

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	1
<b>Partie 1. Théorie, principes et méthodologie</b> . . . . .	5
<b>Chapitre 1. Missions spatiales passées, en cours et à venir</b> . . . . .	7
Philippe DURAND et Stéphane MAY	
1.1. Points cruciaux dans une mission spatiale . . . . .	7
1.1.1. Paramètres pour les missions d'imagerie optique et SAR . . . . .	7
1.1.2. Paramètres spécifiques aux missions SAR . . . . .	11
1.1.3. Paramètres spécifiques aux missions d'imagerie optique . . . . .	14
1.2. Missions SAR passées et en cours . . . . .	18
1.2.1. ERS-1, ERS-2 et Envisat . . . . .	19
1.2.2. Satellites canadiens en bande C : Radarsat-1, Radarsat-2 et RCM . . . . .	21
1.2.3. Satellites japonais en bande L : JERS-1, ALOS et ALOS-2 . . . . .	23
1.2.4. SRTM et X-SAR . . . . .	24
1.2.5. TerraSAR-X, TanDEM-X et PAZ . . . . .	25
1.2.6. Constellations COSMO SkyMed . . . . .	26
1.2.7. SAOCOM1 . . . . .	26

1.2.8. Sentinel-1 . . . . .	27
1.2.9. ICEYE . . . . .	28
1.3. Missions SAR futures . . . . .	29
1.3.1. TerraSAR-NG . . . . .	29
1.3.2. ALOS-4 . . . . .	29
1.3.3. NISAR . . . . .	30
1.3.4. Biomass . . . . .	31
1.3.5. ROSE-L . . . . .	31
1.4. Missions d'imagerie optique . . . . .	32
1.4.1. Missions d'imagerie optique passées . . . . .	32
1.4.2. Missions d'imagerie optique en cours . . . . .	34
1.4.3. Missions d'imagerie optique à venir . . . . .	41
1.5. Conclusion . . . . .	42
1.6. Remerciements . . . . .	44
1.7. Bibliographie . . . . .	44
<b>Chapitre 2. Corrélation d'images et capteurs optiques . . . . .</b>	<b>47</b>
Marc PIERROT DESEILLIGNY et Ewelina RUPNIK	
2.1. Introduction, définition et applications . . . . .	47
2.1.1. Définition du problème . . . . .	48
2.1.2. Géométrie de l'appariement . . . . .	48
2.1.3. Hypothèses radiométriques et géométriques . . . . .	49
2.2. Mise en correspondance de fenêtres . . . . .	50
2.2.1. Mise en correspondance par mesure de similarité . . . . .	50
2.2.2. Approche simple . . . . .	50
2.2.3. Approche normalisée . . . . .	50
2.3. Traitement des grandes déformations . . . . .	56
2.3.1. Introduction . . . . .	56
2.3.2. Approche de filtrage et régularisation <i>a posteriori</i> . . . . .	56
2.3.3. Approche multirésolution . . . . .	59
2.4. Le caractère discret de l'image et la corrélation sous-pixellaire . . . . .	60
2.5. Capteurs d'imagerie optique . . . . .	61
2.5.1. Géométrie des capteurs . . . . .	61
2.5.2. Orientation du capteur en 3D . . . . .	62
2.6. Remerciements . . . . .	68
2.7. Bibliographie . . . . .	69

### **Chapitre 3. Mesure de déplacement par corrélation d’images SAR . . . . . 73**

Silvan LEINSS, Shiyi LI, Yajing YAN et Bas ALTENA

3.1. Les bases de l’imagerie SAR . . . . .	73
3.1.1. Géométrie d’imagerie et résolution des systèmes SAR . . . . .	73
3.1.2. Chatolement radar et réduction du chatolement par moyennage multivue . . . . .	78
3.1.3. Support spectral de l’intensité de rétrodiffusion . . . . .	81
3.1.4. Décalages dus à la pénétration du radar . . . . .	82
3.2. Corrélation d’images SAR . . . . .	82
3.2.1. Corrélation croisée . . . . .	83
3.2.2. Mesure de déplacement entre paires d’images SAR . . . . .	86
3.2.3. Mesure de déplacement par corrélation de séries d’images . . . . .	90
3.2.4. Mesure de déplacement à partir d’orbites simples et multiples . . . . .	96
3.3. Conclusion . . . . .	100
3.4. Remerciements . . . . .	100
3.5. Bibliographie . . . . .	101

### **Chapitre 4. Interférométrie SAR : principes et traitement . . . . . 105**

Philippe DURAND, Nadine POURTHIÉ, Céline TISON et Giorgio GOMBA

4.1. Introduction . . . . .	105
4.2. Principes et limites de l’interférométrie SAR . . . . .	106
4.2.1. Informations géométriques . . . . .	107
4.2.2. Comment choisir une paire interférométrique ? . . . . .	112
4.2.3. Estimation de phase et de cohérence . . . . .	114
4.2.4. Perte de cohérence : plusieurs raisons . . . . .	116
4.2.5. Autres limites de l’InSAR . . . . .	118
4.3. Corrections atmosphériques . . . . .	119
4.3.1. Compensation des retards troposphériques . . . . .	119
4.3.2. Estimation et compensation des retards de propagation ionosphérique . . . . .	125
4.4. Chaîne de traitement InSAR . . . . .	127
4.4.1. Étapes principales dans le traitement InSAR . . . . .	128
4.4.2. Illustration de la chaîne de traitement DInSAR : une étude de cas avec DiapOTB . . . . .	131
4.4.3. Aperçu de logiciels InSAR disponibles . . . . .	138
4.5. Conclusion . . . . .	140
4.6. Remerciements . . . . .	141
4.7. Bibliographie . . . . .	141

**Chapitre 5. Méthodes avancées pour les séries temporelles****InSAR** . . . . . 145

Dinh HO TONG MINH, Ramon HANSEN, Marie-Pierre DOIN

et Erwan PATHIER

5.1. Introduction . . . . .	145
5.2. Contexte de l'analyse en série temporelle InSAR . . . . .	148
5.3. Une revue . . . . .	149
5.3.1. Méthodes par petites lignes de base pour l'analyse en série temporelle . . . . .	149
5.3.2. Des PS aux PSDS . . . . .	152
5.4. La technique SBAS . . . . .	154
5.4.1. Principe et définition d'un réseau d'interférogrammes à petites lignes de base . . . . .	154
5.4.2. Moyennage multivue et filtrage, corrections d'erreurs atmosphériques ou de MNT et déroulement . . . . .	157
5.4.3. Calcul de la série temporelle . . . . .	160
5.4.4. Séparation de sources, atmosphère contre déformation . . . . .	163
5.5. La technique PSDS . . . . .	165
5.5.1. Algorithme PS . . . . .	165
5.5.2. Sélection des PS . . . . .	166
5.5.3. Sélection des DS . . . . .	168
5.5.4. Liaison de phase . . . . .	169
5.5.5. Outils prenant en charge les traitements PS et PSDS . . . . .	170
5.6. Contributions des auteurs . . . . .	171
5.7. Remerciements . . . . .	171
5.8. Bibliographie . . . . .	171

**Chapitre 6. La phase interférométrique : déroulement de phase  
et fermeture temporelle** . . . . . 179

Béatrice PINEL-PUYSSÉGUR, Francesco DE ZAN et Johann CHAMPENOIS

6.1. Introduction . . . . .	179
6.2. Algorithmes de déroulement de phase et limitation des erreurs de déroulement de phase . . . . .	181
6.2.1. Le problème du déroulement de phase et quelques prérequis . . .	181
6.2.2. Un rapide historique des méthodes de déroulement en InSAR . .	186
6.2.3. Algorithme de l'arbre de coupure entre résidus, variantes et généralisation 3D . . . . .	186
6.2.4. Méthode des moindres carrés . . . . .	190
6.2.5. Approches utilisant les graphes . . . . .	192
6.2.6. Méthodes de correction des erreurs de déroulement . . . . .	199

6.2.7. Résumé et comparatif . . . . .	202
6.3. La (re)découverte des phases de fermeture et leurs implications dans l'interférométrie SAR . . . . .	203
6.3.1. Introduction aux phases de fermeture . . . . .	203
6.3.2. Propriétés mathématiques des phases de fermeture . . . . .	205
6.3.3. Phases de non-fermetures physiques . . . . .	207
6.3.4. Implications pour l'estimation de la phase interférométrique . . . . .	213
6.4. Remerciements . . . . .	215
6.5. Bibliographie . . . . .	216

## **Partie 2. Applications aux déformations de surface . . . . . 219**

### **Chapitre 7. Télédétection des déformations du cycle sismique . . . 221**

Mathilde MARCHANDON, Tim J. WRIGHT et James HOLLINGSWORTH

7.1. Introduction . . . . .	221
7.2. Apport de trente ans d'InSAR tectonique sur notre compréhension des failles . . . . .	223
7.2.1. Déformation cosismique . . . . .	224
7.2.2. Déformation intersismique . . . . .	231
7.2.3. Déformation post-sismique et déformation transitoire asismique . . . . .	236
7.3. Étude des ruptures de surface des séismes par corrélation d'images optiques . . . . .	241
7.3.1. Un historique de la technique de corrélation optique pour l'étude des séismes . . . . .	241
7.3.2. Mesure des déplacements de surface des séismes à partir d'images optiques : méthodologie . . . . .	242
7.3.3. Exemples de champs de déplacement proches de la faille provenant de séismes récents et historiques . . . . .	249
7.3.4. Apports de la corrélation d'images optiques pour l'étude des séismes . . . . .	254
7.4. Conclusion . . . . .	262
7.5. Remerciements . . . . .	265
7.6. Bibliographie . . . . .	265

### **Chapitre 8. La contribution essentielle des mesures spatiales du déplacement de surface à la compréhension et à la surveillance des volcans . . . . . 281**

Virginie PINEL, Fabien ALBINO, Grace BATO et Paul LUNDGREN

8.1. Introduction . . . . .	281
-----------------------------	-----

8.2. Origine du déplacement de surface et des variations de topographie sur un volcan . . . . .	282
8.2.1. Déformations typiques d'un système basaltique . . . . .	285
8.2.2. Déformations typiques d'un stratovolcan andésitique . . . . .	286
8.3. Différentes techniques de mesure de déplacements et de variations de topographie utilisées sur les volcans . . . . .	286
8.3.1. Mesure par décalage de pixels ( <i>pixel offset tracking</i> ) . . . . .	290
8.3.2. Mesure par interférométrie (différence de phase) . . . . .	291
8.3.3. Mesure par différence de modèles numériques de terrain . . . . .	292
8.4. Principales limitations des mesures par télédétection . . . . .	294
8.4.1. La résolution temporelle . . . . .	294
8.4.2. La couverture nuageuse pour l'imagerie optique . . . . .	295
8.4.3. Les artefacts atmosphériques pour l'imagerie radar . . . . .	295
8.5. Principaux apports de la géodésie spatiale pour la surveillance et la compréhension des volcans . . . . .	296
8.5.1. Vers des études globales et statistiques . . . . .	296
8.5.2. Une meilleure connaissance du système d'alimentation en magma . . . . .	297
8.5.3. Croissance et stabilité des édifices volcaniques . . . . .	297
8.6. Avancées récentes . . . . .	297
8.6.1. Intégration de l'imagerie satellitaire et des données de terrain . . . . .	297
8.6.2. Automatisation des chaînes de traitement pour une détection en temps réel . . . . .	298
8.6.3. Intégration de toutes les sources satellitaires dans des études multiparamètres . . . . .	300
8.7. Apport de la mesure de déplacement par imagerie spatiale pour la gestion de crises volcaniques . . . . .	300
8.7.1. Piton de la Fournaise, île de La Réunion : le bénéfice additionnel de l'imagerie spatiale pour un volcan très actif et bien surveillé . . . . .	301
8.7.2. Agung, Indonésie : enjeux et défis de l'utilisation en temps réel des données InSAR lors d'une gestion de crise . . . . .	302
8.7.3. Taal, Philippines : une information essentielle et inédite apportée par l'InSAR en temps réel . . . . .	304
8.8. Conclusion . . . . .	307
8.9. Remerciements . . . . .	307
8.10. Bibliographie . . . . .	307

## **Chapitre 9. Activités anthropiques : surveillance des déplacements de surface liés aux activités humaines par interférométrie radar spatiale . . . . . 319**

Bénédicte FRUNEAU, Dinh HO TONG MINH et Daniel RAUCOULES

9.1. Introduction . . . . .	319
9.2. Caractéristiques des phénomènes de subsidence et de soulèvement associés à l'activité humaine . . . . .	321
9.2.1. Activités souterraines . . . . .	321
9.2.2. Cavités . . . . .	322
9.2.3. Pertinence des techniques SAR interférométriques . . . . .	322
9.2.4. Propriétés optimales des données SAR pour la surveillance des activités anthropiques . . . . .	324
9.3. Applications dans le domaine des activités urbaines souterraines . . . . .	326
9.3.1. Travaux de construction souterraine en milieu urbain . . . . .	326
9.3.2. Extraction des eaux souterraines urbaines . . . . .	328
9.4. Applications dans le domaine de l'extraction minière . . . . .	337
9.4.1. Extraction/injection de saumure, de gaz et de pétrole . . . . .	337
9.4.2. Activités minières . . . . .	343
9.5. Conclusion . . . . .	346
9.6. Remerciements . . . . .	346
9.7. Bibliographie . . . . .	346

## **Chapitre 10. Mesure de la cinématique des mouvements de terrain lents à partir d'images satellites . . . . . 353**

Pascal LACROIX, Benedetta DINI et Aya CHEAIB

10.1. Introduction . . . . .	353
10.2. Corrélation d'images appliquée aux images optiques par satellite . . . . .	355
10.2.1. Détection des mouvements de terrain par télédétection optique . . . . .	359
10.2.2. Caractérisation des mouvements de terrain par télédétection optique . . . . .	360
10.2.3. Suivi des mouvements de terrain par télédétection optique . . . . .	361
10.3. Corrélation des images SAR appliquée aux mouvements de terrain . . . . .	362
10.4. InSAR pour l'étude des mouvements de terrain . . . . .	364
10.4.1. Analyses InSAR standards et multitemporelles . . . . .	366
10.4.2. Limites de l'utilisation de l'interférométrie SAR pour les mouvements de terrain . . . . .	368
10.4.3. Détection des mouvements de terrain avec l'InSAR . . . . .	369
10.4.4. Caractérisation des mouvements de terrain avec l'InSAR . . . . .	370
10.4.5. Suivi des mouvements de terrain avec l'InSAR . . . . .	371

10.5. Conclusion . . . . .	373
10.6. Bibliographie . . . . .	374

**Chapitre 11. Mesure de l'écoulement des glaciers par imagerie satellitaire . . . . .**

**381**

Amaury DEHECQ, Bas ALTENA, Alex S. GARDNER, Emmanuel TROUVÉ et Silvan LEINSS

11.1. Introduction . . . . .	381
11.2. Écoulement des glaciers . . . . .	384
11.2.1. Phénomènes physiques intervenant dans l'écoulement glaciaire . . . . .	384
11.2.2. Échelles et processus des déplacements en glaciologie . . . . .	385
11.3. Mesure du déplacement des glaciers à partir de données satellitaires . . . . .	386
11.3.1. Prétraitement des images . . . . .	386
11.3.2. Algorithmes de suivi des décalages . . . . .	388
11.3.3. InSAR . . . . .	392
11.3.4. Filtrage et corrections des champs de déplacement . . . . .	395
11.3.5. Travailler avec des séries temporelles . . . . .	399
11.3.6. Résumé des avantages et des inconvénients des différentes méthodes . . . . .	402
11.4. Quelles informations tirer de l'écoulement des glaciers ? . . . . .	402
11.4.1. D'un point de vue topologique . . . . .	403
11.4.2. D'un point de vue climatologique . . . . .	403
11.4.3. D'un point de vue mécanique . . . . .	404
11.4.4. D'un point de vue hydrologique . . . . .	405
11.4.5. D'un point de vue géomorphologique . . . . .	405
11.4.6. D'un point de vue du risque . . . . .	406
11.5. Perspectives et directions futures . . . . .	406
11.5.1. Quelles informations tirer des prochaines missions satellitaires ? . . . . .	406
11.5.2. Quels futurs capteurs pour la glaciologie ? . . . . .	408
11.6. Remerciements . . . . .	409
11.7. Bibliographie . . . . .	409

**Chapitre 12. Nouvelles applications en corrélation croisée d'images spatiales optiques : modèles numériques d'élévation de nuages volcaniques et de bathymétrie depuis l'espace . . . . .**

**419**

Marcello DE MICHELE et Daniel RAUCOULES

12.1. Introduction . . . . .	419
12.2. Modèles numériques d'élévation des nuages de cendres volcaniques . . . . .	420

---

12.2.1. Peut-on mesurer précisément la hauteur d'un nuage de cendres volcaniques et quel processus physique contrôle la hauteur d'injection et la vitesse d'un panache de cendres volcaniques ? . . . . .	420
12.2.2. Principes . . . . .	421
12.2.3. Applications . . . . .	425
12.3. Bathymétrie à faible profondeur : mesure des caractéristiques des vagues depuis l'espace . . . . .	429
12.3.1. Peut-on cartographier le mouvement des failles tectoniques sous les eaux peu profondes et peut-on mesurer la bathymétrie différentielle ? . . . . .	429
12.3.2. Principes . . . . .	430
12.3.3. Applications . . . . .	434
12.4. Conclusion . . . . .	434
12.5. Remerciements . . . . .	436
12.6. Bibliographie . . . . .	437
<b>Liste des auteurs . . . . .</b>	<b>441</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>445</b>