	165
3. Les phénomènes de surface	167
3.1. La pression de vapeur saturante	167
3.2. Interactions avec la surface	168
3.3. En résumé	170
4. Les différents types de pompes	171
4.1. Généralités	171
4.2. Les pompes volumétriques	172
4.3. Les pompes à entraînement	173
4.4. Les pompes à fixation	176
5. Mesure du vide	179
5.1. Les manomètres mécaniques	179
5.2. Les jauges électriques	180
6. Conclusion	181
Références	181

VI - Les détecteurs utilisés dans le MEB – F. GRILLON	183
1. Introduction	183
2. Les détecteurs d'électrons secondaires	183
2.1. Le détecteur d'Everhart et Thornley	183
2.2. Les détecteurs genre Everhart et Thornley situés au travers ou au dessus de la lentille objectif	190
2.3. Le détecteur à microcanaux	191
2.4. Les détecteurs pour microscopes à pression contrôlée	192
3. Les détecteurs d'électrons rétrodiffusés	195
3.1. Les détecteurs mixtes	195
3.2. Les détecteurs Austrata, Centaurus, Robinson et dérivés	196
3.3. Les détecteurs à semi-conducteur	198
3.4. Détecteurs permettant l'exploitation des diagrammes de Kikuchi	201
4. Les détecteurs de courant d'échantillon	201
5. Les détecteurs d'électrons transmis	202
6. Les détecteurs de cathodoluminescence	202
7. Les détecteurs pour microscopes à faisceaux d'ions focalisés ou à double faisceau ionique et électronique	203
8. Conclusion	204
Références	204
VII - La formation et l'optimisation de l'image en MEB – A. JADIN	207
1. Introduction	207
2. La formation de l'image	207
2.1. Principe de l'imagerie électronique	207
2.2. Paramètres de l'image	210
2.3. Perturbations de l'image	212
2.4. Collecte du signal et enregistrement de l'image	212
3. L'optimisation de l'image	218
3.1. Choix des principaux paramètres	218
3.2. Amélioration du rapport signal/bruit	223
3.3. Amélioration de la résolution	226
3.4. Profondeur de champ	228
3.5. Distorsions de l'image	230
Références	231
VIIa - Guide d'utilisation pratique du MEB – F. GRILLON, F. ROUSSEL, F. CHARLOT	233
1. Introduction	233
2. Le microscope électronique à balayage – découverte de l'instrument	233
2.1. Présentation générale de l'appareil	233
2.2. Préparation à l'observation	233
2.3. Mise en place de l'échantillon	235
2.4. Paramètres à définir pour optimiser les observations	235
2.5. Obtention des images X	241
3. Conclusion	242
Références	242
VIII - La microscopie à pression contrôlée – C. MATHIEU, M. REPOUX	243
1. Introduction	243
2. Aspects fondamentaux	244
2.1. Diffusion élastique	244
2.2. Processus d'ionisation	245
3. Aspects techniques	246
3.1. Pompage différentiel	247
3.2. Détection	248
4. Imagerie en pression contrôlée	255
4.1. Conséquence de la pression sur la résolution obtenue	255
4.2. Cas des détecteurs d'électrons rétrodiffusés	256
4.3. Cas des détecteurs à amplification gazeuse	257

VIII - La microscopie à pression contrôlée – C. MATHIEU, M. REPOUX - Suite	
4.4. Application aux échantillons hydratés	259
5. Microanalyse	260
5.1. Contribution du gaz résiduel	261
5.2. Atténuation des photons X	261
5.3. Génération de rayons X dans la zone périphérique du faisceau	262
5.4. Angle solide du détecteur	262
5.5. Précautions - Méthodes de correction	262
6. Conclusion	265
Annexes : unités de pression	266
Références	266
VIIIa – La microscopie à pression contrôlée - applications – C. MATHIEU, M. REPOUX, R. PASSAS, G. THOLLET	
1. Introduction	269
2. Le rôle du gaz en imagerie	269
2.1. Réglage de la pression pour l'élimination des phénomènes de charges	269
2.2. Pression et rapport signal sur bruit	270
2.3. Influence de la nature du gaz	272
2.4. Influence de l'énergie du faisceau incident	272
2.5. Conclusion	273
3. Micro-injection	274
3.1. Appareillage	274
3.2. Conditions opératoires	275
3.3. Application : ajout d'acide sur une feuille de papier	276
4. Hydratation et déshydratation	277
5. Autres exemples d'application in situ	277
5.1. Expérience à haute température	278
5.2. Traction sur un objet non conducteur	279
6. La microanalyse sous pression contrôlée	280
6.1. Ligne de profil	281
6.2. Cartographies X	282
Annexes	284
Références	285
IX - Le spectromètre de rayons X à sélection d'énergie (EDS) – J. RUSTE, F. BRISSET, A. MALCHERE, L. MANIGUET	
1. Introduction	287
2. Le spectromètre à sélection d'énergie (EDS)	288
2.1. Le détecteur solide	289
2.2. Les détecteurs en germanium	304
2.3. Positionnement géométrique d'un spectromètre EDS	306
2.4. L'électronique associée : la chaîne de traitement analogique	308
2.5. La chaîne de traitement numérique	319
2.6. Performances comparées des chaînes numériques et analogiques	327
3. Nouveaux développements	330
3.1. Le détecteur de type SDD (silicon drift detector)	331
3.2. Le microcalorimètre (ou bolomètre)	340
4. Conclusion	345
Références	346
IXa - L'analyse EDS – F. BRISSET, D. BOIVIN	
1. Introduction	347
2. Choix des paramètres	347
2.1. Paramètres du spectromètre	348
2.2. Paramètres du MEB	349

IXa - L'analyse EDS – F. BRISSET, D. BOIVIN - Suite	
3. Acquisition du spectre	349
3.1. Préparation de l'échantillon et mise en place	349
3.2. Rappels sur le spectre	350
3.3. Acquisitions – Identification	351
4. Quantification	354
5. Conclusion	355
IXb - Les cartographies X EDS – A. MALCHERE, C. GENDARME	357
1. Introduction	357
1.1 Caractéristiques des cartographies X	357
1.2 Point important	357
1.3 Les échantillons	357
2. Principe général d'acquisition d'une cartographie classique d'intensités X, aussi appelée cartographie en régions d'intérêts	358
2.1 Description des étapes de l'acquisition d'une cartographie X en ROI	358
2.2 Résultats sur le clinker	359
3. Choix des paramètres d'acquisition	359
3.1 Géométrie de détection	359
3.2 Tension d'accélération	360
3.3 Constante de mise en forme (ou constante de temps)	361
3.4 Temps mort (DT%)	361
3.5 Résolution des cartographies X (choix du nombre de pixels)	362
4. Cartographies classiques en régions d'intérêts (ROI)	364
4.1 Avantages et inconvénients des cartographies ROI	364
4.2 Mise en évidence des limites des cartographies ROI	364
5. Cartographies X semi-quantitatives	366
5.1 Principe	366
5.2 Avantages	366
5.3 Illustration	366
5.4 Limitations	367
6. Imagerie spectrale	367
Références	368
X - Les aspects technologiques de la spectrométrie à dispersion de longueur d'onde (WDS) –	
A. CRISCI, J. RUSTE	369
1. Introduction	369
2. Le spectromètre à dispersion de longueur d'onde (WDS)	369
2.1. Le spectromètre à dispersion de longueur d'onde	370
2.2. Géométrie des spectromètres dispersifs	370
2.3. Le cristal monochromateur	373
2.4. Le compteur proportionnel à flux gazeux	373
2.5. Dispositions des spectromètres	389
2.6. Dispositifs particuliers liés aux WDS	391
3. L'électronique associée	392
3.1. Le préamplificateur	392
3.2. L'amplificateur de mise en forme	393
3.3. L'analyseur monocanal	394
3.4. Le générateur de temps mort	397
4. Développements récents	398
4.1. Cristal de grande dimension	398
4.2. Spectromètre à cercle de Rowland de faible dimension	399
4.3. Spectromètre à optique de collimation	400
4.4. Multicouches gravés	400
5. Conclusion	401
Références	402

XI - Les spectrométries EDS et WDS : traitement des spectres – J. RUSTE	403
1. Introduction	403
2. Choix des conditions opératoires	403
2.1. En spectrométrie EDS	403
2.2. En spectrométrie WDS	408
3. Traitement des spectres	411
3.1. En spectrométrie EDS	411
3.2. En spectrométrie WDS	424
4. Détermination des "k-ratios"	430
4.1. En spectrométrie EDS	431
4.2. En spectrométrie WDS	432
5. Conclusion	433
Références	434
XII - Les méthodes de quantification en microanalyse X – J.-L. POUCHOU	435
1. Introduction	435
2. Principes de la microanalyse X quantitative	437
2.1. Généralités	437
2.2. Expression générale de l'intensité X détectée	438
2.3. Analyse avec ou sans témoins	439
3. La procédure « ZAF »	441
3.1. Nombre d'ionisations engendrées au long du parcours	441
3.2. Pertes par rétrodiffusion	443
3.3. Absorption du rayonnement	444
3.4. Bilan partiel : corrections de nombre atomique et d'absorption	447
3.5. Effets de fluorescence	447
3.6. Expression complète de la correction « ZAF »	450
3.7. Exemples d'effets de matrice - Limites éventuelles de l'approche « ZAF »	450
4. La procédure « Phi(RhoZ) »	454
4.1. Conception générale des modèles de $\phi(\rho z)$	457
4.2. Expression générale des effets de matrice dans l'approche $\phi(\rho z)$	458
4.3. Calcul de l'aire de $\phi(\rho z)$	459
4.4. Coefficients d'absorption	460
5. Schéma itératif de quantification	463
6. Limites de la microanalyse quantitative	465
6.1. Présence d'une couche superficielle	465
6.2. Rugosité de surface	465
6.3. Homogénéité chimique de l'échantillon	466
6.4. Caractère isolant de l'échantillon	467
Références	470
XIIa - La microanalyse quantitative en WDS des éléments très légers – J. RUSTE	471
1. Problèmes spécifiques de l'analyse quantitative des éléments très légers	471
1.1. Faible émission X	471
1.2. Influence de la liaison chimique	471
1.3. Détection des rayonnements de faible énergie	472
1.4. Rayonnements d'ordre multiple	472
2. Préparation d'échantillons	473
3. Choix des paramètres opératoires	474
4. Anticontamination	474
5. Acquisition des données	476
5.1. Rayonnement caractéristique	476
5.2. Rayonnement de fond continu	476
6. Quantification	478
6.1. Quantification par droite d'étalonnage	478
6.2. Quantification par les calculs de correction	479
7. Applications	479
7.1. Aciers faiblement alliés	479

XIIa - La microanalyse quantitative en WDS des éléments très légers – J. RUSTE - Suite	
7.2. Acier inoxydable austénitique de type 316 (AFNOR Z6CND17-12)	480
8. Conclusion	482
Références	482
XIII - Les statistiques : précision et limites de détection en microanalyse – F. ROBAUT	483
1. Introduction	483
2. Statistique de comptage	483
3. Contrôle des comptages	484
4. Filtrage statistique des comptages	484
5. Estimation des paramètres de la distribution	486
6. Précision statistique	487
6.1. Comptage de N photons	487
6.2. Intensité d'une raie	487
6.3. Teneur massique	488
7. Intervalle de confiance de la concentration apparente	488
8. Optimisation des temps de comptage	489
9. Limite de détection et d'identification	491
9.1. Méthode dite des 3 sigmas	491
9.2. Notion de risque α et β	492
9.3. Calcul de la limite d'identification	494
10. Incertitudes et précision	495
11. Conclusion	496
Références	497
XIV - L'analyse d'échantillons stratifiés – J.-L. POUCHOU	497
1. Introduction	497
2. Sensibilité de la microanalyse X à la surface	498
3. Principe de la microanalyse X d'échantillons stratifiés à l'aide de modèles analytiques de $\phi(\rho z)$	501
3.1. Expression générale de l'intensité X émergente	501
3.2. Paramétrage de la distribution $\phi(\rho z)$	502
3.3. Limites de l'approximation utilisée pour $\phi(\rho z)$	503
4. Quelques exemples de variations de k-ratios avec la tension	505
4.1. Cible de faible numéro atomique: Al / Mg / substrat Si	505
4.2. Cible de numéro atomique moyen: Cr / Ni / substrat Fe	508
4.3. Modes de représentation	510
4.4. Effets de fluorescence	510
4.5. Exemple de situation inextricable (éléments communs)	512
4.6. Déblocage d'une situation inextricable par un élément tiers	514
4.7. Utilisation de 2 raies d'un même élément	515
5. Méthodes itératives	516
5.1. Situations sans élément commun: itération simple	516
5.2. Situations avec éléments communs: itération complexe	516
6. Conclusion	520
Références	520
XV - La cristallographie appliquée à l'EBSD – T. BAUDIN, A.-L. ETTER	521
1. Introduction	521
2. Rappels de cristallographie	521
2.1. Le cristal	521
2.2. Classification des cristaux	523
3. Description et représentation des orientations cristallographiques	525
3.1. Les indices de Miller, les figures de pôles directes et inverses	525
3.2. Direction ou rangée cristallographique	525
3.3. Les angles et l'espace d'Euler	531
3.4. Le vecteur et l'espace de Rodriguès	532
3.5. Comparaison des modes de description et de représentation des orientations cristallographiques	533

XV - La cristallographie appliquée à l'EBSD – T. BAUDIN, A.-L. ETTER - Suite	
4. Caractérisation de la texture	534
4.1. Principe de la diffraction	534
4.2. Mesure de la texture par diffraction des rayons X ou des neutrons	535
4.3. Mesure d'orientations par EBSD	536
4.4. Calcul de la FDOC (Fonction de Distribution des Orientations Cristallines)	537
5. Caractérisation de la nature des joints de grains	539
5.1. Les joints CSL	540
5.2. Texture de joints de grains	541
5. Conclusion	542
Références	542
XVI - L'EBSD : historique, principe et applications – T. BAUDIN, F. BRISSET	545
1. Introduction	545
2. Historique	546
3. Principe et mise en œuvre de l'EBSD	550
3.1. Principe de l'EBSD	550
3.2. Principe de l'indexation des diagrammes EBSD	550
3.3. Recherche d'une orientation absolue (hkl)[uvw]	552
3.4. Indexation automatique des diagrammes EBSD	554
3.5. Cartographie d'orientation	555
4. Quelques exemples d'application	563
4.1. Etude de la déformation	564
4.2. Etude de la recristallisation	565
4.3. Etude de la croissance granulaire	569
4.4. Etude de la recristallisation dynamique	570
4.5. Etude des transformations de phases	571
4.6. Etude de dépôts de surface	572
4.7. Autres matériaux	573
5. Conclusion	574
Références	575
XVIa - L'analyse EBSD – F. BRISSET	579
1. Introduction	579
2. Présentation du système	579
2.1. Rappel des éléments constitutifs	579
3. Acquisition	580
3.1. Installation et étalonnage	581
3.2. Réglages et ajustements	581
4. Conclusion	586
Références	586
XVII - La simulation de Monte Carlo – J.-L. POUCHOU	587
1. Introduction	587
2. Les modèles simplifiés de simulation	587
2.1. Approche de diffusion simple	587
2.2. Approche de diffusion multiple	589
2.3. Principales applications possibles des approches simplifiées (diffusion simple ou multiple)	590
3. Les modèles évolués de simulation	592
3.1. Principes généraux	592
3.2. Limitations liées au traitement individuel des interactions – Réduction de variance par renforcement artificiel des sections efficaces	595
3.3. Application à la distribution en profondeur du rayonnement – Comparaison de diverses approches	598
3.4. Quelques applications des procédures évoluées de simulation	599
4. Conclusion	609
Références	609

XVIII - Les échantillons isolants en MEB et en microanalyse X – J. CAZAUX	611
1. Introduction	611
2. Propriétés spécifiques des isolants	611
2.1. Conductivité électrique et constante diélectrique	611
2.2. Emission électronique secondaire	613
3. Phénomènes de charge en MEB : influence de la focalisation	617
3.1. Généralités	617
3.2. Mode défocalisé, échantillon épais et homogène	618
3.3. Mode focalisé	623
3.4. Mode balayage	626
4. Autres effets en MEB et en microanalyse X	627
4.1. Echantillon métallisé avec mise à la masse	627
4.2. Métallisation flottante et contamination	631
4.3. L'effet des ions positifs en microscopie environnementale	632
4.4. Isolant relativement mince sur substrat à la masse	633
4.5. Conclusion partielle	634
5. Mesures et stratégies	634
5.1. Mesures	634
5.2. Stratégies	639
6. Conclusion	642
Références	642
XVIIIa - Les matériaux isolants – A. JADIN, M. BETBEDER	645
1. Introduction	645
2. Mise en évidence du phénomène de charge : alumine sur acier	645
3. Un exemple représentatif : les polymères	647
3.1. Interaction électrons-polymères	647
3.2. Conductivité électrique et thermique	647
3.3. Composition	648
4. Observation d'un polymère chargé	648
4.1. Description de l'échantillon	648
4.2. Observation	648
5. Observation d'un composite polymère-bois	649
5.1. Description de l'échantillon	649
5.2. Observation	649
6. Observation d'un papier revêtu d'une couche de polymère	650
6.1. Description de l'échantillon	650
6.2. Observation	650
7. Observation d'une éponge cellulosique	651
7.1. Description de l'échantillon	651
7.2. Observation	651
8. Conclusion	652
XVIIIb - La métallisation – F. ROUSSEL	653
1. Introduction	653
2. Observation d'échantillons non conducteurs au MEB	653
3. Techniques de métallisation	654
3.1. Evaporation sous vide secondaire	655
3.2. Evaporation sous vide primaire	656
3.3. Pulvérisation cathodique ou sputtering	657
4. Méthodes de contrôle d'épaisseur déposée	658
5. Exemples de métallisations observées au MEB	658
6. Conclusion	659
Références	660

XIX - Les échantillons biologiques - aperçu des techniques de préparation – P. HALLEGOT	661
1. Introduction	661
2. Préparation des échantillons	661
2.1. La voie chimique	661
2.2. La voie cryogénique	663
2.3. La microscopie à pression contrôlée et la microscopie à chambre environnementale d'échantillons biologiques hydratés	665
3. Quelques commentaires sur les techniques de préparation et les conditions d'observation	665
4. Autres techniques en MEB	665
4.1. Capsules	665
4.2. Accessoire STEM	666
4.3. Polissage ionique et FIB	666
5. Microanalyse et biologie	666
Références	666
XIXa - Les échantillons biologiques – J.P. LECHAIRE, D. DUPEYRE	667
1. Introduction	667
2. Préparation de l'échantillon	667
2.1. Déshydratation à température ambiante	667
2.2. Déshydratation par lyophilisation	667
2.3. Déshydratation par la Méthode du Point Critique	668
2.4. Déshydratation chimique	669
2.5. Inclusion dans une résine	669
2.6. Autres possibilités	670
3. Préparation spécifique pour observation hydratée en MEB conventionnelle	670
4. Observation des préparations	671
4.1. Métallisation par sputtering	671
4.2. Observation	671
5. Conclusion	671
Références	672
XX - Reconstruction 3D de surfaces rugueuses – D. BOIVIN, J.-L. POUCHOU	673
1. Introduction	673
2. Rappel du principe général de la stéréovision	673
3. Application de la stéréovision au cas particulier du MEB	673
3.1. Principe général	673
3.2. Mise en correspondance des pixels homologues – Différentes approches	675
3.3. Aspects expérimentaux	679
4. Exemples d'application	682
4.1. Comparaison "Stéréo3D au MEB" avec l'AFM	682
4.2. Caractérisation d'un grand champ de rugosité élevée	683
4.3. Caractérisation d'une faible rugosité	684
5. Conclusion	685
Références	686
XXa - Imagerie 3D – D. BOIVIN, J.-L. POUCHOU	687
1. Introduction	687
2. Exploitation d'une paire stéréoscopique	687
2.1. Estimation manuelle du dénivelé entre deux détails particuliers de la surface	687
2.2. Construction de l'anaglyphe	688
2.3. Reconstruction 3D de la surface avec le logiciel 3D_TOPx	689
3. Influence des paramètres gouvernant la reconstruction	690
3.1. Paramètres d'acquisition et résolution altimétrique	690
3.2. Alignement des images avec l'axe mécanique d'inclinaison	691
3.3. Signal et rapport Signal/Bruit des images électroniques	696
3.4. Dimension fenêtre de corrélation	697
4. Conclusion	698
Annexes	699

XXI - Image MEB : du traitement numérique à l'analyse quantitative – J.M. CHAIX, J.M. MISSIAEN	701
1. Introduction	701
2. De l'œil à l'image numérique	701
2.1. L'œil et l'image	702
2.2. Les images numériques	702
2.3. Définition de l'image et résolution spatiale	703
2.4. Profondeur de l'image et résolution en intensité - dynamique de l'image	703
2.5. Acquisition des images sur MEB	705
2.6. Gestion des images numériques	706
2.7. Visualisation – « LUT »	707
3. Traitement de l'image en niveaux de gris	707
3.1. Traitement point par point	708
3.2. Seuillage – segmentation	708
3.3. Filtrage de l'image en niveaux de gris	708
3.4. Opérations arithmétiques sur les images	711
3.5. Transformations géométriques	711
3.6. Transformations fréquentielles : transformée de Fourier	712
4. Traitement de l'image binaire - morphologie mathématique	713
4.1. Bases	713
4.2. Opérations élémentaires de morphologie mathématique	714
4.3. Application : extraction d'informations et suppression de défauts	716
5. Les problèmes de bords d'image	716
6. La mesure en analyse d'images – stéréologie	718
6.1. Introduction : analyse individuelle, analyse structurale	718
6.2. Analyse individuelle d'une population d'objets	719
6.3. Analyse de la structure d'un ensemble	720
7. Images 3D	726
7.1. Paires stéréographiques	726
7.2. Volumes 3D	727
8. Conclusion	731
Références	731
XII - Le MEB STEM – F. GRILLON, F. CHARLOT	733
1. Principe du MEB STEM	733
2. Utilisation du détecteur	733
3. Simulation de Monte-Carlo	735
XIII – Les essais mécaniques in situ – R. CHIRON	737
1. Introduction	737
2. Présentation d'un dispositif de traction in situ	737
2.1. La machine de traction	738
2.2. Electronique, interfaçage et logiciel de contrôle et d'acquisition des données	739
2.3. Préparation des éprouvettes	739
3. Essai de traction à température ambiante sur du nickel polycristallin	740
3.1. Mise en place de l'éprouvette	740
3.2. Conduite de l'essai	740
4. Analyse des données : microextensométrie par corrélation d'images et EBSD	743
4.1. Présentation des résultats de l'analyse	743
4.2. Autres résultats issus de l'analyse	746
5. Conclusion	747
Références	748
XXIV - La maintenance et le contrôle du MEB et de la microanalyse X – F. GRILLON	749
1. Maintenance des microscopes	749
1.1. Changement de filament	749
1.2. Nettoyage de la colonne	749
1.3. Le système de vide	750

XXIV - La maintenance et le contrôle du MEB et de la microanalyse X – F. GRILLON - Suite	
2. Contrôle du microscope	750
2.1. Le miroir électrostatique	750
2.2. Contrôle des détecteurs	751
2.3. Contrôle des grandissements et des micromètres	753
2.4. Contrôle des distorsions et de la linéarité	754
2.5. Stabilités	755
2.6. Résolution	756
3. Contrôle du spectromètre à sélection d'énergie	756
3.1. Le détecteur Si(Li)	756
3.2. La fenêtre	757
3.3. La chaîne de mesure	757
4. Conclusion	758
Références	
XXV - L'assurance qualité et la normalisation – F. GRILLON	759
1. Introduction	759
2. Assurance qualité	759
2.1. Intérêt et but	759
2.2. Norme EN ISO/CEI 17025	759
3. Mise en application de la norme, difficultés et limitations	762
4. Utilisation du microscope électronique à balayage en métrologie	764
5. Normalisation	765
6. Conclusion	765
XXVI - La place du MEB dans les techniques expérimentales – J. RUSTE	767
1. Introduction aux techniques expérimentales	767
2. Energie et interactions	769
3. Résolutions et limites de détection	770
3.1. Résolutions spatiales	770
3.2. Résolutions spectrales ou énergétiques	772
3.3. Limite de détection	773
4. Les techniques d'observation	773
4.1. La microscopie optique	774
4.2. La microscopie électronique en transmission (TEM)	775
4.3. Les microscopies à champ proche (STM et AFM)	777
4.4. La microscopie ionique à champ et la sonde atomique tomographique (TAP)	779
5. Les techniques d'analyse	781
5.1. Les spectrométries d'émission	782
5.2. Les spectrométries d'absorption élémentaires	787
5.3. Les spectrométries d'analyse de surface	788
5.4. La spectrométrie d'émission ionique secondaire (SIMS)	792
5.5. Spectroscopie moléculaire	794
6. Conclusion	801
Annexes	801
Références	801
XVII - Une introduction au FIB – G. AUVERT, M. REPOUX, J. RUSTE	807
1. Introduction	807
2. Fonctionnement du microscope à faisceau d'ions	807
2.1. La source d'ions gallium	807
2.2. La colonne	808
2.3. La chambre et le porte-échantillon	809
3. Interaction ions-matière	810
3.1. Implantation des ions gallium et amorphisation du cristal traversé	811
3.2. Emission d'électrons et d'ions secondaires	812
3.3. Gravure	815

XVII - Une introduction au FIB – G. AUVERT, M. REPOUX, J. RUST - Suite	
4.4. Dépôt	816
4. Applications	818
4.1. Coupe transverse d'une particule	818
4.2. Coupes transverses en microélectronique	818
4.3. Micro-usinage d'une pointe	820
4.4. Modification de la connexion électrique d'un circuit	820
4.5. Fabrication de lames minces pour le TEM	821
5. Conclusion	822
Références	822
XXVIII - Une introduction à la MET – P. DONNADIEU	823
1. Introduction	823
2. Microscope Electronique en Transmission (MET) : image et diffraction	823
2.1. Formation d'images en MET	823
2.2. Diffraction électronique	825
3.3. Contrastes des images	826
3. Microscopie conventionnelle : imagerie des microstructures	826
3.1. Microstructure biphasée et effet d'ordre chimique	827
3.2. Précipitation durcissante dans les alliages d'aluminium	828
4. Microscopie haute résolution : imagerie des structures	829
5. Le MET analytique	831
6. Conclusions	832
Références	832
XXIX - La microanalyse X sur échantillons minces – J. RUSTE	833
1. Introduction	833
2. Microanalyse X et résolution spatiale	833
3. Microanalyse X sur échantillon mince	835
4. Microanalyse X quantitative	837
4.1. Emission X d'une lame mince	837
4.2. Méthode de Tixier-Philibert	840
4.3. Méthode de Cliff-Lorimer	840
4.4. Méthode de Van Cappellen	842
4.5. Méthode de Marshall et Hall	843
5. Exemples d'application	845
5.1. Applications métallurgiques	845
5.2. Application biologique	847
6. Conclusion	849
Références	850
XXX - Une introduction à la cathodoluminescence – F. DONATINI	851
1. Introduction	851
2. Origine de la CL dans les semi-conducteurs	851
3. Montage expérimental	852
4. Paramètres importants	854
5. Quelques exemples	854
6. Développements récents	857
Références	858
XXXI - Une introduction à la spectrométrie Raman – A. CRISCI	859
1. L'effet Raman	859
1.1. Traitement classique	860
1.2. Modèle de transfert d'énergie	860
1.3. Autres modèles	861
1.4. Informations extraites d'un spectre Raman	861

XXXI - Une introduction à la spectrométrie Raman – A. CRISCI - Suite	
1.5. Spectres Raman et courbes de dispersion des phonons	862
2. Instrumentation	865
2.1. La source de photons : le laser	865
2.2. Le spectromètre Raman	866
3. Exemples d'application	867
3.1. Identification de composés	867
3.2. Choix de la longueur d'onde excitatrice	869
3.3. Cartographie Raman	871
3.4. Imagerie globale	871
4. Conclusion	872
Références	872
Liste des symboles	873
Terminologie	879
Index	881