

# Table des matières

<b>Remerciements</b> . . . . .	13
<b>Chapitre 1. Premier contact</b> . . . . .	15
1.1. Vers une société de l'image . . . . .	15
1.1.1. Un peu de vocabulaire en forme de zoologie . . . . .	18
1.1.2. Une brève histoire de la photographie . . . . .	21
1.2. Pourquoi cet ouvrage . . . . .	24
1.3. Principe physique de formation de l'image . . . . .	24
1.3.1. La lumière . . . . .	24
1.3.2. Le rayonnement électromagnétique : onde et particule . . . . .	25
1.3.3. Le sténopé . . . . .	26
1.3.4. Du sténopé à l'appareil photo . . . . .	28
1.4. Bloc-diagramme de l'appareil photo . . . . .	33
<b>Chapitre 2. L'objectif photographique</b> . . . . .	37
2.1. Mise au point . . . . .	38
2.1.1. De la mise au point au flou . . . . .	38
2.1.2. Mise au point des scènes complexes . . . . .	40
2.2. Profondeur de champ . . . . .	45
2.2.1. Photographie à grande distance . . . . .	47
2.2.2. Macrophotographie . . . . .	47
2.2.3. Hyperfocale . . . . .	48
2.3. Champ angulaire . . . . .	49
2.3.1. Champ angulaire et système visuel humain . . . . .	49
2.3.2. Champ angulaire et focale . . . . .	50
2.4. Systèmes centrés . . . . .	52
2.4.1. De l'importance des verres dans les lentilles . . . . .	53

2.4.2. Les corrections chromatiques . . . . .	56
2.4.3. Le choix d'un système optique . . . . .	57
2.4.4. Diaphragmes et ouvertures . . . . .	60
2.4.5. Zoom . . . . .	62
2.4.6. Zoom et grandissement . . . . .	64
2.5. Les systèmes hypergones : les <i>fisheyes</i> . . . . .	65
2.5.1. Les fonctions de projection . . . . .	66
2.5.2. <i>Fisheye</i> circulaire et diagonal . . . . .	68
2.5.3. Les <i>fisheyes</i> en pratique . . . . .	70
2.6. Diffraction et lumière incohérente . . . . .	71
2.6.1. Cohérence et incohérence . . . . .	72
2.6.2. Définitions et notations . . . . .	73
2.6.3. Pour une longueur d'onde unique . . . . .	74
2.6.4. Diaphragme circulaire . . . . .	76
2.6.5. Discussion . . . . .	77
2.6.6. Cas d'un spectre large . . . . .	79
2.6.7. Pouvoir de séparation . . . . .	81
2.7. Calibrage des caméras . . . . .	82
2.7.1. Un peu de géométrie de la formation des images . . . . .	82
2.7.2. Calibrage multi-images : l'ajustement de faisceaux . . . . .	85
2.7.3. Calibrage des caméras <i>fisheyes</i> . . . . .	85
2.8. Les aberrations . . . . .	86
2.8.1. L'aberration chromatique . . . . .	87
2.8.2. Les aberrations géométriques . . . . .	87
2.8.3. Les réflexions internes . . . . .	89
2.8.4. Le vignettage . . . . .	90
2.8.5. La correction des aberrations . . . . .	93

## Chapitre 3. Le capteur numérique . . . . . 95

3.1. La taille des capteurs . . . . .	96
3.1.1. Rapport d'aspect du capteur . . . . .	96
3.1.2. Dimensions du capteur . . . . .	97
3.1.3. Taille des pixels . . . . .	99
3.2. Le photodétecteur . . . . .	99
3.2.1. Les matériaux de la photodétection . . . . .	99
3.2.2. Les CCD . . . . .	100
3.2.3. Les CMOS . . . . .	102
3.2.4. Montage rétroéclairé (BSI), montage en pile . . . . .	106
3.2.5. Montages en pile . . . . .	107
3.2.6. Influence du choix de la technologie sur le bruit . . . . .	108
3.2.7. Conclusion . . . . .	109
3.3. Les filtres intégrés au capteur . . . . .	109

3.3.1. Les microlentilles . . . . .	109
3.3.2. Filtre anti-aliasing . . . . .	111
3.3.3. Les filtres de sélection chromatique . . . . .	113
<b>Chapitre 4. Radiométrie et photométrie . . . . .</b>	<b>115</b>
4.1. Radiométrie : grandeurs physiques . . . . .	116
4.1.1. Définitions . . . . .	116
4.1.2. Les objets rayonnants : émissivité et température de source . . . . .	120
4.1.3. Les objets réfléchissants : réflectance et radiosité . . . . .	126
4.2. Aspects subjectifs : la photométrie . . . . .	128
4.2.1. Courbes d'efficacité lumineuse spectrale . . . . .	129
4.2.2. Grandeurs photométriques . . . . .	130
4.3. Les systèmes réels . . . . .	131
4.3.1. Etendue de faisceau . . . . .	132
4.3.2. Photométrie de l'appareil photo . . . . .	133
4.4. Radiométrie et photométrie en pratique . . . . .	136
4.4.1. Mesure avec un photomètre . . . . .	136
4.4.2. Les mesures intégrées . . . . .	139
4.5. Du watt à l'ISO . . . . .	140
4.5.1. Sensibilité ISO : définitions . . . . .	140
4.5.2. Sensibilité standard de sortie ISO SOS . . . . .	144
4.5.3. Indice d'exposition recommandé . . . . .	145
4.5.4. Indice de lumination . . . . .	145
<b>Chapitre 5. La couleur . . . . .</b>	<b>147</b>
5.1. Du rayonnement électromagnétique à la perception . . . . .	148
5.1.1. La couleur des objets . . . . .	148
5.1.2. Perception des couleurs . . . . .	151
5.2. Les espaces de couleur . . . . .	153
5.2.1. L'espace RVB de la CIE 1931 . . . . .	154
5.2.2. Autres espaces chromatiques . . . . .	162
5.2.3. L'espace Lab . . . . .	164
5.2.4. D'autres espaces colorimétriques . . . . .	166
5.2.5. Les espaces de la télévision . . . . .	166
5.2.6. L'espace sRGB . . . . .	167
5.2.7. Profil ICC . . . . .	170
5.2.8. Seuils chromatiques . . . . .	170
5.3. La balance des blancs . . . . .	171
5.3.1. Les réglages préétablis . . . . .	173
5.3.2. Le calibrage chromatique . . . . .	173
5.3.3. L'usage d'une mire de gris . . . . .	174

5.3.4. Les techniques automatiques de balance de blanc . . . . .	174
5.3.5. Le modèle Retinex . . . . .	176
5.4. Acquérir la couleur . . . . .	179
5.4.1. Les images en « vraie couleur » . . . . .	182
5.4.2. Matricage chromatique . . . . .	186
5.4.3. Sélection chromatique des matrices . . . . .	192
5.5. Reconstruire la couleur : le démosaïchage . . . . .	195
5.5.1. Démosaïchage par interpolation linéaire . . . . .	196
5.5.2. Interpolations non linéaires, canal par canal . . . . .	198
5.5.3. Interpolations non linéaires intercanaux . . . . .	199

**Chapitre 6. Qualité d'image . . . . . 205**

6.1. Les attributs de la qualité . . . . .	206
6.1.1. Le rapport signal à bruit . . . . .	207
6.1.2. La résolution . . . . .	211
6.1.3. La fonction de transfert de modulation . . . . .	215
6.1.4. Le piqué . . . . .	220
6.1.5. L'acutance . . . . .	220
6.2. Evaluation de la qualité d'image globale . . . . .	225
6.2.1. Evaluation à l'aide d'une référence . . . . .	227
6.2.2. Evaluation sans référence . . . . .	228
6.2.3. Vers une évaluation par un modèle de perception . . . . .	233
6.3. La quantité d'information . . . . .	235
6.3.1. Le nombre de degrés de liberté . . . . .	235
6.3.2. L'entropie . . . . .	240
6.3.3. Capacité d'information et photographie . . . . .	243
6.4. Et l'esthétique, alors ? . . . . .	248
6.4.1. La mesure du beau de Birkhoff . . . . .	249
6.4.2. La Gestalt . . . . .	250
6.4.3. Information de Shannon, théorie algorithmique de la complexité . . . . .	250
6.4.4. L'approche de l'esthétique par apprentissage . . . . .	251

**Chapitre 7. Le bruit dans la photographie numérique . . . . . 253**

7.1. Le bruit photonique . . . . .	254
7.1.1. Fluctuations du signal optique . . . . .	254
7.1.2. Les propriétés de la loi de Poisson . . . . .	256
7.1.3. L'hypothèse poissonnienne en pratique . . . . .	257
7.1.4. Passage du flux de photons à la charge électrique . . . . .	258
7.2. Les bruits électroniques . . . . .	260
7.2.1. Le courant d'obscurité . . . . .	260

7.2.2. Le bruit de lecture du pixel . . . . .	261
7.2.3. Le bruit de diaphonie . . . . .	261
7.2.4. Le bruit de recharge . . . . .	262
7.2.5. Le bruit de quantification . . . . .	262
7.3. Les bruits non uniformes . . . . .	263
7.3.1. Non-uniformité des détecteurs . . . . .	263
7.3.2. Le bruit poivre et sel . . . . .	263
7.3.3. Les bruits de reconstruction et de compression d'image . . . . .	263
7.4. Un modèle de bruit pour l'acquisition d'images . . . . .	264
7.4.1. Ordres de grandeur . . . . .	265

## Chapitre 8. La représentation des images :

<b>codage et formats . . . . .</b>	<b>269</b>
8.1. Format « naïf » et métadonnées . . . . .	270
8.2. Le format RAW : brut ou natif . . . . .	271
8.2.1. Que contient un format natif (RAW) ? . . . . .	273
8.2.2. Intérêt du format natif . . . . .	275
8.2.3. Les limites du format natif . . . . .	276
8.2.4. Vers une normalisation du format natif . . . . .	277
8.3. Les métadonnées . . . . .	278
8.3.1. Le standard XMP . . . . .	278
8.3.2. Le format de métadonnées Exif . . . . .	279
8.4. Les formats comprimés sans perte . . . . .	281
8.4.1. Les algorithmes généraux de codage sans perte . . . . .	282
8.4.2. Les codages sans perte de JPEG . . . . .	283
8.5. Les formats d'image issus des arts graphiques . . . . .	284
8.5.1. Le format PNG . . . . .	284
8.5.2. Le format TIFF . . . . .	285
8.5.3. Le format GIF . . . . .	287
8.6. Les formats de compression d'image avec perte . . . . .	287
8.6.1. JPEG . . . . .	288
8.6.2. JPEG 2000 . . . . .	293
8.7. Les formats tuilés . . . . .	298
8.8. Le codage vidéo . . . . .	299
8.8.1. Vidéo et normalisation . . . . .	299
8.8.2. Codage MPEG : les mécanismes mis en œuvre dans MPEG . . . . .	300
8.9. Codage comprimé ( <i>Compressed sensing</i> ) . . . . .	303

## Chapitre 9. Autour du capteur photographique . . . . . 307

9.1. Les processeurs de traitement d'image . . . . .	307
9.1.1. Architecture globale et fonctionnalités . . . . .	308

9.1.2. L'unité centrale (CPU) . . . . .	309
9.1.3. Le processeur de traitement de signal (DSP) . . . . .	312
9.1.4. Le processeur graphique (GPU) . . . . .	314
9.2. La mémoire . . . . .	314
9.2.1. Mémoires volatiles . . . . .	314
9.2.2. Cartes mémoire d'archivage . . . . .	315
9.3. Les écrans . . . . .	320
9.3.1. Quel écran ? . . . . .	320
9.3.2. Quelles performances ? . . . . .	322
9.3.3. Quelle technologie ? . . . . .	323
9.4. L'obturateur . . . . .	326
9.4.1. Obturation mécanique . . . . .	326
9.4.2. Obturation électronique . . . . .	326
9.5. Les dispositifs de mesure de la mise au point . . . . .	328
9.5.1. Mise au point par recherche du meilleur contraste . . . . .	330
9.5.2. Mise au point par accord de phase . . . . .	332
9.5.3. Mise au point sur cibles multiples . . . . .	333
9.5.4. Configuration et géométrie des télémètres . . . . .	334
9.5.5. La mécanique de mise au point . . . . .	335
9.5.6. La mise au point en pratique . . . . .	336
9.6. La stabilisation . . . . .	338
9.6.1. Capteurs de mouvement . . . . .	338
9.6.2. Compensation du mouvement . . . . .	342
9.6.3. Stabilisation de la vidéo . . . . .	344
9.7. Les compléments de l'objectif : lentilles additionnelles et filtres . . . . .	345
9.7.1. Changeurs de focale . . . . .	345
9.7.2. Les filtres infrarouge . . . . .	348
9.7.3. Les filtres d'atténuation . . . . .	349
9.7.4. Les filtres polarisants . . . . .	350
9.7.5. Les filtres chromatiques . . . . .	355
9.7.6. Les filtres colorés . . . . .	357
9.7.7. Les filtres d'effets spéciaux . . . . .	357
9.8. Piles et accumulateurs . . . . .	358
9.8.1. Piles . . . . .	359
9.8.2. Accumulateur Ni-Cd . . . . .	359
9.8.3. Accumulateur Lithium-ion . . . . .	360

## **Chapitre 10. Photographie et logiciels . . . . . 363**

10.1. Les logiciels embarqués . . . . .	363
10.1.1. La réduction du bruit . . . . .	364
10.1.2. La détection des visages . . . . .	368
10.1.3. Le suivi de mouvement . . . . .	371

---

10.1.4. La rotation des images . . . . .	373
10.1.5. Les panoramas . . . . .	374
10.2. Les logiciels importés . . . . .	382
10.2.1. Améliorer les fonctions existantes . . . . .	383
10.2.2. Créer de nouvelles fonctions . . . . .	384
10.3. Les logiciels déportés . . . . .	385
10.3.1. Les images à haute dynamique (HDR) . . . . .	385
10.3.2. Imagerie plénoptique : améliorer la profondeur de champ . . . . .	390
10.3.3. Améliorer la résolution : la super-résolution . . . . .	396
10.3.4. Obturateur battant : le <i>flutter-shutter</i> . . . . .	399
<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>405</b>
<b>Index</b> . . . . .	<b>425</b>