

Sommaire

Remerciements	xv
Liste des auteurs	xvii
Préface	xxi

Chapitre 1 : Introduction

1. Intérêt de la diffraction pour la caractérisation des contraintes et de la texture	1
2. Brève histoire de la mesure des contraintes au moyen de la technique des neutrons	3
3. Portée de l'ouvrage	7

Chapitre 2 : Intérêt des neutrons dans la caractérisation des matériaux

1. Caractéristiques du neutron	13
1.1. <i>Onde et particule</i>	13
1.2. <i>Interaction neutron-matière</i>	14
1.3. <i>Absorption</i>	15
2. Production des neutrons	16
2.1. <i>Sources de neutrons à fission</i>	16
2.2. <i>Sources de neutrons à spallation</i>	17
2.3. <i>État des lieux et évolution future des sources de neutrons</i>	18
3. Instrumentation	19
3.1. <i>Fonction de diffusion d'un ensemble d'atomes</i>	19
3.2. <i>Diffractomètres pour poudres et mesures de déformations</i>	21
3.3. <i>Comparaison entre les instruments sur sources continues et sur sources pulsées</i>	22
4. Principales applications de la diffusion de neutrons en science des matériaux	24
4.1. <i>Diffraction de Bragg</i>	25

4.2. Contraintes résiduelles	26
4.3. Diffusion diffuse élastique	30
4.4. Diffusion de neutrons aux petits angles (DNPA)	31
4.5. Réflectométrie de neutrons	33
4.6. Diffusion inélastique de neutrons	34
4.7. Diffusion quasi élastique de neutrons	36
5. Autres techniques de caractérisation des matériaux utilisant des faisceaux de neutrons	36
5.1. Neutronographie	36
5.2. Analyse par activation neutronique (AAN)	39
6. Conclusion et perspectives	40

Chapitre 3 : Utilisation du rayonnement synchrotron en science des matériaux

1. Le rayonnement synchrotron	43
2. Dispositifs d'insertion	45
3. Optiques des rayons X	48
4. Diffraction en science des matériaux	49
5. Imagerie	53
6. Diffraction et microtomographie couplées en science des matériaux ...	54
7. Conclusion	55

Chapitre 4 : Évaluation et problèmes dans la détermination des contraintes

4.1 Détermination des contraintes macroscopiques par la technique de la diffraction

1. Principe de détermination des contraintes par diffraction	60
2. Définition des contraintes et des déformations	62
3. Relations macroscopiques et microscopiques	64
3.1. Cas d'une structure monocristalline	64
3.2. Cas d'une structure isotrope polycristalline non texturée	67
3.3. Cas d'une structure polycristalline polyphasée non texturée	67
4. Conclusion	69

4.2 Mesure des macrocontraintes par diffraction dans les matériaux texturés

1. Introduction	71
-----------------------	----

2. Calcul des constantes élastiques de diffraction pour des matériaux texturés	73
2.1. <i>Modèles de calcul des constantes élastiques de diffraction</i>	74
2.2. <i>L'approche quasi isotrope</i>	80
3. Modélisation et détermination expérimentale des constantes élastiques de diffraction	81
3.1. <i>Influence de l'anisotropie du cristal</i>	81
3.2. <i>Influence de l'anisotropie d'un échantillon</i>	83
3.3. <i>Vérification expérimentale des constantes élastiques de diffraction</i>	86
4. Méthode des réflexions multiples pour la détermination des contraintes dans un échantillon texturé	90
4.1. <i>Mesures de macrocontraintes dans des échantillons de cuivre laminés à froid</i>	92
4.2. <i>Évolution de la microstructure et de l'état de la contrainte pendant le recuit du cuivre laminé à froid</i>	94
5. Conclusion	96

4.3 Détermination des contraintes microscopiques par la technique de diffraction

1. Introduction	99
2. Approche physique et micromécanique du matériau	100
3. Traitement des pics de diffraction et soustraction des effets instrumentaux	103
4. Influence des hétérogénéités de déformations élastiques des cristallites ...	105
5. Effet de la taille des domaines cohérents de diffraction et de la distribution des microdéformations d'ordre III	109
6. Expression globale de l'élargissement des pics de diffraction	111

Chapitre 5 : Techniques de mesures

5.1 Diffraction des rayons X de laboratoire

1. Introduction	116
2. Principe	116
2.1. <i>Relation entre la diffraction et la déformation élastique</i>	116
2.2. <i>Relation entre la déformation élastique et la contrainte</i>	117
2.3. <i>Détermination des contraintes par diffraction</i>	119
3. Acquisition	120
3.1. <i>Préparation de l'échantillon</i>	120
3.2. <i>Choix des conditions de diffraction</i>	121
3.3. <i>Stratégies d'acquisition</i>	122
3.4. <i>Réglage du goniomètre</i>	134
3.5. <i>Problèmes de taille de cristallites</i>	137
3.6. <i>Problème des pics tronqués</i>	138

3.7.	<i>Détermination de gradients de contrainte selon la profondeur</i>	139
3.8.	<i>Détermination de gradients de contrainte selon la surface</i>	142
4.	Traitement des données	142
4.1.	<i>Traitement des diffractogrammes</i>	142
4.2.	<i>Traitement des positions des pics de diffraction</i>	143
4.3.	<i>Traitement simultané de l'ensemble des données</i>	149
5.	Interprétation des résultats	151
5.1.	<i>Définition du mesurande</i>	151
5.2.	<i>Contraintes d'ordre II</i>	152
5.3.	<i>Texture cristalline</i>	153
5.4.	<i>Multiphasage</i>	155
5.5.	<i>Rugosité</i>	155
5.6.	<i>Géométrie de l'échantillon</i>	156
6.	Évaluation de la qualité des mesures	158
6.1.	<i>Évaluation qualitative</i>	158
6.2.	<i>Calcul d'incertitude</i>	159
6.3.	<i>Échantillons de référence</i>	164
6.4.	<i>Normalisation</i>	165
6.5.	<i>Informations nécessaires à l'évaluation de la qualité et à l'interprétation des mesures</i>	165
7.	Conclusion	166

5.2 Imagerie des champs de déformation obtenue par diffraction neutronique

1.	Introduction	172
2.	Spécifications pour un système d'imagerie des déformations	173
3.	L'instrument SALSA à l'ILL	175
3.1.	<i>Description générale de l'instrument</i>	176
3.2.	<i>Porte-échantillon robotisé</i>	178
3.3.	<i>Monochromateur et guide de neutrons</i>	182
3.4.	<i>Fentes optiques</i>	186
3.5.	<i>Collimateurs radiaux</i>	188
4.	Profil d'intensité et résolution latérale	191
5.	Imagerie et distribution de longueurs d'ondes de la sonde de mesure	192
6.	Conclusion	197
	Annexe	198

5.3 Diffraction par rayonnement synchrotron

1.	Introduction	201
2.	Pénétration du faisceau	203
3.	Volume de mesure	204
3.1.	<i>Géométrie en transmission et en réflexion</i>	204
3.2.	<i>Résolution spatiale</i>	205
4.	Cristal analyseur	206

5. Position du pic de diffraction et incertitude	207
6. Installation typique à partir d'un diffractomètre poudre	208
7. Techniques d'imagerie bidimensionnelle	208
7.1. <i>Diffraction conventionnelle 2D sur poudre</i>	209
7.2. <i>Microscopie 3D par rayons X synchrotron</i>	210
8. Techniques en dispersion d'énergie	212
9. Exemples expérimentaux	213
9.1. <i>Soudage par friction malaxage analysé sur ID31 de l'ESRF</i>	213
9.2. <i>Diffraction par dispersion d'énergie d'éprouvettes fissurées</i>	215
10. Conclusion	216

5.4 Cartographies d'orientations et de déformations à l'échelle submicronique grâce à la microdiffraction en faisceau polychromatique

1. Introduction	219
2. Description des composants des lignes de lumière	220
3. Logiciel d'analyse	223
4. Exemples d'applications de la microdiffraction Laue	226
4.1. <i>Échantillons à gros grains – Alliage à mémoire de forme</i>	226
4.2. <i>Échantillons à grains fins – Films minces texturés</i>	229
5. Conclusion	230

5.5 Diffraction des rayons X : un outil de choix pour l'étude des propriétés mécaniques aux petites échelles

1. Introduction	235
2. Diffraction cinématique des rayons X : puissant outil pour l'analyse des déformations dans les cristaux	236
3. Faisceaux de rayons X de taille submicronique	243
4. Réseaux périodiques	244
5. Diffraction cohérente	246
6. Inversion	247
7. Conclusion	248

5.6. Un regard sur l'EBS, procédures passées et nouvelles

1. Introduction	251
2. Principe de diffraction des électrons rétrodiffusés	252
3. Formation des clichés de diffraction d'électrons rétrodiffusés	255
4. Détection, indexation et mesure d'orientation	258
5. Cartographie d'orientations	261
6. Cartographie de phases	262
7. Mesure de la déformation élastique	268
8. Conclusion	272

Chapitre 6 : Influence de la texture

6.1 Représentation des orientations cristallines - Quelques exemples de texture

1. Introduction	278
2. Description et représentation des orientations cristallines	278
2.1. Indices de Miller, figures de pôles directes et inverses	279
2.2. Angles et espace d'Euler	283
3. Quelques exemples de texture dans les métaux	285
3.1. Textures de solidification	285
3.2. Textures de déformation à chaud	286
3.3. Textures de déformation à froid	287
3.4. Textures de recristallisation	295
4. Quelques exemples de textures (ou fabriques) dans les matériaux géologiques	299
5. Conclusion	300

6.2 Mesure de la texture par diffraction des rayons X ou des neutrons et calcul de la FDOC

1. Introduction	303
2. Mesures des figures de pôles directes par diffraction	304
2.1. Diffraction des rayons X	305
2.2. Diffraction des neutrons	306
2.3. Conclusion	310
3. Fonction de Distribution des Orientations Cristallines (FDOC)	311
3.1. Définition	311
3.2. Calcul de la FDOC	312
4. Exemples d'application de la diffraction des neutrons	315
4.1. Exemple de suivi in situ de la recristallisation du cuivre	316
4.2. Étude in situ de l'évolution de la texture de la glace soumise à un chargement uniaxial	317
4.3. Texture d'une cuirasse d'un arquebusier	319
5. Conclusion	319

6.3 Mesure de la texture et calcul de la FDOC à l'aide d'approches locales

1. Introduction	322
2. Méthodes de mesure des orientations cristallographiques	322
3. Corrélacion entre la texture et la microstructure	323
4. Calcul de la FDOC	326
4.1. Méthode harmonique	326
4.2. Méthode de Matthies	328
5. Analyse de la texture	329
6. Conclusion	339

6.4 Influence des textures sur les propriétés physiques

1. Introduction	343
2. Propriétés élastiques	343
2.1. <i>Monocristaux</i>	344
2.2. <i>Polycristaux</i>	345
3. Expansion thermique	348
3.1. <i>Cas des bicristaux de zinc</i>	350
3.2. <i>Rochet thermique (thermal ratchetting) de l'uranium</i>	352
3.3. <i>Cas du zircaloy-2</i>	354
4. Anisotropie de déformation plastique	358
4.1. <i>Cornes d'emboutissage</i>	358
4.2. <i>Durcissement textural (texture hardening) des matériaux de structure hexagonale compacte</i>	363
5. Texture et contraintes résiduelles	364
6. Texture et anisotropie magnétocristalline	370
7. Texture et magnétostriction	373
8. Conclusion	375

Chapitre 7 : Interprétation des contraintes résiduelles à l'aide de la simulation numérique

7.1 Modèle autocohérent de la déformation élastoplastique et ses applications

1. Généralités sur la modélisation de la déformation	380
1.1. <i>Mécanismes de la déformation plastique</i>	380
1.2. <i>Caractéristiques générales des modèles de déformation</i>	382
1.3. <i>Notions de base</i>	384
2. Modèle autocohérent	389
2.1. <i>Modules tangents</i>	389
2.2. <i>Calcul des déformations</i>	390
2.3. <i>Tenseurs de concentration</i>	392
2.4. <i>Critères de sélection des systèmes de glissement</i>	393
3. Applications du modèle autocohérent	393
3.1. <i>Prévision des textures</i>	394
3.2. <i>Prévision des courbes de durcissement</i>	395
3.3. <i>Interprétation des mesures des contraintes résiduelles par diffraction</i>	395
3.4. <i>Étude des contraintes internes dans un acier biphasé</i>	398
3.5. <i>Étude des contraintes internes dans un composite AlSiC</i>	398
3.6. <i>Calcul de l'énergie de dislocations et de l'énergie élastique stockée dans le matériau</i>	400
4. Conclusion	402

Annexe 1 Calcul des vitesses de glissement et du module tangent du grain . . .	404
Annexe 2 Équation intégrale décrivant le comportement du matériau hétérogène	405

7.2 Simulation par la méthode des éléments finis du comportement mécanique local des polycristaux – couplages physiques

1. Introduction	410
2. Agrégats cristallins, conditions aux limites et maillage	410
2.1. <i>Obtention des agrégats</i>	410
2.2. <i>Maillage et conditions aux limites</i>	412
3. Modèles cristallins	413
3.1. <i>Modélisation du type forêt avec écrouissage isotrope, $T > T_F/3$</i>	413
3.2. <i>Modèles du type Forêt avec écrouissage cinématique, $T > 0,3T_F$</i>	418
3.3. <i>Modèles cristallins basse température, écrouissage isotrope, $T < T_F/3$</i>	419
3.4. <i>Modèle de transition hautes / basses températures</i>	424
4. Cadre de la modélisation – description du formalisme en grandes transformations	427
5. Exemples	430
5.1. <i>Modélisation du forgeage à chaud d'un alliage de titane</i>	431
5.2. <i>Simulation de la recristallisation d'une tôle d'acier laminée – Couplage déformation-recristallisation</i>	433
5.3. <i>Simulation de la rupture en fond de fissure dans la transition fragile/ductile – Couplage déformation-probabilité de rupture</i>	439
6. Conclusion	445

7.3 Apport de la simulation numérique pour l'évaluation des contraintes par diffraction de neutrons et rayonnement synchrotron

1. Introduction	449
2. Simulation d'un diffractomètre de neutrons deux axes	451
3. Évaluation des contraintes d'une pièce nitrurée	455
4. Évaluation des contraintes résiduelles d'un alliage à base nickel grenailé	459
5. Contraintes résiduelles d'une liaison métal céramique	464
6. Contraintes résiduelles d'une soudure hétérogène	472
7. Conclusion	475

Chapitre 8 : Applications

8.1 Applications en aéronautique

1. Progression dans l'utilisation des grands instruments	478
---	------------

2. Analyse de contraintes et corrections instrumentales	479
3. Exemples d'application utilisant les grands instruments	481
3.1. <i>Traitement de surface de nitruration</i>	481
3.2. <i>Assemblage par FSW</i>	485
3.3. <i>Procédé de formage de tôles minces par déformations plastiques locales</i>	488
4. Conclusion	491

8.2 Mesure et modélisation de la redistribution des contraintes résiduelles, sous sollicitations cycliques, dans un assemblage fretté roue-axe ferroviaire

1. Introduction	493
2. Contexte industriel	494
3. Modélisation numérique	495
3.1. <i>Loi de comportement du matériau</i>	495
3.2. <i>Simulation numérique du calage à la presse</i>	497
3.3. <i>Simulation du chargement de fatigue</i>	503
3.4. <i>Conclusion</i>	509
4. Mise en évidence de la redistribution des contraintes résiduelles dans l'assemblage par diffraction de neutrons	510
4.1. <i>Étude préliminaire</i>	510
4.2. <i>Redistribution des champs mécaniques par fatigue oligocyclique</i>	518
5. Conclusion	523

8.3 Évaluation des contraintes résiduelles dans des assemblages soudés

1. Introduction	525
1.1. <i>Généralités</i>	525
1.2. <i>Difficultés liées aux mesures de déformations dans et au voisinage de cordons de soudure</i>	527
1.3. <i>Avantages de la diffraction des neutrons sur les autres techniques permettant de déterminer des contraintes résiduelles</i>	528
2. Influence des contraintes résiduelles sur les structures mécanosoudées ..	529
2.1. <i>Fissuration par l'hydrogène</i>	529
2.2. <i>Ruine par fatigue</i>	529
3. Exemples de mesures de déformations résiduelles par diffraction des neutrons dans le cas de structures soudées	530
3.1. <i>Comparaison des mesures obtenues par diffraction des neutrons à d'autres techniques de mesures</i>	530
3.2. <i>Quelques applications spécifiques sur les joints soudés</i>	539
3.3. <i>Comparaison entre mesures de déformations résiduelles par diffraction des neutrons et modélisations</i>	544
4. Effet des textures cristallographiques sur les calculs de contraintes résiduelles dans les cordons de soudures	551
5. Conclusion	556

8.4 Estimation de l'énergie stockée, force motrice de la recristallisation

1. Introduction	560
2. Mesure de l'énergie stockée en fonction de l'orientation cristallographique par diffraction	560
2.1. Principe de la méthode de mesure par diffraction des rayons X ou des neutrons	560
2.2. Résultats obtenus par la méthode de mesure d'énergie par diffraction	564
3. Calcul de l'énergie stockée en fonction de l'orientation cristallographique à l'aide du MET et de l'EBSD	571
3.1. Principe de l'approche de Dillamore	571
3.2. Modification apportée à la méthode de Dillamore	571
4. Étude comparative des mesures d'énergie	573
5. Conclusion	575

8.5 Analyse des contraintes internes dans les matériaux composites

1. Introduction	577
2. Les contraintes internes dans les composites	578
3. Application des techniques de diffraction pour l'analyse des contraintes résiduelles dans les matériaux composites	580
3.1. Contraintes thermiques	581
3.2. Contraintes induites par la déformation plastique	582
3.3. Les contraintes générées par les différences d'élasticité	583
4. Détermination des profils de macrocontraintes résiduelles	585
5. Conclusion	586

8.6 Intérêt de la diffraction de neutrons et de rayons X du rayonnement synchrotron dans l'analyse des matériaux à mémoire de forme

1. Introduction	590
2. Mesure des déformations et analyse des contraintes par diffraction de neutrons	590
2.1. Diffraction de neutrons en temps de vol – Études expérimentales sur les alliages FePd, CuAlZnMn et NiTi	590
2.2. Diffraction de neutrons à haute résolution en angle – Étude expérimentale sur l'alliage CuAlBe	593
3. Diffraction de rayons X du rayonnement synchrotron	596
3.1. Le microscope 3DXRD	597
3.2. Technique « MicroLaue » ou microdiffraction polychromatique	601
4. Conclusion	607

8.7 Caractérisation des biomatériaux implantaires

1. Introduction	609
-----------------------	-----

2. Tissus calcifiés	609
2.1. <i>Le tissu osseux</i>	610
2.2. <i>Mesures expérimentales dans l'os</i>	610
3. Les biomatériaux implantaires	612
3.1. <i>Modélisation de la projection d'HAp par torche plasma sur substrat de titane</i>	613
3.2. <i>Contraintes résiduelles déterminées par la méthode de diffraction de rayonnement synchrotron</i>	615
4. Interface os-implant en titane revêtu par HAp	619
5. Conclusion	623
8.8 Déformations résiduelles dans les géomatériaux : exemple des roches riches en quartz	
1. Introduction	625
2. Origine et application aux géomatériaux	625
3. Classification des déformations ou des contraintes résiduelles	626
4. Méthodes de diffraction appliquées aux géomatériaux	629
5. Déformations résiduelles dans des roches faiblement déformées à froid : les grès	630
6. Cas d'études des déformations résiduelles par des méthodes distinctes de la diffraction des neutrons	633
6.1. <i>Exemple du plissement d'une couche de grès</i>	633
6.2. <i>Déformation de plaques de marbre</i>	634
7. Hétérogénéité des déformations résiduelles dans les géomatériaux	636
8. Les déformations résiduelles dans les quartzites : dualité déformation-recristallisation ?	638
9. Interprétation du tenseur des déformations résiduelles. Application à la modélisation numérique des textures	642
10. Conclusion	644
Index	649