

Table des matières

Préface	1
Introduction	3
Chapitre 1. Architecture optique	9
1.1. Introduction.	9
1.2. Les théories optiques des phénomènes lumineux.	16
1.3. Les systèmes optiques pour observer et détecter	20
1.4. Principales limitations d'un système optique	26
1.4.1. Pouvoir de résolution et critère de Rayleigh	26
1.4.2. Les défauts d'un instrument optique réel	37
1.4.2.1. Résumé des différents défauts et de leurs traitements	40
1.4.3. L'optique de Fourier et les fréquences spatiales d'un objet	42
1.4.3.1. Exemple de calcul dans le cas d'une ouverture circulaire	44
1.5. Système de détection de la lumière dans un système optique	46
1.5.1. Vecteur de Poynting et détection de photons	47
1.5.2. Les détecteurs à base de semi-conducteurs, photodiode et CCD	49
1.5.2.1. CCD – caractéristiques	49
1.5.2.2. CCD – sensibilité.	50
1.6. Exemples d'application.	54
1.6.1. Télescope observant le Soleil	54
1.6.1.1. Objectif de l'étude	55
1.6.1.2. Présentation de l'architecture optique du télescope SODISM.	55
1.6.2. Spectromètre pour mesurer le spectre solaire et sa variabilité au cours du temps.	59

1.6.2.1. Objectif de l'étude	59
1.6.2.2. Présentation de l'architecture optique du spectromètre SOLSPEC	59
1.7. Conclusion	63
1.8. Annexe	64
1.8.1. Propagation de la lumière dans le cadre de l'optique ondulatoire	64
1.8.1.1. Traitement d'image	68
1.8.2. Les capteurs de radiation terrestre	69
1.8.2.1. Mesurer le rayonnement solaire entrant	69
1.8.2.2. Les capteurs UVS et TSIS	72
Chapitre 2. Architecture thermique et électrique	73
2.1. Introduction.	73
2.2. Architecture électrique d'un CubeSat	77
2.2.1. Les différents éléments de l'architecture électrique	77
2.2.2. Le système de contrôle d'attitude	80
2.3. Architecture thermique d'un CubeSat	83
2.3.1. Le contrôle thermique	85
2.3.2. Les spécifications thermiques des CubeSats	85
2.3.3. Les technologies pour la gestion thermique des CubeSats	86
2.3.3.1. La maîtrise des échanges radiatifs	87
2.3.3.2. La maîtrise des échanges conductifs	88
2.3.3.3. La maîtrise des échanges conductifs et radiatifs.	89
2.3.3.4. Les réchauffeurs régulés	90
2.3.3.5. Les machines thermiques actives destinées à transporter de la chaleur.	91
2.3.3.6. Le cryostat utilisant l'inertie thermique d'un liquide très froid	92
2.4. Développement et évaluation du contrôle thermique	92
2.4.1. Phase 0 : analyse	93
2.4.2. Phase A : étude de faisabilité	93
2.4.3. Phase B : définition préliminaire	93
2.4.4. Phases C et D : réalisation et qualification	94
2.4.5. Phases E : exploitation en orbite et retrait de service	95
2.5. Théories, modèles et simulation des effets thermiques	95
2.5.1. Les transferts thermiques par conduction, convection et rayonnement	97
2.5.1.1. Conduction	97
2.5.1.2. Convection	99

2.5.1.3. Rayonnement	100
2.5.1.4. Le facteur de forme	102
2.5.2. Équation de diffusion de la chaleur	103
2.5.3. Dispositifs ou systèmes utilisés pour la gestion des effets thermiques.	104
2.5.4. Exemple de mise en équation d'une diffusion thermique pour un télescope	108
2.5.4.1. Équation de rayonnement	108
2.5.4.2. Capacité thermique et chaleur ou puissance emmagasinée	108
2.5.4.3. Analyse thermique et bilan de chaleur	109
2.5.4.4. Exercice d'application de l'équation de la chaleur	109
2.5.4.5. Solution	111
2.6. Conclusion	113
2.7. Annexe	114
2.7.1. Grandeurs caractérisant les échanges par rayonnement d'un flux lumineux	114
2.7.1.1. Angle solide	115
2.7.1.2. Considérations géométriques	115
2.7.1.3. La luminance	116
2.7.1.4. L'émissance	117
2.7.1.5. L'intensité	117
2.7.1.6. Le flux	117
2.7.1.7. Considérations spectrales	117
2.7.2. Facteur de forme	118
2.7.2.1. Exercice	121
2.7.2.2. Solution	121
2.7.3. Environnement thermique dans l'espace	122
2.7.4. Éléments théoriques relatifs à la thermomécanique et à la thermo-élasticité	124
2.7.5. Échelle TRL (<i>Technology Readiness Level</i> – ISO 16290-2013) . .	128
Chapitre 3. Tests environnementaux	131
3.1. Introduction.	131
3.2. Principales limitations d'un système spatial.	137
3.2.1. Le référentiel FIDES pour la fiabilité prévisionnelle	138
3.2.1.1. Méthodologie FIDES	142
3.2.1.2. Objectifs du calcul FIDES	143
3.2.2. Fiabilité par simulation RBDO et procédure jumeau numérique. .	143
3.2.2.1. Optimisation déterministe.	145

3.2.2.2. Analyse de la fiabilité	145
3.2.2.3. Les conditions d'optimalité	151
3.3. Contraintes de l'environnement spatial sur la conception des systèmes spatiaux	153
3.3.1. Environnement mécanique de lancement	153
3.3.2. Environnement orbital	153
3.3.3. Environnement spatial	154
3.4. Les cycles solaires	154
3.4.1. Indice de cycles solaires à long terme	156
3.4.2. Indice de cycles solaires à court terme	157
3.4.2.1. Indice géomagnétique A_p	157
3.4.2.2. Indices K , K_p et a_p	157
3.5. Les effets du champ de gravitation	158
3.5.1. La force de gravitation	158
3.5.2. La microgravité	158
3.5.3. Le modèle atmosphérique, ou atmosphère neutre	158
3.5.4. Les constituants gazeux de l'atmosphère à haute altitude	160
3.5.5. Le modèle de la densité en altitude.	160
3.5.6. La traînée aérodynamique	161
3.6. Les effets du champ magnétique	162
3.6.1. Origine et variation du champ géomagnétique	162
3.6.2. La magnétosphère et ses caractéristiques	163
3.6.3. Le champ magnétique externe et ses caractéristiques	164
3.6.4. Modèle du champ magnétique et valeurs nominales	165
3.6.5. Valeurs nominales et caractéristiques du champ magnétique	165
3.6.6. Anomalie de l'Atlantique sud (ASA)	166
3.7. Les effets dus au plasma	166
3.7.1. Environnement du plasma en orbite terrestre basse	167
3.7.2. Températures de plasma	169
3.7.3. Chargement électrique et effets sur le satellite	169
3.7.4. Effets des radiations	170
3.7.5. Effets de la ceinture de Van Allen	172
3.7.6. Rayonnements électromagnétiques	172
3.7.7. Durée de vie d'un satellite	172
3.8. Conclusion	174
3.9. Annexe	174
3.9.1. Statistiques et probabilités, et loi d'extrémum généralisée	174
3.9.1.1. Statistiques et probabilités	174
3.9.1.2. La loi d'extrémum généralisée	181
3.9.2. Exemple de simulation des effets thermiques par FEM	182
3.9.2.1. Représentation mathématique	183

3.9.2.2. Les équations thermiques	183
3.9.2.3. La radiosité et le facteur de forme	184
3.9.2.4. Le flux de chaleur solaire absorbé	185
3.9.2.5. Le flux thermique absorbé de l'albédo	185
3.9.2.6. Le flux de chaleur infrarouge planétaire absorbé	186
3.9.2.7. Modèle thermique et analyse thermique d'UVSQ-SAT	186
3.9.3. Préparation du CubeSat : UVSQ-SAT NG	190

Chapitre 4. Préparer une mission d'observation 193

4.1. Introduction	194
4.2. Étalonnage du spectromètre UVSQ-SAT NG NIR	198
4.2.1. Étalonnage en longueur d'onde	200
4.2.2. Réponse absolue	203
4.2.3. Bande passante et fonction d'ouverture	205
4.2.4. Température	209
4.3. Détermination du spectre solaire extraterrestre à l'aide de la technique de tracé de Langley	210
4.3.1. Méthodologie	210
4.3.1.1. Méthode M1	211
4.3.1.2. Méthode M2	212
4.3.2. Considération des effets atmosphériques	213
4.3.2.1. Diffusion de Rayleigh	213
4.3.2.2. Diffusion de Mie et aérosols	213
4.3.2.3. Absorption d'ozone	214
4.3.2.4. Autres molécules gazeuses	214
4.3.3. Calcul de la profondeur optique	214
4.3.4. Conditions pour des mesures précises à l'aide de la technique de Langley	215
4.4. Résultats expérimentaux et discussion	216
4.5. Conclusion	222
4.6. Annexe	223
4.6.1. L'analyse et le traitement des données de mesures	223
4.6.1.1. La distorsion instrumentale des données	223
4.6.1.2. Traitement numérique des données	226
4.6.2. La méthode du simplexe non linéaire	229
4.6.3. La méthode de Levenberg-Marquardt	232
4.6.4. La méthode de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno	234
4.6.5. Traitement du signal pour déconvoluer une mesure	234
4.6.6. Spectre d'une molécule diatomique en spectroscopie IR	239

Chapitre 5. Mieux comprendre la lumière	245
5.1. La notion relative de la période de l'Antiquité au Moyen Âge.	245
5.2. Premières approches pour interpréter les phénomènes lumineux	247
5.3. Premiers théorèmes et postulats de l'optique	250
5.4. Deux méthodes d'enseignement : néoplatonisme et scolastique	252
5.5. La science au Moyen-Orient.	253
5.6. Les universités et les sciences en Europe	255
5.7. L'optique après le Moyen Âge et la révolution scientifique	260
5.7.1. La loi de réfraction et la vitesse de la lumière dans un milieu . . .	260
5.7.2. Optique géométrique et optique ondulatoire	261
5.7.3. Les photons et l'émission stimulée.	262
5.7.4. L'optique quantique et l'intrication des photons.	264
5.8. Conclusion	268
5.9. Annexe	269
5.9.1. Éléments de mécanique quantique	269
5.9.2. Modélisation de transfert thermique par la matrice densité	272
5.9.3. La nature du photon et le vide quantique	277
5.9.3.1. L'état fondamental de champ électromagnétique (EFGS : <i>electromagnetic field ground state</i>).	281
 Conclusion.	 287
 Bibliographie	 289
 Index	 317
 Sommaire de <i>Nanosatellites, CubeSats de l'ère NewSpace</i> pour l'observation spatiale 1.	 323