

# 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 lamination.....	10
1.9. La loi de Bouger.....	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 $\epsilon_e$ .....	41
3.6.2. Calcul de $\epsilon_0$ 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 globar .....	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 photoémisifs .....	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 IRCD (Infrared Charge Coupled Devices).....	317
9.13.1. Le Tellurure 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. Mosaïques 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'éclairage 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'éclairage 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
<b>Bibliographie .....</b>	<b>585</b>