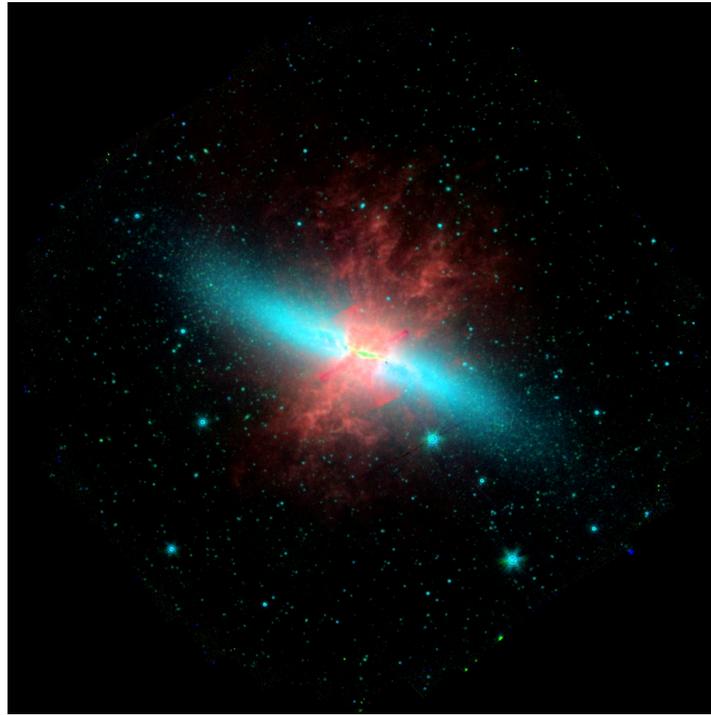


# OBSERVATION & MESURE EN ASTROPHYSIQUE

ELÉMENTS DE RAYONNEMENT, DE STATISTIQUE,  
DE DÉTECTION ET DE TRAITEMENT DU SIGNAL,  
D'IMAGERIE, DE PHOTOMÉTRIE ET DE SPECTROSCOPIE DANS LE VISIBLE



La galaxie M82 observée en infrarouge par *Spitzer*/IRAC depuis l'espace à 3,6, 4,5 et 8,0  $\mu\text{m}$  par le relevé SINGS (Kennicutt et al.). Compositage de H. Dole à partir des données publiques.

## Hervé Dole

Institut d'Astrophysique Spatiale  
bureau 206 - bâtiment 121  
Université Paris Sud 11  
91405 Orsay Cedex  
tel : 01.69.85.85.72  
email : Herve.Dole@ias.u-psud.fr

Document téléchargeable : <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/hdole/enseignement.php>  
Etudiants : vos commentaires, suggestions, identifications des erreurs sont les **bienvenus** !

**Année 2008-2009**

Version 19Nov2008



# Table des matières

<b>I</b>	<b>Introduction physique et astrophysique</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>13</b>
1.1	Démarche scientifique ; Astrophysique ; Observation . . . . .	13
1.2	Vecteurs de l'information . . . . .	13
1.3	Collecter l'information . . . . .	14
1.4	La démarche observationnelle . . . . .	15
1.5	Résumé des étapes de la démarche observationnelle . . . . .	15
1.6	Conseils de lecture . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Rayonnement électromagnétique en astrophysique</b>	<b>17</b>
2.1	Spectre électromagnétique . . . . .	17
2.2	Corps noir . . . . .	17
2.2.1	Nature . . . . .	17
2.2.2	Caractéristiques principales . . . . .	20
2.3	Différentes températures . . . . .	22
2.4	Rayonnement des principaux objets astrophysiques . . . . .	22
<b>3</b>	<b>La vie d'un photon n'est pas un long fleuve tranquille</b>	<b>27</b>
3.1	Introduction au signal et au bruit . . . . .	27
3.2	Milieus astrophysiques . . . . .	28
3.3	Atmosphère et environnement terrestres . . . . .	28
3.4	Télescope . . . . .	29
3.5	Détecteur . . . . .	30
3.6	Echantillonnage et stratégie d'observation . . . . .	30
3.7	Morale de l'histoire . . . . .	31
<b>II</b>	<b>Outils de base de l'analyse statistique et du signal</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>Rappels de théorie des probabilités</b>	<b>35</b>
4.1	Notions élémentaires . . . . .	36
4.1.1	Définitions . . . . .	36
4.1.2	Fonction de distribution (ou de densité de probabilité) . . . . .	36
4.1.3	Moments . . . . .	37
4.1.4	Plusieurs variables . . . . .	37
4.2	Distribution de Gauss (loi normale) . . . . .	38
4.2.1	Définition . . . . .	38
4.2.2	Propriétés . . . . .	38
4.3	Autres distributions . . . . .	39
4.3.1	Distribution binomiale . . . . .	39
4.3.2	Distribution de Poisson . . . . .	40
4.4	Théorème central limite . . . . .	40

4.5	Estimateur de la moyenne . . . . .	41
4.6	Dans le monde réel : la moyenne pondérée . . . . .	42
4.7	Un dernier mot : ergodisme . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Outils mathématiques de caractérisation des signaux</b>	<b>43</b>
5.1	Outils élémentaires . . . . .	43
5.2	Transformée de Fourier . . . . .	45
5.2.1	Définition . . . . .	45
5.2.2	Espace direct et espace de Fourier . . . . .	46
5.2.3	Signification de la transformée de Fourier . . . . .	46
5.2.4	Quelques propriétés . . . . .	46
5.2.5	Amplitude et phase . . . . .	47
5.2.6	En pratique . . . . .	47
5.3	Energie des signaux . . . . .	48
5.3.1	Puissance et énergie . . . . .	48
5.3.2	Densité spectrale d'énergie . . . . .	48
5.3.3	Spectre de puissance . . . . .	48
5.3.4	Bruit blanc . . . . .	48
5.3.5	Egalité de Parseval : énergies . . . . .	49
5.4	Fonction de corrélation . . . . .	49
5.4.1	Fonction d'autocorrélation . . . . .	49
5.4.2	Signification . . . . .	49
5.4.3	Relation de Wiener-Khintchine . . . . .	49
5.4.4	Fonction de corrélation . . . . .	49
5.5	Convolution . . . . .	50
5.5.1	Définition . . . . .	50
5.5.2	Signification . . . . .	50
5.5.3	Quelques propriétés . . . . .	50
5.6	Réponse impulsionnelle . . . . .	50
<b>III</b>	<b>Détection du signal astrophysique</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>La mesure en astrophysique</b>	<b>55</b>
6.1	Introduction : mesure, incertitude et erreur . . . . .	55
6.2	Echantillonnage et théorème d'échantillonnage . . . . .	56
6.3	Discrétisation . . . . .	58
6.4	Bruit : phénoménologie . . . . .	58
6.4.1	Bruit blanc . . . . .	58
6.4.2	Bruit en $1/f$ . . . . .	58
6.4.3	Bruit gaussien . . . . .	60
6.4.4	Bruit poissonien . . . . .	61
6.5	Bruit : origine physique . . . . .	62
6.5.1	Bruit de photon . . . . .	62
6.5.2	Bruit thermique . . . . .	62
6.5.3	Bruit de fond . . . . .	63
6.5.4	Bruit de discrétisation (ou quantification ou numérisation) . . . . .	63
6.5.5	Bruit de lecture . . . . .	63
6.5.6	Bruit de grenaille . . . . .	64
6.5.7	Bruit de confusion . . . . .	64
6.6	Rapport signal sur bruit S/B . . . . .	64
6.7	Détection à 3 ou 5 sigmas ? . . . . .	65
6.8	Niveau de confiance . . . . .	65

6.9	Puissance équivalente de bruit . . . . .	65
6.10	Réponse impulsionnelle . . . . .	66
<b>7</b>	<b>Généralités sur les détecteurs de rayonnement</b>	<b>67</b>
7.1	Classification des détecteurs . . . . .	67
7.1.1	Détecteurs cohérents, quantiques, en amplitude, ou quadratiques . . . . .	67
7.1.2	Classification plus pragmatique . . . . .	68
7.2	Performances des détecteurs . . . . .	69
7.3	Un soupçon de physique du solide . . . . .	69
<b>8</b>	<b>Détecteurs CCD dans le visible</b>	<b>71</b>
8.1	Fonctionnement . . . . .	71
8.2	Caractéristiques . . . . .	72
8.2.1	Caractéristiques principales . . . . .	72
8.2.2	Exemples de CCD . . . . .	72
8.3	Rapport signal sur bruit . . . . .	74
8.4	Acquisitions à effectuer . . . . .	74
8.5	Pré-traitement du signal CCD . . . . .	76
8.5.1	Caméras CCD refroidies à l'azote liquide . . . . .	76
8.5.2	Caméras CCD refroidies par effet Peltier . . . . .	76
8.5.3	Correction du temps d'intégration . . . . .	76
8.6	Un modèle simple de données CCD . . . . .	76
8.6.1	Description du modèle . . . . .	76
8.6.2	Modèle du bruit additif . . . . .	77
8.6.3	Démarche . . . . .	77
8.6.4	Mesure et détermination du biais : le superbias . . . . .	77
8.6.5	Mesure et détermination du gain : le superflat . . . . .	78
8.7	Exemple : M82 au 120 de l'OHP . . . . .	79
8.7.1	De l'image brute à l'image traitée . . . . .	79
8.7.2	Images de poussières sur le flat . . . . .	79
<b>9</b>	<b>Planification d'une observation</b>	<b>83</b>
9.1	Démarche . . . . .	83
9.2	Champ de vue du détecteur . . . . .	83
9.3	Atmosphère et hauteur : airmass . . . . .	84
9.4	Choix de la cible dans les bases de données . . . . .	84
9.5	Choix des filtres et/ou de la résolution . . . . .	85
9.6	Rapport S/N . . . . .	86
9.7	Acquisitions . . . . .	86
9.8	Outil d'analyse rapide . . . . .	86
<b>IV</b>	<b>Analyse du signal astrophysique</b>	<b>87</b>
<b>10</b>	<b>Éléments de traitement du signal astrophysique</b>	<b>89</b>
10.1	Notion de filtrage . . . . .	89
10.2	Types de filtres . . . . .	89
10.3	Filtrage dans l'espace direct . . . . .	89
10.3.1	Filtrages classiques passe-haut . . . . .	91
10.4	Filtrage dans l'espace des fréquences . . . . .	91
10.5	Filtrage espace-fréquence : les ondelettes . . . . .	91
10.6	Exemples d'utilisation . . . . .	91
10.7	Déconvolution . . . . .	91

<b>11</b>	<b>Notions de photométrie</b>	<b>93</b>
11.1	Luminosité . . . . .	93
11.2	Densité de flux . . . . .	93
11.3	Magnitude apparente . . . . .	94
11.4	Systèmes de magnitudes . . . . .	95
11.4.1	Magnitude Vega . . . . .	95
11.4.2	Magnitude AB : la plus pratique . . . . .	95
11.5	Indice de couleur ou couleur . . . . .	95
11.6	Magnitude absolue . . . . .	96
11.7	Brillance de surface . . . . .	96
11.8	Etalonnage photométrique . . . . .	97
11.9	Filtres photométriques . . . . .	97
11.10	Photométrie d'ouverture . . . . .	97
11.11	Photométrie par ajustement de PSF . . . . .	98
11.12	Autres types de photométrie . . . . .	98
11.13	Effets cosmologiques . . . . .	99
<b>12</b>	<b>Visualisation des résultats</b>	<b>101</b>
12.1	Philosophie . . . . .	101
12.2	Conseils de base . . . . .	101
12.3	Echelles . . . . .	101
12.4	Barres d'erreur . . . . .	102
12.5	La couleur à partir de trois images . . . . .	102
12.5.1	Avec ds9 : un premier regard . . . . .	102
12.5.2	Avec IDL . . . . .	102
12.5.3	Avec Stiff . . . . .	102
<b>13</b>	<b>Exemples d'analyse du signal en astrophysique et cosmologie</b>	<b>103</b>
13.1	Exemples de spectre de puissance en astrophysique et cosmologie . . . . .	103
13.1.1	Cosmologie : fond diffus cosmologique . . . . .	103
13.1.2	Cosmologie : distribution de matière . . . . .	106
13.1.3	Physique du milieu interstellaire : structuration et turbulence . . . . .	106
13.1.4	Physique solaire et stellaire : oscillations des étoiles . . . . .	107
<b>14</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>109</b>
<b>A</b>	<b>Observations à l'OHP</b>	<b>115</b>
A-1	Télescopes et instrumentation . . . . .	115
A-2	Filtres . . . . .	115
A-3	Préparation des projets scientifiques . . . . .	115
<b>B</b>	<b>Rudiments de MIDAS</b>	<b>117</b>
<b>C</b>	<b>Rudiments d'IRAF</b>	<b>119</b>
C-1	Ressources générales . . . . .	119
C-2	Commandes de base . . . . .	119
C-3	Manipuler une image . . . . .	119
C-4	Manipuler des images . . . . .	120
C-5	Réduction d'images CCD . . . . .	120
C-6	Photométrie . . . . .	120
C-7	Autre . . . . .	121

# Table des figures

1.1	<b>Principe d'un système d'observation et d'acquisition astronomique.</b> Mise à jour de la figure 1.5 de Léna et al. [1998, 2008]. . . . .	14
2.1	<b>Le spectre électromagnétique.</b> Les échelles sont exprimées en énergie (eV), fréquence, longueur d'onde, et nom usuel. Noter que le domaine des rayons $\gamma$ s'étend bien au delà de ce schéma, jusqu'au TeV ( $10^{12}$ eV). Pour les principales conversions, se reporter à la table 2.1. . . . .	18
2.2	<b>Image du corps noir de 20K ayant servi à l'étalonnage de Planck-HFI à la station d'étalonnage de l'IAS en 2006.</b> La cavité du corps noir (A), ici ouverte, est composée de résine époxy chargée de poudre de carbone et micro-billes de silice (B). Le rayonnement sort par l'ouverture (C). La boîte est chauffée de tous les cotés à 20K par des résistances (D). Des pieds (E) isolent le corps noir de l'environnement à 2K. Le corps noir doit avoir des parois aussi absorbantes que possible, seule l'émission de ces parois doit contribuer au rayonnement qui sort du corps noir. Le corps noir (F) est ensuite placé dans une sphère intégratrice (G) qui a pour but d'augmenter l'étendue de faisceau (H) : les parois internes de la sphère sont diffusantes et si possible non absorbantes, l'objectif étant de créer une illumination uniforme à partir d'un (petit) corps noir qui rayonne dans la sphère. Un miroir (I) renvoie le rayonnement sur le plan focal HFI (J). Le corps noir a une émissivité mesurée de l'ordre de $\epsilon = 1 - x$ , avec $x \sim 10^{-3}$ . Corps noir réalisé par : IAS/APC/IAP. Images prises par F. Pajot (IAS). . . . .	19
2.3	<b>Les contributions majeures en rayonnement dans l'Univers, hors notre Galaxie :</b> le fond cosmologique (CMB) et le fond diffus extragalactique, qui s'étend du domaine radio aux rayons $\gamma$ , mais qui est maximum dans l'infrarouge (CIB : Cosmic Infra-red Background) puis l'optique (COB : Cosmic Optical Background). Ce graphique représente la brillance du rayonnement extragalactique et cosmologique, qui est proportionnelle à la puissance reçue, en fonction de la longueur d'onde (ou énergie) d'observation. A gauche : CMB, CIB et COB, avec les valeurs des brillances indiquées dans le cadre en $nW/m^2/sr$ (tiré de [Dole et al., 2006]). A droite : le même schéma, mais étendu sur tout le spectre (inspiré [Dole et al., 2006]; voir le site web galaxies IR à l'IAS : <a href="http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies/">http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies/</a> ) . . . . .	25
3.1	<b>La fenêtre atmosphérique.</b> Ce schéma montre la transmission atmosphérique (zone blanche) : maximale en haut du schéma, nulle en bas. Les principales fenêtres pour observer le ciel sont donc dans le domaine visible (à gauche) et radio (à droite), avec quelques possibilités en IR proche et submillimétrique. L'opacité de l'atmosphère est principalement due aux raies de $H_2O$ , $O_2$ , $O_3$ , $CO_2$ . Trouvé sur <a href="http://www.fas.org">www.fas.org</a> <i>Si vous trouvez une meilleure illustration, je suis preneur !</i> . . . . .	28

3.2	<b>Effets de l'échantillonnage sur des galaxies infrarouges observées par ISO et Spitzer.</b> La même région du ciel est observée : $6.6' \times 6.6'$ dans le champ dit ELAIS N1. De gauche à droite : ISO à $170 \mu\text{m}$ de longueur d'onde ; Spitzer à $160 \mu\text{m}$ ; Spitzer à $70 \mu\text{m}$ ; Spitzer à $24 \mu\text{m}$ . On voit sur les 2 images de gauche, que l'échantillonnage d'ISO était plus faible que Spitzer, ce qui permet à ce dernier de détecter deux sources angulairement proches (en bas à gauche), alors que les télescopes ont des tailles comparables. Les trois images de droite illustrent simplement l'évolution de la résolution angulaire en fonction de la longueur d'onde : la source brillante en IR lointain (en haut à droite) est en fait composée de plusieurs galaxies. Figure 11 de Lagache et al. [2005]. . . . .	30
4.1	<b>Distribution gaussienne.</b> Exemple avec $\mu = 50$ et $\sigma = 10$ . La zone en tiret indique la largeur à mi-hauteur (FWHM), qui vaut environ $2.35\sigma$ soit ici 23.5. La zone claire indique la région $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ , qui représente 68.3% de probabilité. Noter la différence entre la région $\pm\sigma$ et la FWHM. La zone plus grisée indique l'extension de la région $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ , qui représente 95.5% de probabilité. Enfin, la zone sombre indique l'extension de la région $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ , qui représente 99.7% de probabilité. . . . .	39
4.2	<b>Les relations entre les distributions binomiale, de Poisson et de Gauss.</b> Adapté de la figure 1.12 de Protassov [2002]. . . . .	41
5.1	<b>Exemple de distribution asymétrique (ici log-normale).</b> La moyenne (point), médiane (trait) et le mode de la distribution (point-trait) sont représentés. La moyenne est affectée par la queue de distribution de valeurs élevées ; la médiane s'avère un meilleur estimateur que la moyenne. Le mode donne directement la valeur la plus probable. Le minimum et le maximum de cette distribution divergent. . . . .	44
5.2	<b>Extrait d'une série temporelle d'un pixel du photomètre MIPS à <math>160 \mu\text{m}</math> à bord du satellite Spitzer,</b> lors de la première observation cosmologique du champ de Lockman à $160 \mu\text{m}$ en novembre 2003. Les abscisses représentent le temps (un Data Collection Event, DCE, dure environ $1/8$ seconde), les ordonnées le signal à $160 \mu\text{m}$ (en DN/s, soit Data Number par seconde, multiplié par un facteur pour faciliter la lisibilité du graphe). Cet extrait montre 10s de signal, alors que MIPS voit un champ fixe dans le ciel, d'émission constante. Le signal est un peu bruité. La moyenne (point) et la médiane (trait) sont représentées. On observe que la moyenne est affectée par les deux points déviants proches de zéro. Pour information, les caractéristiques du signal tracé sont : 80 points ; moyenne=231,8 ; médiane=239,0 ; min=10 ; max=319 ; $\sigma=47,3$ . . . . .	45
6.1	<b>Echantillonnage et discrétisation (ou quantification) d'un signal.</b> Figure 6.1 de Cottet [2000]. . . . .	57
6.2	<b>Illustration de l'effet d'échantillonnage sur les fréquences détectées.</b> Un mauvais échantillonnage peut aboutir à une détection de fréquence inexistante. Figure 6.7 de Cottet [2000]. . . . .	58
6.3	<b>Illustration du bruit blanc : série temporelle (a, en haut) et spectre de puissance (b, en bas) de la différence de signal de deux bolomètres polarisés de Planck HFI à 143 GHz.</b> La ligne horizontale sur le spectre de puissance représente le bruit blanc, typiquement entre 30 mHz et 30 Hz. La coupure à haute fréquence est due au filtrage. Etalonnage à l'IAS en 2006. F. Pajot et l'équipe d'étalonnage Planck HFI. . . . .	59

6.4	<b>Illustration du bruit en 1/f : série temporelle (a, en haut) et spectre de puissance (b, en bas) du signal d'un bolomètre de Planck HFI à 543 GHz.</b> La ligne horizontale sur le spectre de puissance représente le bruit blanc ; la ligne oblique représente le bruit en 1/f. La fréquence du coude $f_c$ caractérise la fréquence en dessous de laquelle le bruit en 1/f commence à dominer, ici vers 0.2 Hz. La coupure à haute fréquence est due au filtrage. Noter que cet exemple provient d'un bolomètre ne fonctionnant pas nominalement. Les autres bolomètres se comportent bien mieux ( $f_c < 0.1$ Hz), et la régulation (absente ici) élimine purement et simplement la dérive en 1/f. Etalonnage à l'IAS en 2006. F. Pajot et l'équipe d'étalonnage Planck HFI. . . . .	60
6.5	<b>Autre illustration du bruit en 1/f : signal interférométrique avec variations atmosphériques.</b> Séries temporelles (à gauche) et spectre de puissance (à droite). Le bruit en 1/f est dû aux variations atmosphériques. Le signal recherché est le pic vers 100 Hz. Instrument FLUOR. Figure 4.3 de la thèse d'Antoine Mérand, 2005, Paris 6. . . . .	61
7.1	<b>Bolomètre de Planck-HFI.</b> Le bolomètre est la structure en toile d'araignée (SWB : spider web bolometer) dont la maille est comparable à la longueur d'onde d'observation ce qui permet d'être moins sensible aux rayons cosmiques. Le thermomètre est au centre. JPL/NASA et ESA ; site planck.fr et Michel Piat. . . . .	68
7.2	<b>Structure de bande d'un isolant, semiconducteur et conducteur.</b> $E_G$ est l'énergie de la bande interdite (ou "gap"). Figure 1.7 de Rieke [2004]. . . . .	70
8.1	<b>(à gauche) Les 40 CCDs de la caméra MegaCam au CFHT.</b> Chaque CCD ayant 4612x2048 pixels, MegaCam est la plus grande caméra CCD au monde, avec 340 millions de pixels, couvrant un champ de 1 degré carré au foyer du télescope de 3.60m du CFHT. Canada-France-Hawaii Telescope / 2003. <b>(à droite) Les 2 CCDs de la caméra ACS WFPC2</b> avant l'intégration, le lancement et l'installation au foyer du HST en mars 2002. NASA / Ball aerospace. . . . .	73
8.2	<b>Image CCD brute de M82 à l'OHP au 120.</b> A gauche : image des 900s d'intégration en $H_\alpha$ . A droite : histogramme de l'image ( $\sigma = 348$ ADU). Pris le 14 décembre 2006 par les étudiants du Master 2 d'astrophysique d'IdF, groupe de Paris. . . . .	80
8.3	<b>Biais de la CCD de l'OHP au 120.</b> A gauche : image (0s d'intégration) créée avec 6 images. A droite : histogramme de l'image ( $\sigma = 1.4$ ADU). Pris le 14 décembre 2006 par les étudiants du Master 2 d'astrophysique d'IdF, groupe de Paris. . . . .	80
8.4	<b>Flat du filtre <math>H_\alpha</math> avec la CCD de l'OHP au 120.</b> A gauche : image (15s d'intégration) créée à partir de 4 images. A droite : histogramme de l'image ( $\sigma = 5.4\%$ ). Noter les valeurs centrées autour de 1 pour ne pas changer la photométrie. Noter la non-uniformité de l'illumination, l'image de taches de poussières défocalisées (ayant la forme du miroir primaire), et les colonnes endommagées du détecteur. Pris le 13 décembre 2006 par les étudiants du Master 2 d'astrophysique d'IdF, groupe de Paris ; traitement de l'auteur. . . . .	81
8.5	<b>Image CCD pré-traitée et traitée (filtrage médian) de M82 à l'OHP au 120.</b> A gauche : image des 900s d'intégration en $H_\alpha$ . A droite : histogramme de l'image ( $\sigma = 305$ ADU). Noter le changement d'échelle et de dispersion par rapport à l'image brute. Pris le 14 décembre 2006 par les étudiants du Master 2 d'astrophysique d'IdF, groupe de Paris ; traitement de l'auteur. . . . .	81
9.1	<b>Masse d'air et extinction (en magnitudes) selon la longueur d'onde, en fonction de la hauteur.</b> Table 5.1 de Howell [2000]. . . . .	85

11.1	<b>Illustration du principe de photométrie d'ouverture</b> : à gauche en vue de dessus ; à droite en coupe (profil). Le profil de la source ponctuelle (PSF) est représenté en niveaux de gris à gauche (noir : intense ; blanc : faible) et en trait plein noir à droite. Le cercle de rayon $r_{ap}$ représente l'ouverture dans laquelle on intègre le flux. L'anneau délimité par les rayons $r_{in}$ et $r_{out}$ sert à estimer le fond. Figure II.3 de la thèse de Bavouzet [2008], avec l'aimable autorisation de l'auteur. . . . .	97
13.1	<b>Carte du ciel des anisotropies de température du CMB observées par WMAP</b> (données 3 ans). En haut à gauche : tous les $l$ ; ensuite, pour les 8 premiers $l$ . Figure 14 de Hinshaw et al. [2006]. . . . .	104
13.2	<b>Illustration des 3 régimes dans le spectre de puissance des fluctuations de température du CMB <math>C_l</math></b> . Le plateau, les pics acoustiques, l'amortissement. En insert, image des fluctuations observées en 1999 par le ballon BOOMERANG [De Bernardis et al., 2000] : on voit que l'essentiel de l'énergie se trouve dans des fluctuations aux échelles assez petites ( $\sim 1$ degré), ce qui explique le 1er pic acoustique vers $l \sim 200$ correspondant à une angle de 1 degré. Pour l'interprétation des 3 régimes, voir le cours de cosmologie. (adapté de S. Bridle). . . . .	106
13.3	<b>Spectre de puissance (à gauche) et fonction d'autocorrélation (à droite) de mesures de vitesses radiales en fonction du temps sur l'étoile <math>\alpha</math>-Cen A</b> . Les oscillations (modes p de pression) sont à l'origine de ces variations de vitesse mesurées dans le spectre de puissance. 13 nuits d'observations en Mai 2001 à la Silla. Figures 2 et 3 de Bouchy & Carrier [2002]. . . . .	107
13.4	<b>Premier spectre de puissance d'une étoile observée continûment par COROT pendant 50 jours</b> . LESIA/LAM/IAS/LATT/CNES/CNRS-INSU, mai 2007. . . . .	107
A.1	<b>Filtres IAP interférentiels placés au 120 de l'OHP</b> . Adapté d'un document de M. Dennefeld. . . . .	116

# Liste des tableaux

2.1	Quelques conversions approximatives dans le spectre électromagnétique. Les relations sont $E = h\nu = hc/\lambda = kT$ . . . . .	18
4.1	Probabilité dans le cas gaussien dans l'intervalle $[\mu - t\sigma, \mu + t\sigma]$ en fonction de $t$ [Taylor, 1982]. . . . .	40
8.1	Comparaison des caractéristiques de quelques couples caméra CCD + télescope. . . .	73
11.1	Bandes photométriques standard dans le visible et l'infrarouge. $\lambda_0$ est la longueur d'onde centrale, $\Delta\lambda/\lambda_0$ est la largeur à mi-hauteur relative du filtre, $F_{0,\nu}$ est le flux de référence en Jy dans la bande photométrique considérée, donnée pour le système de magnitude Vega et AB. Les références sont 1=Bessell et al. [1998] et Johnson [1965], 2=Campins et al. [1985], 3=Schneider et al. [1983], 4=Rieke et al. [1985], 5=Gunn et al. [1998], 6=Rieke et al. [2008], 7=Reach et al. [2005], 8=Engelbracht et al. [2007], 9=Gordon et al. [2007],10=Stansberry et al. [2007]. Voir aussi Glass [1999] et Léna et al. [2008].	100

