

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
Hannelore DERLUYN et Marc PRAT	
<b>Introduction</b> . . . . .	5
Marc PRAT	
<b>Partie 1. Aspects fondamentaux</b> . . . . .	15
<b>Chapitre 1. Thermodynamique et cinétique de la cristallisation de sels</b> . . . . .	17
Lionel MERCURY	
1.1. Introduction . . . . .	17
1.2. Force motrice thermodynamique . . . . .	18
1.2.1. Équilibre, spontanéité, irréversibilité . . . . .	18
1.2.2. Paramètres contrôlant la force motrice . . . . .	19
1.2.3. Expression de la force motrice . . . . .	29
1.3. Stabilité, métastabilité et instabilité. . . . .	31
1.4. Cinétique des transformations de phase . . . . .	33
1.4.1. Équation caractéristique . . . . .	33
1.4.2. Couplage chimie-transport . . . . .	35
1.5. Conclusion . . . . .	36
1.6. Bibliographie. . . . .	36

<b>Chapitre 2. La pression de cristallisation</b> . . . . .	<b>39</b>
Noushine SHAHIDZADEH	
2.1. Introduction. . . . .	39
2.2. Notion de pression de cristallisation . . . . .	41
2.3. Mesure directe de la contrainte générée lors de la cristallisation en confinement . . . . .	44
2.4. Relation entre pression de cristallisation et pression de disjonction. . .	52
2.5. Concentration dans les films minces piégés entre le cristal et la paroi en fin d'évaporation . . . . .	53
2.6. Conclusion . . . . .	54
2.7. Remerciements. . . . .	55
2.8. Bibliographie. . . . .	56
<b>Chapitre 3. Évaporation, transport et cristallisation</b> . . . . .	<b>61</b>
Marc PRAT	
3.1. Introduction. . . . .	61
3.2. Évaporation en milieu poreux . . . . .	62
3.2.1. Deux situations génériques . . . . .	62
3.2.2. Cinématique . . . . .	65
3.3. Transport des ions . . . . .	65
3.4. Sursaturation . . . . .	68
3.5. Subfloreescence et effloreescence. . . . .	69
3.6. Effloreescence ramifiée <i>versus</i> effloreescence compacte (croûte) . . . . .	70
3.7. Enracinement de l'effloreescence . . . . .	71
3.8. Facteurs affectant la distribution des effloreescences à la surface . . . . .	72
3.9. Dynamique des effloreescences . . . . .	74
3.10. Impact de l'effloreescence sur la cinétique de séchage . . . . .	75
3.11. Croûtes à motifs . . . . .	79
3.12. Évaporation et formation de subfloreescence. . . . .	80
3.13. Modèles . . . . .	80
3.14. Autres sels. . . . .	83
3.15. Conclusion . . . . .	83
3.16. Bibliographie . . . . .	84

<b>Chapitre 4. La pomomécanique et la cristallisation confinée en milieu poreux</b> . . . . .	91
Patrick DANGLA	
4.1. Introduction. . . . .	91
4.2. Potentiel chimique du cristal sous état de contraintes anisotropes. . . . .	93
4.3. Pression de cristallisation et cinétiques de croissance . . . . .	94
4.4. Thermodynamique de la cristallisation en milieu confiné . . . . .	98
4.5. Équations d'état de la proélasticité et degrés de saturation . . . . .	101
4.6. Identification des propriétés poroélastiques . . . . .	106
4.7. Courbe de rétention d'eau et répartition des cristaux de sels . . . . .	107
4.7.1. Équilibre thermodynamique pour l'interface cristal-solution . . . . .	108
4.7.2. Hors-équilibre thermodynamique pour l'interface cristal-solution. . . . .	110
4.8. Conclusion . . . . .	111
4.9. Bibliographie. . . . .	112

<b>Chapitre 5. Observations expérimentales sur la cristallisation des sels dans les géomatériaux.</b> . . . . .	115
Hannelore DERLUYN	
5.1. Introduction. . . . .	115
5.2. Imagerie par rayons X et neutrons . . . . .	116
5.2.1. Interaction des rayons X et des neutrons avec la matière. . . . .	116
5.2.2. Imagerie des géomatériaux et des processus dynamiques . . . . .	120
5.3. Évaporation de l'eau saline et déformations induites par la cristallisation étudiées par radiographie neutronique à haute résolution . . . . .	123
5.3.1. Procédure expérimentale et analyse d'image. . . . .	123
5.3.2. Cristallisation de sel induite par le séchage dans un calcaire poreux . . . . .	125
5.4. Dynamique de cristallisation du sel dans un échantillon de grès étudiée par microtomographie à rayons X en laboratoire 4D . . . . .	135
5.4.1. Procédure expérimentale et analyse d'image. . . . .	135
5.4.2. Cinétique de séchage-cristallisation . . . . .	137
5.5. Conclusion . . . . .	139
5.6. Remerciements. . . . .	140
5.7. Bibliographie. . . . .	141

**Partie 2. Illustrations** . . . . . 145**Chapitre 6. Les précipitations minérales à grande échelle et leurs effets sur les infrastructures** . . . . . 147

Anna RAMON-TARRAGONA et Eduardo E. ALONSO

6.1. Introduction. . . . .	147
6.2. Effets nuisibles des expansions dans les roches et sols sulfatés . . . . .	148
6.3. Phénomènes expansifs extrêmes dans le tunnel de Lilla . . . . .	151
6.3.1. Géologie, conception et construction . . . . .	151
6.3.2. Phénomènes expansifs et propriétés du sol . . . . .	153
6.3.3. Renforcement et reconstruction du tunnel . . . . .	156
6.4. Soulèvement du viaduc du pont de Candí . . . . .	158
6.4.1. Comportement du viaduc et géologie . . . . .	158
6.4.2. Investigation de terrain. . . . .	159
6.4.3. Mesures correctives. . . . .	164
6.4.4. Réaction d'un groupe de piles à l'expansion profonde . . . . .	165
6.5. Mécanismes de gonflement dans les roches sulfatées . . . . .	166
6.5.1. Interprétation actuelle . . . . .	166
6.5.2. Pressions de cristallisation dans les roches anhydritiques . . . . .	169
6.5.3. Scénarios d'expansion et de soulèvement dans les roches anhydritiques. . . . .	170
6.6. Modélisation couplée thermo-hydro-mécanique et chimique de la précipitation des cristaux et de la déformation des roches contre les infrastructures . . . . .	171
6.6.1. Formulation des modèles . . . . .	171
6.7. Calcul de l'expansion : comparaison avec les observations sur le terrain . . . . .	173
6.7.1. Analyse de sensibilité . . . . .	175
6.8. Conclusion . . . . .	176
6.9. Remerciements. . . . .	177
6.10. Bibliographie . . . . .	177

**Chapitre 7. Les sels dans le patrimoine** . . . . . 181

Julie DESARNAUD

7.1. Introduction. . . . .	181
7.2. Interaction sels-eau . . . . .	182
7.2.1. La cristallisation. . . . .	182
7.2.2. La dissolution . . . . .	184
7.2.3. L'hygroscopicité et la déliquescence . . . . .	185

7.2.4. L'interaction sels-eau-matériau . . . . .	186
7.3. Les sels dans le patrimoine. . . . .	188
7.3.1. Nature et origine des sels . . . . .	188
7.3.2. Ascension et répartition des sels dans les maçonneries . . . . .	191
7.3.3. Mécanismes d'altération. . . . .	192
7.4. Le traitement des objets/monuments contaminés par les sels . . . . .	196
7.4.1. Stabilisation des conditions environnementales . . . . .	197
7.4.2. Extraction des sels . . . . .	198
7.5. Conclusion . . . . .	201
7.6. Remerciements. . . . .	202
7.7. Bibliographie. . . . .	202

## **Chapitre 8. La cristallisation de sels dans un environnement changeant . . . . . 207**

Beatriz MENÉNDEZ

8.1. Introduction. . . . .	207
8.2. Cristallisation/dissolution et changement de phase des sels en fonction des conditions environnementales . . . . .	209
8.2.1. Comportement des sels simples. . . . .	210
8.2.2. Comportement des sels complexes. . . . .	213
8.2.3. Modélisation de la cristallisation de sels complexes . . . . .	221
8.2.4. Limites des modèles . . . . .	225
8.3. Changement des conditions environnementales . . . . .	226
8.3.1. La pollution atmosphérique . . . . .	227
8.3.2. Le climat . . . . .	232
8.4. Estimation de la dégradation future des matériaux par les sels. . . . .	235
8.4.1. Méthodes utilisées . . . . .	235
8.4.2. Limitations des méthodes utilisées. . . . .	238
8.5. Conclusion . . . . .	242
8.6. Bibliographie. . . . .	243

## **Liste des auteurs. . . . . 249**

## **Index . . . . . 251**