

A thermal image showing a landscape with a large red and orange area in the center, likely representing a hot object or a fire, surrounded by green and blue areas representing cooler temperatures.

La thermographie infrarouge

4^e édition

*Principes
Technologies
Applications*

Gilbert Gaussorgues

Editions
TEC
& **DOC**

Table des matières

Table des matières	V
Avant-propos	1
Historique	3

Chapitre 1 ■■■■ RAPPELS DE RADIOMÉTRIE

1.1. La chaîne radiométrique.....	6
1.2. Le flux	6
1.3. L'étendue géométrique d'un faisceau	6
1.4. La luminance (anciennement appelée brillance).....	7
1.5. L'éclairement.....	8
1.6. L'existance (anciennement émittance et radiance)	9
1.7. L'intensité d'une source dans une direction donnée	9
1.8. La quantité de rayonnement et la lumination.....	10
1.9. La loi de Bouguer.....	10
1.10. Les diffuseurs de rayonnement	11
1.11. Remarque concernant les unités.....	12

Chapitre 2 ■■■■ LES ORIGINES DU RAYONNEMENT INFRAROUGE

Chapitre 3 ■■■■ L'ÉMISSION THERMIQUE DE LA MATIÈRE

3.1. Le rayonnement du corps noir	18
3.1.1. La loi de PLANCK.....	18
3.1.2. La loi de WIEN.....	21
3.1.3. La loi de STEFAN-BOLTZMANN	22
3.1.4. L'existance du corps noir dans une bande spectrale	22
3.1.5. L'évaluation de l'existance d'un corps noir par la méthode des coordonnées réduites.....	24
3.1.6. La dérivation thermique de la loi de PLANCK.....	29
3.1.7. La notion de contraste thermique	30
3.2. Les divers types de radiateurs	31
3.3. Les problèmes liés à l'émissivité des matériaux	32
3.4. L'équilibre thermodynamique.....	33
3.5. Les problèmes liés à la réflectivité des matériaux	34

3.6. Exemple d'application	38
3.6.1. Calcul de T_e et ϵ_e	41
3.6.2. Calcul de ϵ_0 et T_0	42
3.7. L'émissivité des matériaux	45
3.7.1. L'émissivité spectrale	45
3.7.2. L'émissivité des diélectriques – L'influence de la température	46
3.7.3. L'émissivité des métaux – L'influence de la température	48
3.7.4. L'influence de l'angle d'incidence sur l'émissivité	50
3.7.5. La mesure de l'émissivité	51
3.7.6. L'influence de l'émissivité en thermographie	53
3.7.7. L'émissivité des objets à surface non plane	54
3.7.8. L'émissivité des dièdres ou trièdres	55
3.8. Émission par les couches internes des milieux	57
3.9. Autres sources de rayonnement infrarouge	60
3.9.1. Le filament de NERNST	60
3.9.2. Le globalar	60
3.9.3. Les sources à jonction électroluminescente	60
3.9.4. Les sources par émission stimulée (les lasers)	61

Chapitre 4 ■■■ LA TRANSMISSION ATMOSPHERIQUE

4.1. L'absorption propre par les gaz	72
4.2. Diffusion due aux particules	78
4.3. La turbulence atmosphérique	78
4.3.1. Diffraction par les zones homogènes	81
4.3.2. La fonction de structure	82
4.3.3. La mesure de la turbulence	85
4.4. Les méthodes de calcul de la transmission atmosphérique	86
4.4.1. La méthode « line by line » (ou raies monochromatiques)	87
4.4.2. La méthode du modèle de bande	87
4.4.3. Les méthodes empiriques utilisant des modèles de bande	88
4.4.4. Le modèle multiparamétrique	89
4.5. La description d'une méthode pratique de calcul de la transmission atmosphérique	89
4.5.1. L'absorption moléculaire	90
4.5.2. La diffusion due aux particules	101
4.5.3. Exemple d'application	106

Chapitre 5 ■■■ LES MATÉRIAUX OPTIQUES UTILISÉS EN INFRA-ROUGE

5.1. La propagation d'une onde électromagnétique dans la matière	114
5.2. Les propriétés optiques d'un milieu	120
5.2.1. La réfraction	120

5.2.2. La dispersion.....	120
5.2.3. L'absorption – La transmission – La réflexion	121
5.3. Les propriétés physiques des matériaux optiques	124
5.3.1. La dureté	124
5.3.2. Les propriétés thermiques.....	125
5.3.3. Le prix de revient.....	126
5.4. Les divers types de matériaux	127
5.4.1. Les verres.....	127
5.4.2. Les cristaux.....	127
5.4.3. Les matériaux plastiques	128
5.4.4. Les métaux.....	128
5.5. Propriétés de quelques matériaux optiques	129
5.5.1. Les verres.....	129
5.5.2. Les cristaux.....	135
5.5.3. Les plastiques	145

Chapitre 6 ■ L'OPTIQUE – LA FORMATION DES IMAGES

6.1. L'optique géométrique	148
6.2. Les aberrations des systèmes optiques.....	149
6.2.1. Les aberrations chromatiques	149
6.2.2. Les aberrations géométriques	152
6.3. Le calcul des aberrations géométriques	172
6.3.1. La marche d'un rayon d'ouverture marginal – Imagerie objective	172
6.3.2. La marche du rayon principal de champ – Imagerie pupillaire	175
6.3.3. La marche paraxiale – Approximation de GAUSS	177
6.3.4. L'approximation du troisième ordre.....	180
6.3.5. Le calcul de l'aberration sphérique	180
6.3.6. L'aplanétisme – Relation des sinus d'ABBE	181
6.3.7. Le calcul de la coma	182
6.3.8. Le calcul de l'astigmatisme et de la courbure de champ	183
6.3.9. Calcul de la distorsion	185
6.4. La diffraction.....	186
6.4.1. La diffraction donnée par une pupille.....	186
6.4.2. La formation des images – Théorie du filtre linéaire	191
6.4.3. La fonction de transfert optique.....	194
6.5. Les optiques utilisées en infrarouge.....	201
6.5.1. Les télescopes à miroirs.....	201
6.5.2. Les télescopes catadioptriques.....	209
6.5.3. Évaluation de la tâche image d'aberration des divers systèmes optiques simples.....	209
6.5.4. Les optiques dioptriques.....	213
6.5.5. Calcul d'un objectif constitué par une lentille simple « de meilleure forme » en germanium, fonctionnant à $\lambda = 10 \mu\text{m}$	214

Chapitre 7 ■ LES SYSTÈMES D'ANALYSE SPATIALE

7.1. Les radiomètres	226
7.2. Les radiomètres à analyse spatiale	227
7.3. La thermographie	232
7.4. Les divers types de balayage.....	233
7.4.1. Le balayage d'une ligne (line scanner).....	234
7.4.2. Le balayage d'une image	243
7.5. La restitution de l'image	246
7.6. Les divers modes d'analyse d'une image par détecteurs multiéléments.....	249
7.6.1. Le balayage bidirectionnel par un détecteur unique	249
7.6.2. Le balayage par une barrette de n éléments en parallèle	250
7.6.3. Le balayage par une barrette de p éléments en série	251
7.6.4. L'analyse série – parallèle par une mosaïque bidimensionnelle	252
7.7. L'analyse électronique	253

Chapitre 8 ■ LE FILTRAGE SPECTRAL

8.1. La transmission spectrale des matériaux.....	256
8.2. Les propriétés des couches minces	257
8.3. Les couches minces antiréfléchissantes	260
8.3.1. Le traitement antiréfléchissant à une seule couche	260
8.3.2. Le traitement antiréfléchissant à deux couches	262
8.3.3. Le traitement antiréfléchissant multicouches	263
8.3.4. Exemples de traitements de surfaces destinés à l'amélioration de la transmission des matériaux	263
8.4. Les filtres.....	265
8.4.1. Les divers types de filtres	266
8.4.2. Les diverses technologies de réalisation des filtres	267

Chapitre 9 ■ LES DÉTECTEURS DE RAYONNEMENT

9.1. Généralités	274
9.2. Les caractéristiques des détecteurs	274
9.2.1. Les caractéristiques courant-tension.....	274
9.2.2. L'observation des signaux	276
9.3. Le bruit.....	277
9.3.1. La distribution spectrale et les causes technologiques du bruit.....	277
9.3.2. Le rapport signal sur bruit	277
9.3.3. La puissance équivalente au bruit (N.E.P. = Noise equivalent power)	279
9.3.4. La détectivité	279
9.3.5. La limite de détectivité d'un détecteur parfait.....	280

9.4. La sensibilité des détecteurs.....	281
9.4.1. Les variations de sensibilité locale.....	281
9.4.2. La sensibilité spectrale.....	281
9.4.3. La sensibilité globale.....	282
9.4.4. La sensibilité en fonction de la fréquence.....	282
9.5. Les détecteurs thermiques.....	283
9.5.1. Les fluctuations.....	283
9.5.2. Principe général du fonctionnement.....	283
9.5.3. Le rapport signal sur bruit.....	285
9.5.4. La détectivité des récepteurs thermiques.....	286
9.6. Les divers types de détecteurs thermiques.....	286
9.6.1. Les bolomètres.....	286
9.6.2. Les détecteurs pyroélectriques.....	287
9.6.3. Les thermopiles.....	288
9.6.4. Les détecteurs pneumatiques.....	289
9.7. Les détecteurs quantiques.....	289
9.7.1. Les fluctuations.....	290
9.7.2. La détectivité des récepteurs quantiques.....	291
9.8. Les divers types de détecteurs quantiques.....	292
9.8.1. Les détecteurs photoémissifs.....	292
9.8.2. Rappels de physique du solide.....	295
9.8.3. Les détecteurs photoconducteurs.....	297
9.8.4. Les détecteurs photovoltaïques.....	299
9.9. L'utilisation des détecteurs.....	301
9.9.1. Le domaine spectral de sensibilité.....	301
9.9.2. Le niveau de sensibilité.....	303
9.9.3. Le bruit et la détectivité.....	304
9.9.4. La réponse en fréquence des détecteurs.....	305
9.9.5. Les conditions de polarisation du détecteur.....	306
9.9.6. L'influence de l'angle de champ du détecteur.....	307
9.9.7. Remarque concernant la passivation des détecteurs.....	307
9.10. Les détecteurs multiéléments.....	308
9.11. Les détecteurs les plus utilisés en thermographie.....	309
9.12. Les dispositifs à transfert de charges.....	310
9.12.1. CCD à trois phases.....	310
9.12.2. CCD à deux phases.....	312
9.12.3. L'efficacité du transfert.....	313
9.12.4. La lecture d'une barrette de détecteurs au moyen de CCD.....	313
9.12.5. L'imagerie par matrice CCD.....	314
9.12.6. CID. (charge injection devices).....	315
9.12.7. Les réponses spectrales et les caractéristiques des dispositifs d'imagerie à CCD ou CID.....	317
9.13. Les détecteurs IRCDD (Infrared Charge Coupled Devices).....	317
9.13.1. Le Tellure de Cadmium Mercure.....	318
9.13.2. L'Antimoniure d'Indium.....	318

9.13.3. Le Silicium – Platine Schottky	319
9.14. Performances des IRCCD	320
9.15. Les détecteurs sprite.....	321
9.16. Les détecteurs pyroélectriques	324
9.16.1. Le tube image pyroélectrique	324
9.16.2. Mosaiques pyroélectriques	325
9.17. Le refroidissement des détecteurs	325
9.17.1. Le refroidissement par gaz liquéfiés.....	326
9.17.2. Le refroidissement par détente Joule-Thomson.....	327
9.17.3. Le refroidissement par machines cryogéniques.....	328
9.17.4. Le refroidissement par effet thermoélectrique.....	331

Chapitre 10 ■ LE TRAITEMENT DU SIGNAL

10.1. Le signal analogique	336
10.2. Le traitement du signal analogique	339
10.3. Le traitement du signal numérique.....	340
10.4. Exemple d'application	341
10.4.1. L'acquisition analogique	341
10.4.2. La numérisation du signal.....	343
10.4.3. La visualisation.....	346
10.4.4. L'architecture de la restitution d'images	349
10.4.5. Le traitement.....	350
10.4.6. L'étalonnage des images en températures	351
10.4.7. La description du programme.....	354

Chapitre 11 ■ LA CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES INFRAROUGES

11.1. Généralités.....	360
11.1.1. L'éclairement équivalent au bruit.....	361
11.1.2. La résolution thermique.....	361
11.1.3. La résolution spatiale.....	361
11.1.4. La réponse spectrale	362
11.1.5. La correspondance température – signal	362
11.1.6. La stabilité temporelle – Les dérives.....	362
11.2. Les grandeurs caractéristiques des détecteurs infrarouges.....	362
11.2.1. La sensibilité.....	362
11.2.2. La constante de temps.....	363
11.2.3. La puissance équivalente au bruit (N.E.P. : « noise equivalent power »)	364
11.2.4. L'éclairement équivalent au bruit (N.E.I. : « noise equivalent irradiance »)	364
11.2.5. La détectivité	364

11.3. Calculs des grandeurs caractéristiques des systèmes infrarouges	366
11.3.1. Calcul de l'éclairement équivalent au bruit (N.E.I.).....	366
11.3.2. Calcul de l'écart de température équivalent au bruit (N.E.T.D.).....	371
11.4. Les mesures des caractéristiques des systèmes infrarouges.....	374
11.4.1. La mesure de l'éclairement équivalent au bruit (N.E.I.)	375
11.4.2. La mesure de l'écart de température équivalent au bruit (N.E.T.D.) ..	377
11.4.3. La mesure de l'écart minimum de température séparable (M.R.T.D.)	378
11.4.4. La mesure de l'écart minimum de température détectable (M.D.T.D.)	380
11.4.5. La mesure de la réponse spectrale relative	380
11.4.6. La mesure de la résolution spatiale – La fonction de transfert de modulation.....	382
11.4.7. La détermination de la correspondance signal-température (étalonnage).....	385
11.4.8. La mesure de la dérive.....	388
11.5. Exemple : caractérisation d'un système.....	390
11.5.1. Le calcul du N.E.I.....	391
11.5.2. Le calcul du N.E.T.D.....	392
11.5.3. La mesure du N.E.I.....	394
11.5.4. La mesure du N.E.T.D.....	395
11.5.5. La mesure de la résolution spatiale.....	397
11.5.6. La détermination de la correspondance signal-température	398

Chapitre 12 ■■■ L'IMAGERIE ET LA MESURE EN THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

12.1. La Résolution Spatiale	402
12.2. La Résolution thermique.....	405
12.3. L'Imagerie et la mesure.....	406
12.3.1. L'imagerie thermique	406
12.3.2. La mesure thermique	407
12.3.3. Conclusion	409
12.4. Étude d'application	410
12.4.1. La Résolution Spatiale.....	411
12.4.2. La Résolution thermique	417
12.4.3. La stabilité temporelle	417
12.4.4. Autres caractéristiques.....	418
12.4.5. L'enregistrement des signaux.....	419

Chapitre 13 ■■■ LE CHOIX DES BANDES SPECTRALES

13.1. L'émissivité spectrale des objets.....	422
13.2. La puissance rayonnée par l'objet.....	423
13.3. Le contraste thermique.....	425

13.4. La transmission atmosphérique.....	427
13.5. Les détecteurs de rayonnement.....	428
13.6. Les rayonnements parasites.....	429
13.7. Conclusions.....	429
13.8. L'imagerie thermique bispectrale.....	432

Chapitre 14 ■ QUELQUES APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET MILITAIRES

14.1. La thermographie infrarouge dans l'industrie.....	440
14.1.1. Rappels.....	440
14.1.2. Le contrôle non destructif par infrarouge.....	441
14.1.3. La thermographie dans les procédés industriels.....	443
14.1.4. Les méthodes de thermographie en procédé industriel.....	444
14.2. Les systèmes de thermographie adaptés au contrôle de procédés...	446
14.3. Chaîne d'acquisition, de numérisation et de traitement d'images infrarouges bispectrales.....	449
14.3.1. La caméra thermique bispectrale.....	449
14.3.2. Mesures des caractéristiques du système bispectral.....	455
14.3.3. Description de la chaîne de traitement.....	462
14.3.4. Description du fonctionnement du système.....	463
14.4. Signatures infrarouges – Techniques d'acquisition et de traitement.....	467
14.5. Réalisation de systèmes intégrés pour l'industrie nucléaire.....	474

Chapitre 15 ■ LES ANALYSEURS THERMIQUES LIGNES ET LEURS APPLICATIONS

15.1. Généralités.....	478
15.2. Description de l'analyseur ligne ATL 100 pour le contrôle du soudage.....	480
15.3. Le contrôle de procédé de soudage par infrarouge.....	482
15.4. L'analyseur thermique infrarouge ATL 020-050 pour le contrôle continu de produits de défilement.....	487
15.5. Surveillance du procédé de laminage en sidérurgie.....	489
15.6. Le contrôle de refroidissement du verre plat en étenderie.....	490
15.7. La surveillance thermique des fours rotatifs en cimenterie.....	492
15.8. Le contrôle du calandrage du papier.....	492
15.9. Le contrôle du procédé électrolytique.....	494
15.10. L'analyseur thermique infrarouge ATL 080.....	495
15.11. La surveillance des refroidisseurs en cimenterie.....	497

Chapitre 16 ■ LA SPECTRORADIOMÉTRIE INFRAROUGE

16.1. Rappels de spectroradiométrie	502
16.1.1. La spectroradiométrie par dispersion spectrale	503
16.1.2. La spectroradiométrie par Transformée de Fourier	504
16.1.3. La spectroradiométrie par filtres interférentiels	506
16.1.4. Limitations de ces méthodes.....	508
16.2. Description d'un spectroradiomètre infrarouge le SPR 314 (HGH).....	509
16.2.1. Architecture optique	509
16.2.2. Principe de l'élimination du flux parasite.....	511
16.2.3. Présentation du spectroradiomètre.....	514

Chapitre 17 ■ ÉVOLUTION DES SYSTÈMES DE THERMOGRAPHIE À BALAYAGES

17.1. AGEMA (Suède).....	522
17.2. AVIO (NIPPON AVIONICS)	526
17.3. INFRAMETRICS (USA).....	527
17.4. Comparaison entre les sensibilités thermiques des divers systèmes de thermographie	528

Chapitre 18 ■ LES CAMÉRAS THERMIQUES DE NOUVELLE GÉNÉRATION À DÉTECTEURS MATRICIELS

18.1. Généralités	536
18.2. Les détecteurs matriciels refroidis	538
18.2.1. Les matrices InSb	538
18.2.2. Les matrices HgTeCd	547
18.2.3. Les matrices PtSi	553
18.2.4. Les détecteurs à puits quantiques	561
18.3. Caméras à détecteurs matriciels refroidis	563
18.3.1. NightMaster (Cincinnati Electronics).....	563
18.3.2. NightConqueror (Cincinnati Electronics).....	566
18.3.3. La caméra IRRIS-256 ST (Cincinnati Electronics).....	566
18.3.4. La caméra RADIANCE HS (Raytheon).....	567
18.3.5. La caméra MILCAM-XP (Inframetrics)	568
18.3.6. La caméra IRH 32043 (Sarnoff).....	568
18.3.7. La caméra THERMACAM (Inframetrics)	568
18.3.8. La caméra LAIRD S270 (Nikon)	569
18.3.9. La caméra AGEMA 550 (Flir systems).....	569
18.4. Les détecteurs matriciels non refroidis	570
18.4.1. Les détecteurs thermiques réactifs.....	570
18.4.2. Les détecteurs thermiques dissipatifs	571
18.4.3. Les microbolomètres	571

18.4.4. Les détecteurs pyroélectriques..... 577

18.5. Les caméras à détecteurs matriciels non refroidis 578

18.5.1. La caméra pyroélectrique de Texas Instruments 578

18.5.2. La jumelle thermique LUTIS de Sagem..... 579

18.5.3. La caméra PYRO 2000 de Gec Marconi 580

18.5.4. Les caméras THERMASNAP et THERMACAM ULTRA
de Inframetrics..... 580

18.5.5. La caméra AGEMA 570 de Flir Systems Inc..... 581

18.5.6. Les caméras SENTINEL et NIGHT SIGHT de Raytheon 581

18.5.7. La caméra TVS 600 de Avio 582

18.5.8. La caméra LTC 500 de Lockheed Martin 583

18.5.8. Autres caméras non refroidies 584

Bibliographie585