

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
Catherine DEJOIE, Pauline MARTINETTO et Nobumichi TAMURA	
<b>Chapitre 1. Introduction au rayonnement synchrotron : application à l'étude des matériaux du patrimoine culturel et des biominéraux.</b> . . . . .	3
Catherine DEJOIE, Pauline MARTINETTO et Nobumichi TAMURA	
1.1. Introduction. . . . .	3
1.2. Rayonnement synchrotron . . . . .	6
1.3. Rayonnement synchrotron et patrimoine culturel . . . . .	11
1.4. Conclusion . . . . .	14
1.5. Remerciements. . . . .	15
1.6. Bibliographie. . . . .	15
<b>Chapitre 2. L'utilisation du rayonnement synchrotron pour l'étude des matériaux du patrimoine culturel</b> . . . . .	21
Nobumichi TAMURA, Catherine DEJOIE et Pauline MARTINETTO	
2.1. Introduction. . . . .	22
2.2. Les techniques utilisant le rayonnement synchrotron mises en œuvre dans l'étude des matériaux du patrimoine culturel . . . . .	25
2.3. L'étude de pigments spécifiques dans les céramiques, les sculptures et les peintures murales . . . . .	29
2.3.1. Les pigments d'oxyde de fer dans les céramiques de Jian . . . . .	30
2.3.2. Le pigment bleu maya en Mésoamérique . . . . .	33

2.4. L'étude des peintures . . . . .	37
2.5. L'étude des peintures murales et de l'art rupestre . . . . .	41
2.6. L'étude des cosmétiques . . . . .	42
2.7. L'étude des parchemins et des manuscrits. . . . .	44
2.8. L'utilisation du rayonnement synchrotron dans l'aide à la restauration et conservation des œuvres d'art . . . . .	46
2.9. Autres études dans le domaine du patrimoine culturel . . . . .	49
2.10. Les études en paléontologie . . . . .	52
2.11. Conclusion . . . . .	56
2.12. Remerciements . . . . .	57
2.13. Bibliographie . . . . .	58

### **Chapitre 3. La spectroscopie d'absorption des rayons X plein champ pour l'étude du patrimoine culturel . . . . .**

Émeline POUYET, Letizia MONICO, Philippe SCIAU et Marine COTTE

3.1. Introduction. . . . .	76
3.2. Le contexte international des instruments FF-XANES dans le domaine des rayons X durs et mous . . . . .	80
3.3. Exemple de méthodologie analytique développée pour les études sur le patrimoine culturel sur la ligne ID21 (ESRF). . . . .	82
3.3.1. Préparation des échantillons. . . . .	82
3.3.2. Acquisition et prétraitement des données . . . . .	83
3.3.3. Chaînes de traitement d'analyse des données . . . . .	85
3.3.4. Une stratégie d'imagerie chimique à faible dose pour certains cas spécifiques . . . . .	86
3.4. Applications de la technique FF-XANES pour l'étude d'échantillons du patrimoine culturel . . . . .	90
3.4.1. Composition et dégradation de la peinture : échantillons historiques et modèles . . . . .	90
3.4.2. Instrumentation combinée pour une caractérisation multi-échelle représentative : l'exemple de l'estimation des conditions de cuisson des céramiques romaines antiques . . . . .	96
3.5. Conclusion . . . . .	99
3.6. Remerciements. . . . .	101
3.7. Bibliographie. . . . .	101

<b>Chapitre 4. Cartographie et tomographie structurale par diffraction/diffusion : une analyse sélective locale des matériaux du patrimoine culturel</b> . . . . .	109
Jean-Louis HODEAU, Michèle ALVAREZ-MURGA, Michel ANNE, Pierre-Olivier AUTRAN, Nils BLANC, Pierre BLEUET, Nathalie BOUDET, Pierre BORDET, Sophie CERSOY, Catherine DEJOIE, Éric DOORYHÉE, Florian KERGOURLAY, Olivier LEYNAUD, Pauline MARTINETTO, Alain PRAT et Philippe WALTER	
4.1. Introduction . . . . .	110
4.2. Cartographie 2D par diffraction . . . . .	112
4.2.1. Premières expériences d'imageries . . . . .	112
4.2.2. Cartographie 2D d'un artefact « brut » du patrimoine . . . . .	113
4.2.3. Complémentarité des cartographies 2D faites sur des prélèvements et/ou directement sur les œuvres : exemple du blanc de plomb . . . . .	119
4.3. Cartographie 3D par tomographie . . . . .	125
4.3.1. Historique de la méthode . . . . .	125
4.3.2. Tomographie 3D avec différents modes d'interactions physiques . . . . .	126
4.3.3. Différents types de tomographies 3D par diffraction . . . . .	127
4.4. <i>Diffraction/Scattering Computed Tomography</i> (DSCT) . . . . .	129
4.4.1. Premières expériences DSCT . . . . .	129
4.4.2. Méthodologie des analyses et des reconstructions DSCT . . . . .	131
4.4.3. Sélectivité des analyses DSCT . . . . .	132
4.4.4. Sélectivité des analyses DSCT « multimodales » . . . . .	135
4.4.5. La grande gamme d'application de la DSCT . . . . .	138
4.4.6. Outils d'analyse pour les imageries par DSCT . . . . .	139
4.4.7. Analyses par DSCT dédiées aux matériaux du patrimoine . . . . .	140
4.5. Conclusion . . . . .	145
4.6. Remerciements . . . . .	146
4.7. Bibliographie . . . . .	146
 <b>Chapitre 5. Apport du rayonnement synchrotron à l'étude des couvertes de céramiques anciennes</b> . . . . .	 163
Philippe SCIAU et Chantal BROUCA-CABARRECQ	
5.1. Introduction . . . . .	163
5.2. Problématique . . . . .	164
5.3. Techniques spectroscopiques . . . . .	167

5.3.1. Spectroscopie d'absorption en microfaisceau . . . . .	168
5.3.2. Imagerie et spectroscopie « plein champ » . . . . .	174
5.4. Techniques de diffraction . . . . .	179
5.4.1. Avec un faisceau monochromatique (diffraction de poudre) . . .	179
5.4.2. Avec un faisceau polychromatique (méthode de Laue). . . . .	183
5.5. Conclusion . . . . .	188
5.6. Bibliographie. . . . .	189

**Chapitre 6. Apport des techniques synchrotron basées sur les rayons X pour l'étude de l'altération des matériaux en fer du patrimoine culturel . . . . . 193**

Solenn RÉGUER, François MIRAMBET, Judith MONNIER, Delphine NEFF, Eddy FOY et Philippe DILLMANN

6.1. Introduction. . . . .	193
6.2. Diagnostic de la corrosion du fer dans les monuments historiques . . .	198
6.2.1. Identification des produits de corrosion . . . . .	198
6.2.2. Éléments chimiques spécifiques provenant des processus d'élaboration. . . . .	200
6.3. Expérimentations <i>in situ</i> pour une observation directe des processus de corrosion . . . . .	203
6.3.1. Comment révéler les processus de corrosion atmosphérique ? . .	203
6.3.2. Corrosion du fer dans les ciments des monuments historiques . .	204
6.4. Corrosion et stabilisation des objets archéologiques. . . . .	205
6.4.1. Corrosion dans les sols anoxiques . . . . .	205
6.4.2. Produits de corrosion spécifiques contenant du chlore . . . . .	206
6.4.3. Étude du traitement de déchloration. . . . .	208
6.5. Protection des objets anciens en fer. . . . .	209
6.6. Conclusion et perspectives. . . . .	210
6.7. Remerciements. . . . .	211
6.8. Bibliographie. . . . .	211

**Chapitre 7. Études de microdiffraction des rayons X synchrotron sur les mortiers des anciens bétons romains . . . . . 217**

Marie D. JACKSON, Heng CHEN, Jacob G. PETERSON, Cagla MERAL AKGUL et Bryony RICHARDS

7.1. Introduction. . . . .	217
7.2. Études de diffraction des rayons X sur poudre standard des mortiers romains . . . . .	220

7.3. Études $\mu$ XRD et $\mu$ XRF synchrotron de mortiers romains anciens . . .	224
7.4. Mortiers architecturaux : marchés et forum de Trajan. . . . .	226
7.4.1. Matrice cimentaire . . . . .	227
7.4.2. Scories vésiculaires. . . . .	229
7.4.3. Agrégat ponceux . . . . .	230
7.5. Mortier portuaire marin : <i>Baianus Sinus</i> , baie de Pouzzoles . . . . .	231
7.5.1. Claste de chaux résiduel et matrice cimentaire. . . . .	231
7.5.2. Cavité sphérique résiduelle . . . . .	235
7.6. Principes romains de la longévité du béton . . . . .	237
7.7. Conclusion . . . . .	239
7.8. Remerciements. . . . .	240
7.9. Bibliographie. . . . .	240

## **Chapitre 8. Stabilisation et cristallisation des phases de carbonate de calcium amorphe chez l'oursin adulte. . . . . 247**

Marie ALBÉRIC et Ronald SEIDEL

8.1. Introduction. . . . .	247
8.2. Phénomènes de biominéralisation chez les oursins . . . . .	249
8.3. Présence de précurseurs de l'ACC dans les radioles d'oursins régénérés . . . . .	253
8.3.1. Pourquoi et comment utiliser la spectromicroscopie électronique par photoémission de rayons X (X-PEEM) ? . . . . .	253
8.3.2. Spectres XANES au seuil $L_{2,3}$ du Ca. . . . .	254
8.3.3. Cartes des composantes du Ca . . . . .	255
8.4. Structure et stabilité de l'ACC : rôle de l'eau et des impuretés ioniques . . . . .	256
8.4.1. Structure des ACC . . . . .	256
8.4.2. Pourquoi et comment effectuer une analyse de la fonction de distribution de paires ? . . . . .	257
8.4.3. PDF de l'ACC et du Mg-ACC . . . . .	259
8.4.4. PDF obtenues <i>in situ</i> pendant la cristallisation de l'ACC et du Mg-ACC . . . . .	260
8.5. Rôle de l'ACC dans les phénomènes de biominéralisation des radioles d'oursins . . . . .	262
8.5.1. Pourquoi et comment utiliser la diffraction des rayons X à haute résolution ? . . . . .	262
8.5.2. Distorsions du réseau de la calcite biogénique. . . . .	265
8.5.3. Pourquoi et comment utiliser la diffusion <i>in situ</i> des rayons X aux petits angles ? . . . . .	266
8.5.4. Quantification de la nanoporosité . . . . .	266

8.6. Conclusion . . . . .	267
8.7. Remerciements . . . . .	268
8.8. Bibliographie . . . . .	269

<b>Liste des auteurs . . . . .</b>	<b>277</b>
------------------------------------	------------

<b>Index . . . . .</b>	<b>281</b>
------------------------	------------