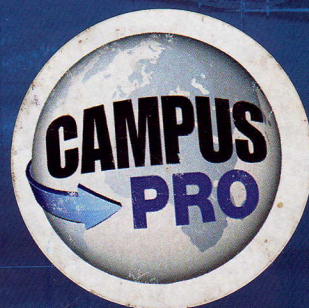


SÉRIE | ENVIRONNEMENT ET SÉCURITÉ

Michel-Claude Girard
Colette M. Girard



T RAITEMENT DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION

Environnement et ressources naturelles



2^e édition

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

III

Avant-propos

V

A

Les sources de données

1 • Les bases physiques

3

1.1 Le rayonnement

3

1.2 Grandeurs des sources et récepteurs

5

1.3 Le facteur de réflectance

8

1.4 Le rayonnement solaire et les perturbations atmosphériques

9

1.4.1 L'absorption atmosphérique

10

1.4.2 La diffusion atmosphérique

11

1.4.3 Le rayonnement atmosphérique

11

1.5 Les mesures satellitales dans l'infrarouge moyen

12

1.5.1 Les principaux phénomènes physiques

12

1.5.2 L'équation de transfert radiatif dans l'infrarouge

13

1.5.3 Détermination de la température de surface

15

1.5.4 Principe des sondeurs atmosphériques

16

1.5.5 Bilan de rayonnement au sommet de l'atmosphère

17

1.5.6 Bilan de rayonnement à la surface

19

1.5.7 Interactions des nuages sur le rayonnement infrarouge

19

1.5.8 Interaction de la vapeur d'eau sur le rayonnement

20

VII

1.6 Les principes des méthodes de télédétection hyperfréquences	21
1.6.1 Les lois particulières aux hyperfréquences	21
1.6.2 Les bandes de fréquences	22
1.6.3 La polarisation	22
1.6.4 L'effet Doppler	23
1.6.5 Le signal rétrodiffusé	23
1.6.6 L'équation du radar	23
1.6.7 Les paramètres logistiques	24
1.6.8 La décomposition des processus physiques de la rétrodiffusion	26
1.7 Conclusion générale	32
Bibliographie	32
2 • Les systèmes capteurs-vecteurs	35
2.1 Les capteurs	35
2.1.1 Schéma général	36
2.1.2 Les systèmes recevant le rayonnement	37
2.1.3 Les bandes spectrales	39
2.1.4 Les systèmes aéroportés	42
2.2 Les vecteurs	42
2.2.1 Les lois générales de l'orbitologie	43
2.2.2 Les orbites	44
2.2.3 Le système SPOT	47
2.3 Les autres systèmes	49
2.3.1 MEtEosat	49
2.3.2 NOAA	51
2.3.3 Les systèmes à capteurs thermiques	52
2.3.4 Landsat	52
2.3.5 Les autres satellites héliosynchrones	53
Conclusion	55
Bibliographie	58

B

Interprétation physique des données

3 • La composition des couleurs

3.1 L'œil et la couleur

3.1.1 La vision

3.1.2 La sensibilité

3.1.3 Les contrastes

3.2 Le système Rouge, Vert, Bleu

3.3 La représentation cubique

3.3.1 Le système additif

3.3.2 Le système soustractif

3.4 Le triangle de la Commission internationale de l'éclairiment

3.5 Le système Munsell

3.6 Le métamérisme

3.7 La couleur en photographie

3.7.1 Le principe des émulsions

3.7.2 Le panchromatique et l'infrarouge

3.7.3 La couleur

3.7.4 L'infrarouge couleur

3.8 Le traitement des couleurs sur écran couleur

3.8.1 Les couleurs sur l'écran

3.8.2 L'affichage d'une couleur

3.9 L'utilisation des couleurs en traitement d'image

3.9.1 Le codage coloré d'une image (8 bits)

3.9.2 L'interprétation d'un codage 3 fois 8 bits

3.9.3 Le choix des couleurs

3.9.4 L'impression en couleur des documents

3.10 Conclusion

Bibliographie

4 • Les comportements spectraux

4.1 La végétation

4.1.1 Au laboratoire

4.1.2 Au champ

61

61

61

61

62

62

64

64

64

65

66

68

68

68

68

69

70

71

72

72

72

73

73

73

74

75

75

75

77

77

78

85

IX

4.2 Les sols	88
4.3 Les indices de végétation	90
4.3.1 L'identification des couverts végétaux	90
4.3.2 L'évaluation des paramètres du couvert	91
4.3.3 L'utilisation du « faisceau des sols »	92
4.3.4 Les différents indices de végétation	92
4.4 L'eau	94
4.4.1 Domaine du visible et de l'infrarouge proche	94
4.4.2 Domaine de l'infrarouge thermique	98
4.5 La neige et la glace	99
Bibliographie	100

C

Traitement et interprétation

5 • L'interprétation visuelle des photographies et des images	107
5.1 L'interprétation par l'homme	107
5.1.1 L'œil	107
5.1.2 L'interprétation par le cerveau	107
5.1.3 La démarche d'interprétation	109
5.2 L'interprétation des photographies aériennes	109
5.2.1 Les lignes et les points	110
5.2.2 Les surfaces fermées	116
5.2.3 Retrouver des thèmes	119
5.2.4 Les terroirs	120
5.2.5 Conclusion	120
5.3 L'interprétation visuelle des images satellitales	121
5.3.1 L'interprétation sur tirage photographique	121
5.3.2 L'interprétation sur écran	122
5.3.3 La vision stéréoscopique avec les images satellitales	123
5.4 Conclusion	124
Bibliographie	125

6 • Le traitement d'images Généralités	127
6.1 Introduction	127
6.2 Les méthodes de traitement d'images	128
6.2.1 La texture	129
6.2.2 La structure	129
6.3 Les classifications	129
6.3.1 Les multiples langages	129
6.3.2 Segmentation et classification	130
6.3.3 Classification et classement	130
6.3.4 Méthode ascendante et méthode descendante	131
6.3.5 La notion de distance mathématique	132
6.3.6 L'utilisation des distances pour les classifications	133
6.4 Conclusion	136
7 • Les traitements de base	137
7.1 Les traitements applicables à un canal	137
7.1.1 Analyse d'un histogramme	137
7.1.2 Les transformations des comptes numériques	139
7.2 Les traitements applicables à plusieurs canaux	144
7.2.1 Comparaison entre les couleurs et les comportements spectraux des objets	144
7.2.2 Choix des combinaisons de canaux	145
7.2.3 Histogrammes bidimensionnels ou tridimensionnels	147
7.2.4 La segmentation de l'histogramme	151
7.2.5 La combinaison arithmétique de canaux	151
7.2.6 L'analyse statistique des canaux	154
7.2.7 L'analyse en composantes principales	155
7.3 Les masques	159
7.3.1 Le masquage radiométrique	160
7.3.2 Le masquage géographique	160
7.3.3 Le masquage logique	161
7.4 Conclusion	162

8 • Les classifications non assistées	163
8.1 La classification ascendante hiérarchique	163
8.1.1 Principes	163
8.1.2 Groupes et légende	164
8.2 Exemple sur l'image de Brienne	167
8.2.1 Interprétation statistique	167
8.2.2 Interprétation numérique	170
8.2.3 Interprétation spatiale	173
8.2.4 Interprétation générale	176
8.2.5 Analyse de la qualité de la classification	180
8.2.6 Réponse aux buts fixés	180
8.2.7 Conclusion	183
8.3 La classification par centres mobiles	183
8.3.1 Principe	183
8.3.2 Méthode d'interprétation	184
8.3.3 Comparaison avec la classification ascendante hiérarchique	187
8.3.4 Conclusion	188
9 • Les classifications assistées	189
9.1 La classification hypercube	189
9.1.1 La segmentation de l'hyperplan radiométrique	189
9.1.2 La segmentation monocal	190
9.1.3 La segmentation multicanal	192
9.1.4 La segmentation chorologique	194
9.1.5 Les comportements numériques des divers groupes	195
9.1.6 Statistique des divers groupes	196
9.1.7 Les interprétations visuelles	197
9.1.8 Qualité de la classification par hypercube	198
9.1.9 Conclusion	198
9.2 La classification par maximum de vraisemblance	198
9.2.1 Le comportement spectral probabilisé	198
9.2.2 Principes de la classification	199
9.2.3 Le seuil de rejet	200
9.2.4 Mise en œuvre de la classification	201
9.2.5 Les itérations : une démarche heuristique	208
9.2.6 Appréciation de la qualité de la classification	210
9.2.7 Conclusion	211

10 • Méthodologie pour les traitements d'images de télédétection	212
10.1 Les objectifs	212
10.2 Méthode	212
10.2.1 Les entrées	213
10.2.2 Le traitement	213
10.2.3 Les sorties	214
10.3 Les démarches	216
10.3.1 L'initialisation	216
10.3.2 La corrélation	216
10.3.3 La vérification	216
10.3.4 La modélisation	216
10.4 L'interprétation des traitements	217
10.4.1 L'approche radiométrique	217
10.4.2 L'approche chorologique	217
Bibliographie	217
11 • Le traitement structural des images satellitales	219
11.1 Introduction	219
11.1.1 Limites et mixels	219
11.1.2 Classification et cartographie	219
11.1.3 Unités cartographiques complexes	220
11.2 VOISIN	220
11.2.1 Voisinage dans une fenêtre : le vecteur composition	220
11.2.2 Méthode	221
11.2.3 Exemple	222
11.3 OASIS	224
11.3.1 Méthode	224
11.3.2 Exemple	227
Bibliographie	233
12 • Le filtrage numérique des images	235
12.1 Le filtrage linéaire	235
12.1.1 L'image vue comme un signal bidimensionnel	235
12.1.2 Les systèmes de traitement des signaux : produit de convolution	239
12.1.3 Le filtrage spatial	241

12.2 Le filtrage non linéaire	243
12.2.1 Le filtrage d'ordre : médiane	243
12.2.2 Le filtrage morphologique	244
12.2.3 Le filtrage homomorphique	247
12.2.4 Le filtrage adaptatif	247
12.3 La réduction du bruit pour le prétraitement... des images	248
12.3.1 Le bruit dans les images	248
12.3.2 Les filtrages linéaires et non linéaires pour la réduction de bruit	248
12.4 L'extraction de contours	249
12.4.1 Le modèle de contour	250
12.4.2 L'extraction des contours par filtrages différentiels	251
12.4.3 L'extraction des contours par d'autres filtrages	253
12.4.4 La fermeture des contours	255
12.4.5 Autres méthodes d'extraction de contours	256
12.4.6 Estimation des performances des opérateurs de détection de contour	258
12.5 Conclusion	259
Bibliographie	260
13 • Transformations géométriques des images de télédétection	261
13.1 Les méthodes de correction géométrique des images	261
13.1.1 Origine des déformations géométriques	261
13.1.2 Méthodes paramétriques et interpolatrices	261
13.1.3 Modélisation globale ou locale des méthodes interpolatrices	262
13.1.4 Transformation directe et transformation inverse	262
13.1.5 Interpolations dans les transformations géométriques	263
13.2 Les méthodes interpolatrices	263
13.2.1 L'interpolation radiométrique	263
13.2.2 L'interpolation géométrique	265
13.2.3 Conclusion sur l'utilisation des méthodes interpolatrices	273
13.3 Mise en œuvre de la rectification des images de télédétection	273
13.3.1 Problématique générale	273
13.3.2 Les systèmes et les données utilisés pour la rectification	273
13.3.3 La mise en place du modèle de rectification	277
13.3.4 Conclusion	281
Bibliographie	282

14 • Éléments de base sur les photographies aériennes	283
14.1 La prise de vues	283
14.1.1 Les capteurs photographiques	283
14.1.2 Les différents types de photographies aériennes	286
14.1.3 Les missions régulières	289
14.1.4 Organisation et recouvrement des photographies aériennes	290
14.1.5 Exemple d'un plan de vol	293
14.2 La stéréoscopie	293
14.2.1 Généralités	293
14.2.2 La vision stéréoscopique	294
14.2.3 Les stéréoscopes	296
14.2.4 Anaglyphes et vertographes	298
14.3 La photogrammétrie	298
14.3.1 L'orientation des photographies	298
14.3.2 La mise en place d'un couple stéréoscopique	299
14.3.3 L'échelle d'une photographie	299
14.3.4 L'assemblage de photographies aériennes : les mosaïques	302
14.3.5 Les déformations radiales	303
14.3.6 La parallaxe et la détermination des altitudes	304
14.3.7 La stéréo-restitution – Orthophotoplans	305
14.3.8 Éléments d'histoire de la photographie aérienne	306
14.4 Conclusion	308
Bibliographie	308

D

Évaluation de la qualité

15 • Les changements d'échelle	311
15.1 Introduction	311
15.2 Échelle et organisation des milieux	311
15.3 Aspects spécifiques à la télédétection	314
15.3.1 Les résolutions	314
15.3.2 Adéquation entre niveaux d'observation et niveaux d'organisation : segmentation de l'image	314

15.4 Décomposition du pixel en ses éléments constitutifs ou démarche descendante	316
15.5 Agrégation de pixels ou démarche ascendante	320
Bibliographie	321
16 • Les critères de choix pour l'utilisateur	322
16.1 Quelles données choisir ?	322
16.1.1 Quelle est la question posée, le problème à résoudre ?	322
16.1.2 Les données de télédétection sont-elles aptes à répondre ?	322
16.1.3 Quelles sont les conditions d'acquisition des données les plus susceptibles d'apporter une réponse ?	322
16.1.4 Existe-t-il des données de télédétection disponibles répondant aux conditions définies ci-dessus, en relation avec la question posée ?	323
16.2 Les critères de choix des données de télédétection	323
16.2.1 Le choix des résolutions spectrales et géométriques	323
16.2.2 Le choix de la date d'acquisition	323
16.2.3 Le choix des canaux	325
16.3 Le choix du type de traitement	326
16.3.1 Interprétation visuelle ou interprétation automatique des données	326
16.3.2 Conseils lors de l'emploi de classifications numériques	327
16.4 Conclusion	329
17 • La qualité d'une interprétation	330
17.1 Introduction	330
17.2 La qualité géométrique	331
17.2.1 La précision de position	331
17.2.2 La précision de forme	332
17.2.3 La fiabilité	332
17.3 La qualité sémantique	332
17.3.1 Définition	332
17.3.2 Établissement de la typologie	333
17.3.3 Établissement d'une matrice de confusion	334
17.3.4 Discussion d'une matrice de confusion	337
17.3.5 Limitations des méthodes traditionnelles d'évaluation de la précision	340
17.4 Conclusion	340
Bibliographie	341

E

Applications

18 • Les agropayages	345
18.1 L'interprétation paysagique	345
18.1.1 Le concept de paysage	345
18.1.2 Le paysage : descripteur synthétique en télédétection	346
18.1.3 L'agropaysage	346
18.2 Pratique de l'analyse du paysage	347
18.2.1 Les différents points de vue	347
18.2.2 Les composantes principales des paysages	348
18.2.3 Fiche de description et statistiques	353
18.3 Un exemple : les agropayages de l'Yonne	354
18.3.1 L'élaboration de la méthode de description	355
18.3.2 La mise en œuvre de l'interprétation : tracé et description des plages	359
18.3.3 L'évaluation de l'interprétation visuelle	360
18.3.4 La classification des plages cartographiques : les unités d'agropaysage	361
18.3.5 La validation	361
18.4 Autres exemples	362
18.4.1 Le pays d'Auge	362
18.4.2 Le département du Rhône	362
18.4.3 Le département de l'Aube	363
18.4.4 La région Champagne-Ardenne	363
18.4.5 Les agropayages et les petites régions agricoles	363
18.5 Conclusion	363
Bibliographie	364
19 • CORINE Land Cover (occupation des terres)	365
19.1 La cartographie CORINE Land Cover	365
19.1.1 La cartographie CORINE Land Cover	365
19.1.2 Les cartographies existantes	368
19.1.3 Recommandations d'emploi des données CORINE Land Cover	368

19.2 Exemple de cartographie automatique	371
19.2.1 Traitements des données et discussion des résultats	372
19.2.2 L'évaluation des résultats	375
19.3 Conclusion	378
Bibliographie	378
20 • Formations herbacées et prairies permanentes	379
20.1 Les différentes formations herbacées terrestres	379
20.2 Problématique	382
20.3 Applications	383
20.3.1 Étude de la distribution des formations herbacées et des prairies permanentes	383
20.3.2 Identification d'espèces et de groupements végétaux	384
20.3.3 Cartographie d'unités et évaluation des surfaces	387
20.3.4 Évaluation de la quantité de phytomasse aérienne	388
20.3.5 Appréciation de la qualité de la phytomasse	390
20.3.6 Suivi et prévision de l'évolution des groupements végétaux	392
20.4 Conclusion	393
Bibliographie	394
21 • Les zones humides	395
21.1 Nature et intérêt des zones humides	395
21.2 Délimitation du contour des zones humides par télédétection	396
21.2.1 Les marais	396
21.2.2 Les prairies inondables et humides	397
21.3 Classification et cartographie d'unités de zones humides	401
21.3.1 La cartographie à un niveau national et régional	401
21.3.2 La cartographie à un niveau local	404
21.4 Étude de la dynamique des communautés végétales	407
21.5 Conclusion	407
Bibliographie	408
22 • Estimation des récoltes	409
22.1 Les enjeux économiques	409

22.2 L'utilisation opérationnelle de la télédétection spatiale	410
22.3 L'estimation des surfaces par télédétection en Europe	410
22.4 Les modèles agrométéorologiques de prévision des rendements	413
22.4.1 Généralités sur les méthodes de prévision des rendements	413
22.4.2 Méthode MARS ou modèle CGMS	413
22.4.3 La télédétection comme complément aux modèles	414
22.4.4 Perspectives	415
22.5 Conclusion	415
Bibliographie	416
23 • La pédologie	417
23.1 Introduction	417
23.2 Caractérisation spectrale des sols	418
23.2.1 Spectres et états de surface de sols	418
23.2.2 Paramètres physiques spectralement influents	422
23.2.3 Paramètres chimiques influant sur la réflectance	425
23.2.4 Analyse multifactorielle	434
23.3 Télédétection et cartographie des sols	438
23.3.1 Interprétation pédopaysagère	439
23.3.2 Cartographie numérique des sols	442
23.3.3 Cartographie des propriétés de sols	444
23.4 Conclusion	447
Bibliographie	448
24 • La géologie minière	452
24.1 Métallogénie et types de gisements	452
24.1.1 Les modèles de gisements	452
24.1.2 Un exemple : les types de gisements uranifères français	453
24.1.3 Métallogénie régionale et provinces métallifères	454
24.1.4 Le métallotecte : un concept opérationnel	455
24.2 L'approche multiscalaire en prospection minière	455
24.2.1 Schéma d'exploitation structurale multiscalaire dans la télédétection des gisements filoniens	455
24.2.2 Exemple d'exploitation régionale d'une interprétation structurale	456
	XIX

24.3 La télédétection, une méthode indirecte	457
24.3.1 Les propriétés de réflectance	458
24.3.2 L'usage du thermique	461
24.4 Conclusion	464
Bibliographie	465
25 • Traitement des données de télédétection et aménagement du littoral	467
25.1 Introduction : problématique générale	467
25.2 L'observation spatiale des milieux côtiers	468
25.2.1 Les objets du littoral et de la mer côtière	468
25.2.2 Objets littoraux et spécifications des systèmes d'observation aérospatiaux	469
25.3 Les comportements spectraux des objets du littoral	471
25.3.1 Les milieux littoraux intercotidaux et subcotidaux	471
25.3.2 Les cibles minérales du domaine intercotidal (domaine optique)	472
25.3.3 Les cibles végétales du domaine intercotidal (domaine optique)	472
25.3.4 Le domaine subcotidal : le cas des hydrocarbures	476
25.4 Exemples d'applications à l'aménagement des littoraux	477
25.4.1 Application à la cartographie de base en milieu corallien	477
25.4.2 Aménagement aquacole (élevage de crevettes tropicales)	478
25.4.3 Applications à la cartographie thématique des algues	478
25.4.4 Applications à la topo-bathymétrie fine des espaces d'interface entre terre et mer : le Lidar	479
25.4.5 Application à la cartographie rapide de l'impact de catastrophes naturelles	480
25.5 Conclusion, perspectives	484
Bibliographie	485
26 • Exemples d'applications dans l'infrarouge thermique	489
26.1 Exemples d'applications	489
26.1.1 La détection des sécheresses en France	489
26.1.2 L'estimation des flux entre le sol, la végétation et l'atmosphère	491
26.1.3 La cartographie des pluies au Sahel	492
26.1.4 La caractérisation des zones gélives	492
26.1.5 L'analyse des topoclimats à partir des températures de surface	494

26.1.6 Exemples d'applications utilisant la température de surface avec l'indice de végétation	494
26.1.7 Détection et suivi de l'évolution de la température de surface de la mer en environnement littoral	495
26.2 Utilisation de l'infrarouge thermique pour l'étude du climat et son évolution	496
26.2.1 Rayonnement ondes longues sortant au sommet de l'atmosphère	496
26.2.2 Effet des nuages sur le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère	498
26.2.3 Climatologies nuageuses	498
26.2.4 Estimation des précipitations	500
26.2.5 Influence de l'humidité atmosphérique	502
26.2.6 Conclusion	503
Bibliographie	503
 27 • Exemples d'applications dans les hyperfréquences	 506
27.1 Les caractéristiques des radars	506
27.1.1. Domaine spectral des radars imageants	506
27.1.2 Les seuils de sensibilité des systèmes radars	508
27.1.3 Le radar latéral à antenne réelle	508
27.2 La qualité des images	510
27.3 Les domaines d'application des données radar	512
27.3.1 Cartographie, topographie	512
27.3.2 Géologie	514
27.3.3 Océanographie	515
27.3.4 Hydrologie, nivologie	518
27.3.5 Agriculture et forêts	519
27.3.6 Télédétection hyperfréquences des sols	522
27.4 Conclusion	522
Bibliographie	522
 Glossaire	 525
Références générales	531
Liste de sites Internet utiles	537
Index alphabétique	541
Index des images des suppléments en ligne	553

TECHNIQUE ET INGÉNIERIE

Série Environnement et sécurité

Michel-Claude Girard
Colette M. Girard

TRAITEMENT DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION

Environnement et ressources naturelles

Cet ouvrage propose un panorama complet du traitement des données issues des images satellitaires et aéroportées. Il aborde les bases physiques de la télédétection, les capteurs et satellites, et les comportements spectraux des objets et de la couleur, avant de détailler les différents traitements des données de télédétection :

- l'interprétation visuelle et le classement automatique ;
- les traitements textural et structural ;
- la photogrammétrie ;
- la transformation géométrique des images.

L'ouvrage traite également de l'étude de la qualité des images et des critères de choix des données pour l'utilisateur, et présente un large panorama des nombreuses applications de la télédétection (visible, infrarouge, hyperfréquences, CORINE Land Cover, gestion du littoral, etc.).

Cette **seconde édition** apporte des mises à jour sur les satellites d'observation de la Terre, ainsi que de nouveaux éléments sur l'étude des sols (données hyperspectrales, aménagement du littoral et cartographie rapide de l'impact des catastrophes naturelles, étude du climat et de son évolution, interférométrie utilisée pour suivre les déformations du terrain).

Véritable outil de travail, ce livre s'adresse aux professionnels qui utilisent la télédétection et veulent trouver des solutions pour traiter leurs données numériques spatialisées. Il constitue également une référence utile aux chercheurs et étudiants du domaine.

À cet ouvrage est associée sur le site Internet de Dunod une version simple d'un logiciel qui permet de s'initier au traitement des données et qui détaille toutes les méthodes statistiques de référence en suivant pas à pas la démarche explicitée dans l'ouvrage. Il est accompagné de nombreuses illustrations d'images réelles.



2^e édition

MICHEL-CLAUDE GIRARD

Professeur émérite de Pédologie à AgroParisTech, et chercheur, membre de l'Académie d'Agriculture de France.

COLETTE M. GIRARD

Professeur émérite de Géobotanique à AgroParisTech, ancien président de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection, a été expert à l'Union Européenne, et membre du conseil d'administration du Centre International d'Agronomie Tropicale (Colombie).

Les auteurs ont enseigné pendant une quarantaine d'années la télédétection et la cartographie ainsi que la géobotanique et la pédologie. Ils ont publié de très nombreux articles et fait passer diverses thèses en télédétection.

